

**В.Г. Горохов**

# **ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: история и теория**

*ИСТОРИЯ НАУКИ С ФИЛОСОФСКОЙ ТОЧКИ ЗРЕНИЯ*



**Москва • ЛОГОС • 2012**

## Технические науки: история и теория

---

**Посвящается моей любимой Галочке, без которой эта моя книга, как, впрочем, и все другие, была бы невозможна**

Есть в мире разные таланты:  
Одним начертано писать,  
Иные – с детства музыканты,  
А третьи могут рисовать.

Но мало тех, кто в жизни может  
Другим охотно помогать,  
Чужих судьба кого тревожит,  
Чтоб радость людям доставлять.

Не всем дано так мир увидеть,  
Как с радостью способна ты.  
Таких людей легко обидеть,  
Как невниманием цветы ...

Не перестану удивляться  
Твоей способности любить.  
Не каждый может наслаждаться  
Другим с душой добро творить.

*Твой В.Г.*

УДК 1:001; 001.8  
ББК 30.1  
Г70



*Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского гуманитарного научного фонда,  
проект № 12-03-16045*

*Рекомендовано к изданию Ученым советом  
Института философии Российской академии наук*

#### Рецензенты

*В.П. Борисов*, доктор технических наук, заместитель директора  
Института истории естествознания и техники РАН

*А.А. Печёнкин*, доктор философских наук, профессор  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

**Горохов В.Г.**

Г70 Технические науки: история и теория (история науки с философской точки зрения): монография / В.Г. Горохов. — М.: Логос, 2012. — 512 с.

ISBN 978-5-98704-463-6

Представлен философско-методологический анализ истории технических наук на материале теории механизмов и машин, теории электрических цепей, теории автоматического регулирования, а также теоретической радиотехники и радиолокации, макро- и наносистемотехники и других областей знания, которые с философской точки зрения рассматриваются в качестве «идеальных типов» историко-научного исследования. Освещается опыт разработки автоматизированных систем управления в Советском Союзе в 60–70-е гг. XX века как пример системотехнического проектирования. Изложены новейшие результаты исследования социальных последствий техники. Дана оценка рисков научно-технического развития, представляющих собой отличительную особенность современного этапа развития технических наук.

Для философов, науковедов, историков науки и техники, ученых и специалистов в области прогнозирования социальных последствий научно-технического прогресса. Может использоваться студентами в учебном процессе по направлению подготовки (специальности) «Философия», магистрантами, а также аспирантами, в особенности технических специальностей, по курсу «История и философия науки». Представляет интерес для широкого круга исследователей проблем философии научно-технического развития.

УДК 1:001; 001.8  
ББК 30.1

ISBN 978-5-98704-463-6

© Горохов В.Г., 2012  
© Логос, оформление, 2012



# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	9
<b>Введение</b> .....	11
1. Место и роль философии техники в современной философии .....	11
2. Строение технической теории в классических технических науках .....	25
3. Современные комплексные научно-технические дисциплины .....	33
4. Технонаука как новая форма современной научно-технической деятельности .....	45
Литература .....	48
<b>Глава 1. Технические науки и математика</b> .....	50
1.1. Предыстория: соотношение техники и математики до возникновения технических наук .....	50
1.2. Становление теории механизмов и машин как технической науки .....	71
1.2.1. Технологическая, конструктивная и кинематическая теория машин .....	71
1.2.2. Гаспар Монж и Парижская политехническая школа .....	73
1.2.3. Принципы механизма Роберта Виллиса .....	80
1.2.4. Теоретическая кинематика Франца Рело .....	84
1.2.5. Универсальная классификационная схема и математизированная теория механизмов .....	91
1.2.6. Наномашина как «механический механизм» .....	99
1.3. Теория электрических цепей и сетей — логика, математика, техника .....	109
1.4. Теория автоматического регулирования — междисциплинарный теоретический синтез на математической основе .....	148
1.5. Алгоритмические языки имитационного моделирования .....	157
Литература .....	165

<b>Глава 2. Технические науки и естествознание .....</b>	<b>171</b>
2.1. Классические технические науки .....	171
2.2. Становление радиотехнической теории: от электродинамики Фарадея и Максвелла через технические следствия из опытов Герца.....	172
2.2.1. Структура электродинамической теории Фарадея — Максвелла — Герца .....	172
2.2.2. Экспериментальное доказательство теории Максвелла Герцем и его технические следствия.....	186
2.2.3. Совершенствование экспериментального оборудования .....	200
2.2.4. Возникновение радиотехники.....	212
2.2.5. Построение технической теории — теоретической радиотехники .....	222
2.2.6. Нанотехнонаука как наноэлектроника .....	238
2.3. Методологический анализ истории становления классической радиолокации.....	254
2.3.1. Принципы методологического анализа истории радиолокационной науки и техники как научно-технической дисциплины .....	254
2.3.2. Возникновение радиолокации как нового исследовательского направления радиотехники .....	261
2.3.3. Радиолокация как область исследования в рамках базовой научно-технической дисциплины — радиотехники.....	280
2.3.4. Радиолокация как самостоятельная научно-техническая дисциплина.....	298
Литература .....	310
<b>Глава 3. Системотехника: сложные системы как объект исследования и проектирования .....</b>	<b>316</b>
3.1. Становление системотехники как новой научно-технической дисциплины.....	316
3.2. Теоретическая системотехника: системное исследование и системное проектирование .....	325
3.3. Радиолокационная системотехника как неклассическая научно-техническая дисциплина .....	335
3.3.1. Теоретические проблемы радиолокационной системотехники.....	335
3.3.2. Организационный аспект становления радиолокационной системотехники .....	343

3.4. Разработка автоматизированных систем управления в Советском Союзе в 60–70-е гг. XX в. как системотехническое проектирование .....	368
3.4.1. Общие сведения .....	368
3.4.2. Эволюция понятия «управление» от теории автоматического регулирования до кибернетики.....	373
3.4.3. Автоматизированные системы управления предприятием и отраслью промышленности .....	379
3.4.4. Системное обеспечение создания АСУ и организация подготовки инженеров-системотехников.....	400
3.5. Микро- и наносистемотехника как новая область системотехники.....	409
3.5.1. Общие сведения .....	409
3.5.2. Нанотехнология как кластер теорий .....	411
3.5.3. Наносистемная онтология как научная картина мира и регулятив технического действия .....	424
3.5.4. Роль в нанотехнологии «универсальных» средств компьютерного имитационного моделирования .....	449
3.5.5. Абстрактные структурные и алгоритмические схемы современной технонауки .....	462
3.5.6. Новейшая история развития нанотехнологии как технонауки .....	468
Литература .....	476
<b>Заключение</b> .....	482
Литература .....	506
<b><i>Vitaly G. Gorokhov. Engineering Sciences: History and Theory</i></b> .....	509
<b>Content</b> .....	510



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Освещение истории науки с философской точки зрения является одной из важнейших проблем современной философии науки. В связи с преподаванием курса истории и философии науки эта проблема становится практической задачей написания рефератов по истории науки аспирантами всех специальностей, только еще входящими в науку. Это даст им ретроспективный взгляд на собственную специальность и в то же время позволит взглянуть на научную деятельность и ее социальную роль в целом, выйдя за рамки узкой дисциплинарности. Кроме того, современному ученому приходится объяснять суть своей деятельности не только коллегам, узкому кругу специалистов, но и общественности, заказчикам и ученым других специальностей, которые по отношению к другим дисциплинам также являются дилетантами. А это можно сделать, только заняв рефлексивную позицию по отношению к собственной научной деятельности, т.е. с точки зрения философии науки. Собственно говоря, именно такого рода исследование истории науки и техники на конкретных примерах было провозглашено философами науки в середине XX столетия.

В книге доктора философских наук, профессора В.Г. Горохова, известного специалиста в области философии и истории техники и технических наук, основное внимание уделяется развитию теоретических представлений о механизме и машине, теории электрических цепей, теории автоматического регулирования, теоретической радиотехники и радиолокации, а также системотехники и нанотехнологии.

Книга состоит из трех глав. Глава 1 посвящена взаимоотношению техники и математики, которое, с одной стороны, породило целый ряд первых технических теорий, а с другой — появились новые области чистой математики — типа операционного исчисления. Глава 2 наглядно иллюстрирует взаимоотношения естествознания и техники, в результате которого появился целый кластер технических теорий, получивших наименование «радиоэлектроника». Глава 3 связана со становлением макро- и наносистемотехники. Здесь особый интерес представляет методологический анализ опыта создания автоматизированных систем управления в промышленности

в СССР, о котором автору известно не понаслышке — он сам принимал участие в разработке этих систем в радиопромышленности. Такого рода методологический анализ в сочетании с науковедческими исследованиями истории технических наук может быть прекрасным образцом для написания рефератов по истории науки в рамках курса истории и философии науки для аспирантов технических специальностей.

Предлагаемая книга является результатом многолетних исследований автора и исследовательской работой, а не учебным пособием, поскольку написать его в классическом стиле для данного курса, особенно касательно технических наук, просто невозможно. Слишком большой разброс разнообразных типов наук они затрагивают. Кроме того, рефераты по истории науки, задуманные как введение к различным диссертационным исследованиям, сами должны представлять собой оригинальное исследование, но иного рода, чем диссертации. Это особое методологическое и науковедческое исследование истории конкретных наук, проводимое с философской точки зрения. И предлагаемая вниманию читателя книга может служить прекрасным образцом такой работы.

Проведенное В.Г. Гороховым исследование прекрасно демонстрирует важную роль теоретических исследований именно для получения практических технических результатов, значение которых не уменьшается, а возрастает, что убедительно показано в данной работе на примере нанотехнологии. Это поднимает значимость и соответствующих методологических исследований теоретического знания, прежде всего в технических науках. Именно на основе таких методологических исследований возможны обогащение философской науки, осмысление ее проблем, возникающих на передовых рубежах научно-технического прогресса, ее действительного влияния на инженерное и научное мышление представителей различных областей науки и техники, на нормы организации современного научно-технического знания и в конечном счете на научно-техническую стратегию и политику государства.

*В.С. Стёпин,  
академик Российской академии наук*

# **ВВЕДЕНИЕ**

## **1. Место и роль философии техники в современной философии**

Еще совсем недавно, в конце XX столетия, философия техники рассматривалась как периферийная дисциплина современной философской науки. Даже модная в СССР проблематика сначала научно-технической революции, а затем ускоряющегося научно-технического прогресса не снимала настороженного отношения к ней со стороны философов. Положение резко изменилось в начале нового столетия с появлением проблематики конвергентных технологий. И действительно нано-, био-, инфо- и когнитивные технологии вторглись в такие чувствительные сферы социальной, биологической и психической жизни, что порой сами становятся философией. Стало очевидно, что без обсуждения глубинных социальных, философских, эпистемологических и других вопросов продвижение их в современном обществе просто невозможно. Внутри научно-технического сообщества возникла потребность и даже необходимость осмысления тех процессов, которые порождают в нашем обществе эти технологии, как положительных, так и негативных. Поэтому даже в специальных монографиях, а также на специальных конференциях можно наблюдать пока еще сравнительно робкие попытки обсуждать эти темы. Появляются многочисленные публикации такого рода, например по нанотехнике, которые раньше были прерогативой лишь профессиональных философов.

Современные технологии стали настолько наукоемкими, что их вообще нельзя сравнивать с традиционными ремесленными технологиями. Даже крестьяне и ремесленники в развитых западных странах обращаются к науке за поиском различных рецептов, улучшающих их работу. Кроме того, эти технологии стали настолько сложными и многогранными, что их не в состоянии самостоятельно осмыслить ни узкие специалисты, ни профессиональные философы. Специалистам, невольно и неизбежно вторгающимся со своими инновациями в социально-гуманитарные сферы, не хватает гума-

нитарной культуры и знания философской традиции для их обсуждения. Философам же, за редким исключением, недостает хотя бы поверхностного понимания механизмов развития этих новых технологий.

Таким образом, возникает трудноразрешимая дилемма стыковки этих двух часто несовместимых миров. Частично попыткой преодолеть образовавшийся разрыв является введение курса философии и истории науки для аспирантов всех специальностей, куда входит и философия техники. Однако зачастую ее относят лишь к тем, кто специализируется в области технических наук, что в принципе неправомерно хотя бы потому, что современная техника не только определяет сегодня во многом наш образ жизни, поскольку мы повсеместно сталкиваемся с ней в нашей повседневности, но и изменяет саму суть даже научной деятельности. Это, в частности, выразилось в становлении нового модуса ее существования, функционирования и развития, получившего название технонауки, которую не следует путать с технической наукой, поскольку она представляет собой новый сплав теоретического и практического, фундаментального и прикладного, естественнонаучного, технического и социального. Все это переместило философию техники с периферии философской науки в центр философских анализов и дискуссий.

Философия техники возникла в конце XIX — начале XX в. почти одновременно в Германии и в России как продукт саморефлексии упрочнявшего свое место в обществе инженерного сословия. Однако дискуссии о месте техники в современной культуре и о значении инженерной профессии в обществе скоро перешагнули узкие профессиональные границы, особенно после того, как технологические нововведения стали изменять сам образ социальной жизни. Новые средства передвижения и коммуникации затронули каждого гражданина развитых стран, а уровнем технологического развития стали измерять продвинутость того или иного государства и определять им его место в мировом сообществе. Само социальное действие стало рассматриваться по аналогии с инженерной деятельностью как социальная инженерия. Это, однако, привело к усилению культуркритики техники и технократических тенденций, что составило новое направление в самой философии техники. Главное внимание в философии техники в этот период, наряду со многими другими темами, уделяется проблеме соотношения техники и культуры.

Социальные эксперименты 20–30-х гг. XX столетия и Вторая мировая война, а в особенности применение атомного оружия и различные техногенные катастрофы, внесли существенные коррективы и в рассмотрение философской проблематики техники. Все боль-



ший упор в ней теперь делается на этические проблемы и проблемы ответственности, о чем чаще всего стали дискутировать западногерманские и американские философы техники начиная с 60-х гг. XX века. Это выразилось как в исследовании конкретных случаев этического или аморального поведения отдельных инженеров или их сообществ, так и в коллекционировании этических кодексов различных инженерных союзов. Кроме того, именно эти аспекты этики техники стали разрабатываться в виде учебных программ для подготовки будущих инженеров в различных высших технических школах и университетах. Именно в это время начинает формироваться сообщество философов техники, исследовательские группы которых стали консолидироваться или вокруг философских кафедр ведущих технических университетов, прежде всего Западной Германии и США, или же в рамках инженерных обществ и союзов, таких, например, как Союз немецких инженеров, где в 1956 г. была основана группа «Человек и техника», один из рабочих комитетов которой получил название «Философия техники». Результаты многолетней работы этой группы были представлены на Всемирном философском конгрессе в Дюссельдорфе в 1978 г. выступлениями ее активных членов Фр. Раппа и А. Хунинга [1].

В США исследования по философии техники проводятся традиционно в рамках национальной программы «Наука, техника, общество» (STS), имеющей комбинированные исследовательско-учебные подразделения во многих ведущих университетах США, например Бруклинском политехническом университете, Корнельском университете или Пенсильванском государственном университете. Она или ее подобие имеет широкое распространение в Австралии, Австрии, Великобритании и Голландии. В Массачусетском технологическом институте STS-программа была основана в 1976 г. с целью поиска ответов на два тесно взаимосвязанных вопроса: каким образом развивались наука и техника как виды человеческой деятельности и какую роль они играют в современной цивилизации? В рамках этой программы исследования носят, как правило, междисциплинарный характер; среди них центральное место занимают исследования по философии техники. В 1976 г. было основано и Международное общество философии и техники (Society for Philosophy and Technology), которое стало выпускать журнал «Технэ: исследования по философии и технике» (Techné: Research in Philosophy and Technology) и проводить один раз в два года международные конференции.

В Польше исследования по философии техники концентрировались в основном в рамках методологии проектирования и праксиологии. Центры исследований по философии техники сформирова-

лись в Праге (Л. Тондл [3]) и в Техническом университете Будапешта (И. Хронски). Только начиная с 1986 г. формируются условия для совместных дискуссий по философии техники западных ученых и философов из стран социалистического лагеря. Одним из таких мест встречи и свободного обмена мнениями в этой области становится на несколько лет семинар «Социальные интерпретации техники» в г. Дубровнике (тогда Югославия).

Если в Западной Европе и США основной упор в исследованиях по философии техники первоначально был направлен на проблемы социальной ответственности инженеров и этику техники, а также взаимоотношение науки, техники и общества с акцентом на вопросы научно-технической политики и социальной оценки последствий техники, то в Советском Союзе и ГДР основное внимание стали уделять методологическим проблемам технических наук и инженерной деятельности. Этому были посвящены публикации и дискуссии в Ленинграде, Томске и Москве, где проходил целый ряд конференций и было издано несколько сборников статей, а также материалы круглых столов и серии статей в журнале «Вопросы философии». Одновременно в Дрезденском техническом университете и в Берлине был проведен ряд конференций и издано несколько публикаций, посвященных истории техники и технических наук, рассмотренных с философской точки зрения.

Тем не менее некоторые философско-методологические основания для исследования соотношения науки и техники в историческом ключе были разработаны в публикациях западно-германских философов. Г. Бёме, Г. Румпфом, Фр. Раппом, П. Янихом были рассмотрены процессы технизации естествознания и сциентификации техники, выделены теоретические основы техники, но эти работы в основном ограничивались внешним анализом. Г. Бёме, например, отмечает, что в течение XIX в. отношения между наукой и техникой в связи с сциентификацией техники изменились, но переход к научной технике был не однонаправленным процессом трансформации техники наукой, а их взаимной модификацией [4]. Для современной науки вообще характерно «ответвление в специальные технические теории» за счет построения специальных моделей, а именно: «формулировки теорий технических структур и конкретизации общих научных теорий», причем многие научные теории возникали первоначально как теории научных инструментов [5, р. 233, 239, 241]. С точки зрения Румпфа технические и естественные науки рядоположны, поскольку они занимают одну и ту же предметную область экспериментально измеримых явлений, а большинство физических экспериментов являются искусственными. Поэтому, считает Румпф,

различение естественных и технических наук по предметной области остается неясным.

Трудно разделить естественные и технические науки и по способу постановки задач, так как многие задачи технических наук были разработаны естествоиспытателями и математиками, а методы, используемые в них, в своей основе одни и те же. Технические науки — это часть науки, и хотя они не должны далеко отрываться от технической практики и обслуживают технику, «но являются прежде всего наукой, т.е. направлены на объективное и поддающееся передаче знание» [6, р. 136–142, 157, 176].

Об этом же фактически пишет Фр. Рапп: «Конечно, технические процессы и системы появляются не сами, а лишь в результате сознательных целевых действий». В то же время «реализованные технические системы принадлежат к материальному миру и в этом широком смысле могут быть рассмотрены как естественные». Между естественнонаучными экспериментами и техническими процессами нет большой разницы. Естественнонаучные эксперименты являются артефактами, а технические процессы фактически — видоизмененными природными процессами [7, s. 28]. Цель физики — изолировать теоретически предсказанное явление, чтобы получить его в чистом виде, именно поэтому физические науки могут применяться в инженерной практике, а технические устройства возможно использовать в экспериментальной физике [8]. Рапп считает, что фундаментальным является такое исследование, которое направлено на расширение человеческого понимания, а поскольку нет четкого разделения между техническими и научными исследованиями, то технические науки могут быть рассмотрены как академические дисциплины [9]. Он подчеркивает, что решительный поворот в становлении технических наук состоял «в связывании технических знаний с математико-естественнонаучными методами» [10, s. 104]. По мнению Яниха, опыт современной естественной науки — это аппаратный опыт, поскольку эксперименты строятся из искусственных ситуаций. Осуществление экспериментов — это деятельность по производству технических эффектов, и скорее может быть квалифицирована как инженерная, а не научная, т.е. как конструирование машин, а не исследование природы, как попытка создать искусственные процессы и состояния, а не поиск научной истины [11, р. 9, 11].

В рассмотренных выше работах анализировались в основном связи, а также сходства и различия физической и классической технической теории. Однако, как отмечали Х. Ленк и Г. Рополь, во второй половине XX в. возникло множество технических теорий, основанных не только на физике. Их можно назвать «абстрактными техниче-

скими теориями». «Многодисциплинарные и системоподобные соединения технических проблем требуют не только методологической рефлексии фундаментальных принципов, но и междисциплинарной кооперации экспертов социальных наук и дженералистов» [12, р. 31, 33, 37; 13].

Однако ориентация именно на содержательный методологический анализ технических наук была взята в работах советских исследователей уже в 70–80-е гг. XX столетия, а также в работах ученых ГДР. Ими доказывалось, что технические науки нуждаются в собственном теоретическом фундаменте — «научно-технической теории», которая не является лишь конкретизацией какой-либо естественно-научной теории, хотя между ними и существуют определенные связи. Технические науки обычно рассматриваются как науки о создании и функционировании техники.<sup>1</sup>

Итоги многолетних исследований этой группы ученых суммированы в издании книги «История технических наук» [13].

Наиболее существенный вклад в методологическое исследование научно-технического знания внес В.В. Чешев в своей книге «Техническое знание как объект методологического анализа» [14], в которой была реализована исследовательская программа содержательно-методологического анализа научного теоретического знания, развитая В.С. Стёпиным [15]. В данной книге исследование истории технических наук осуществляется именно в рамках этого направления философии науки.

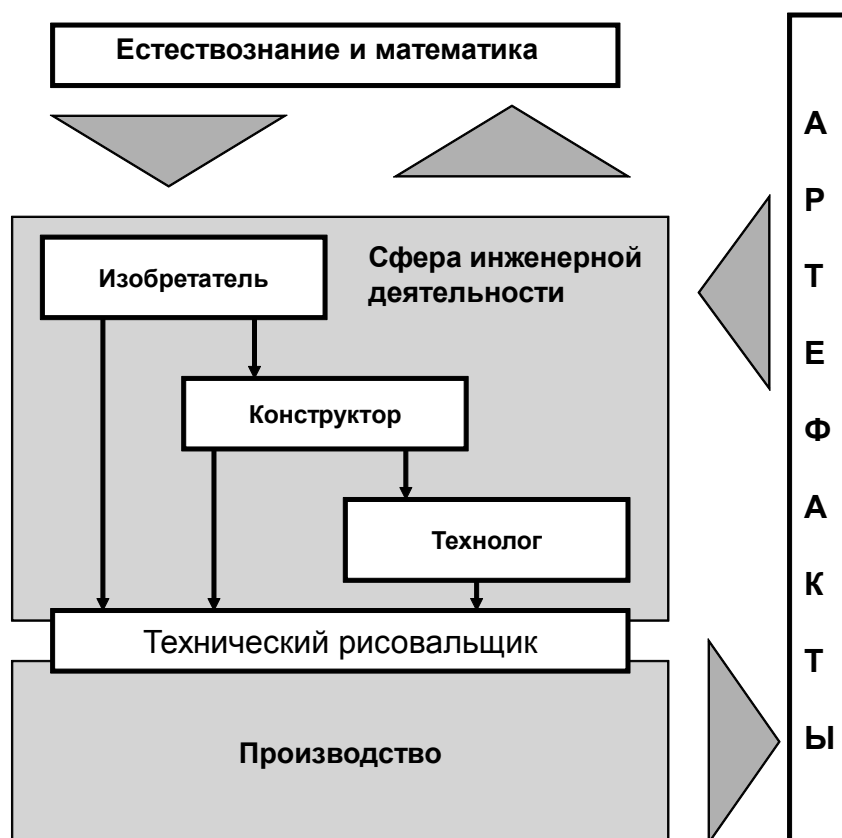
Основной проблемой для консолидации философии техники в самостоятельное исследовательское направление современной философии было разграничение предмета ее исследования, с одной стороны, с историей техники, а с другой — с философией науки. Одним из главных предметов исследования, явившихся индикатором специфики данной области философии и одновременно истории науки и техники, стала методология и история технических наук. История техники, как правило, уделяла и уделяет недостаточно внимания истории развития теоретических основ техники и научно-технического знания. Философию же науки в основном интересовали области, оказывавшие существенное влияние на мировоззрение и научную картину мира, прежде всего теоретическая физика и математика, позднее биология. Технические же науки рассматривались как периферийные прикладные области и не удостоивались внимания серьезных исследователей философии науки. Положение изменилось лишь к концу XX столетия, когда общество стало требовать

---

<sup>1</sup> Подробнее об этих исследованиях см.: *Горохов В.Г.* «Техника и культура». М.: Логос, 2009, с. 289–298.

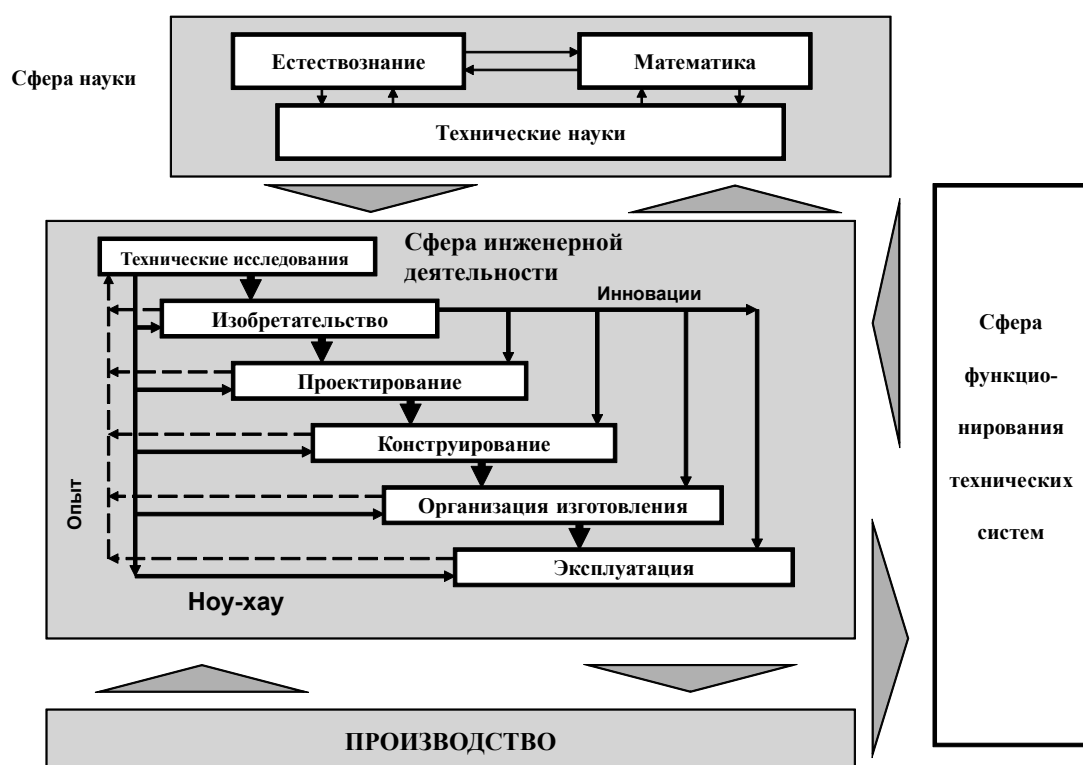
от науки все большей ориентации на техническую практику и даже фундаментальная естественная наука начинает рассматриваться в качестве мотора технического прогресса общества.

Техника большую часть своей истории была слабо связана с наукой. В то же самое время естествознание решало в основном свои собственные задачи, хотя часто отталкивалось от техники. Инженеры провозглашали ориентацию на науку, но в своей практической работе руководствовались научными достижениями лишь незначительно. После многих веков разделения наука и техника соединились в XVII в., в начале научной революции (рис. В.1).



**Рис. В.1.** Строение инженерной деятельности до возникновения технических наук

Но лишь в конце XIX в. это единство приносит свои первые плоды, а в XX столетии наука становится главным источником новых видов техники и технологии. Положение изменилось прежде всего с развитием технических наук. Этот факт отмечают почти одновременно как советские, так и германские философы. Инженеры теперь используют не столько готовые научные знания, сколько научный метод, а технические науки как часть науки, хотя и не должны далеко отрываться от технической практики, но являются прежде всего науками, т. е. направлены на объективное, поддающееся передаче знание (рис. В.2).



**Рис. В.2.** Структура развитой инженерной деятельности с ориентацией на технические науки

Классический период — до середины XX столетия — характеризовался построением целого ряда технических теорий. Появление технических наук, как подчеркивается в многочисленных исследованиях в этой области, было обусловлено развитием машинного производства и требовавшимся для него формированием специалистов — носителей научно-технического образования, т. е. инженеров, а также необходимостью усиления их теоретической подготовки. И именно технические науки становятся важным связующим звеном между теоретическим естественнонаучным знанием, инженерной деятельностью и производством.

Становление технических наук связано с приданием инженерному знанию формы, аналогичной науке, в результате чего сформировались профессиональные общества, подобные научным, были основаны научно-технические журналы, созданы исследовательские лаборатории, а математические теории и экспериментальные методы науки были приспособлены к техническим нуждам. В то время, когда происходило становление технических наук, во-первых, научно-технические знания формировались на основе применения естественнонаучных знаний к инженерной практике и, во-вторых, в особую систему выделились первые научно-технические дисциплины. В последнее время анализу именно этих дисциплин начинает уделяться все большее

внимание в философии науки техники. Достаточно назвать работы, посвященные исследованию взаимоотношений науки и техники [16], и вышедший недавно сборник «Философия техники и технических наук», где собраны работы ведущих специалистов в данной области [17]. В них отмечается специфика теоретических исследований в технических науках, институализировавшихся сначала в высших технических школах, а затем и в промышленных исследовательских лабораториях, возникающих повсеместно в конце XIX – начале XX в. и финансирующихся правительствами (чаще всего в рамках военно-промышленного комплекса). Изобретение телеграфа, телефона, электромоторов и динамо-машин для своей реализации потребовало создания новых крупных компаний типа «Белл телефон», «Дженерал электрик» Эдисона, «Телефункен», «Сименс» и др., где над доработкой и реализацией этих изобретений работали целые группы исследователей и инженеров.

Романтические идеалы индивидуального кустарного изобретательства уступили место рациональному планомерному процессу работы исследовательских групп. В результате появились промышленные исследовательские лаборатории, в штат которых входили междисциплинарные группы ученых и инженеров, способствовавшие преобразованию технических наук в промышленно базирующуюся науку. К ним присоединились вновь создаваемые экспериментальные инженерные лаборатории университетов, которые часто были тесно связаны с промышленностью. Важнейшую роль в этом процессе сыграли химическая и электротехническая промышленности. Фирма BASF, например, в 1889 г. создает такого рода лабораторию совместно с Высшей технической школой г. Карлсруэ. Томас Эдисон организует частную лабораторию «Мело Парк» в Нью Джерси в 1876 г., где совместно работают ученые, инженеры и предприниматели.

Такого рода лаборатории в электротехнической промышленности сочетают в себе междисциплинарный подход, привлекая к совместной работе физиков, химиков, металлургов, инженеров-механиков и инженеров-электриков. Создавая новый рыночный продукт, они придают решающее значение патентам, так как это позволяет занять монопольную позицию на рынке, и работают в сфере оборонной промышленности. Они также сочетают подходы, характерные как для чистого, так и прикладного исследования. «В этих лабораториях исследования не следовали модели чистой науки. Скорее эти лаборатории развивали новые технические теории и методологию проектирования, которые размывали границы между наукой и техникой, и лучше всего было бы называть основанными на индустрии техническими науками» [18, s. 134–138].

Однако первые технические науки возникают в конце XVIII в. и ходе XIX столетия, когда окончательно преодолеваются социальные и интеллектуальные барьеры между наукой и техникой. С изобретением парового двигателя, созданием железных дорог, океанских кораблей из железа и больших железных мостов для инженеров стало непрактичным и неэкономичным следовать традиционной практике проб и ошибок и произвольных решений. В то же самое время ученые, интересующиеся практическими применениями науки, поняли то, что инженеры уже и так знали, — многие вновь открытые законы неприменимы к технике. Механика Ньютона могла объяснить силы, действующие между атомами, но не была в состоянии помочь определить, каким образом ведет себя железная балка при комплексной нагрузке. Законы Бойля объясняют отношения между давлением и объемом идеального газа, но мало применимы к описанию того, как ведет себя пар в паровом двигателе. Уравнения Бернулли из классической гидромеханики имеют лишь ограниченную сферу приложения для описания реальных жидкостей при неламинарном потоке (турбулентном).

В ходе промышленной революции появилось несколько новых социальных институтов, основной целью которых стало развитие более технологически ориентированной науки. Если в Англии они носили частный характер, то в централизованной Франции в их организации главную роль играло государство, учредившее множество технических школ, наиболее важной из которых была Парижская высшая политехническая школа. Именно она стала образцом для аналогичных учебных и одновременно исследовательских социальных институтов Европы и Америки, ориентированных на развитие наук в целях удовлетворения практических инженерных запросов. Однако если во Франции главное внимание уделялось теоретической подготовке инженеров, а техническая наука понималась скорее как простое приложение науки к инженерной практике, то в германских высших технических школах была развита идея автономной технической науки как гармонического соединения научной теории и технической практики. Впервые термин «техническая наука» был пущен в обиход французским инженером Белидором в его книге «Наука инженера», вышедшей в 1729 г. в Артиллерийской школе.

Наконец, с середины XX в. обозначился новый этап, который выражается в реализации комплексных исследований не только в интеграции технических и естественных, но и общественных наук. В это время получают свое развитие при массовой поддержке государства такие крупные научно-исследовательские и одновременно инженерные проекты, как создание ядерного оружия, а затем



и основанной на результатах этих исследований атомной энергетики, ракетостроения и космической техники, радиолокационной системотехники и компьютерной техники, невозможных, с одной стороны, без проведения фундаментальных исследований, а с другой — без базирующейся на них промышленной базы (например, твердотельная электроника). Все это потребовало серьезной реорганизации и самой инженерной деятельности (рис. В.3), ставшей по сути дела сложной системотехнической, а зачастую и социотехнической деятельностью.

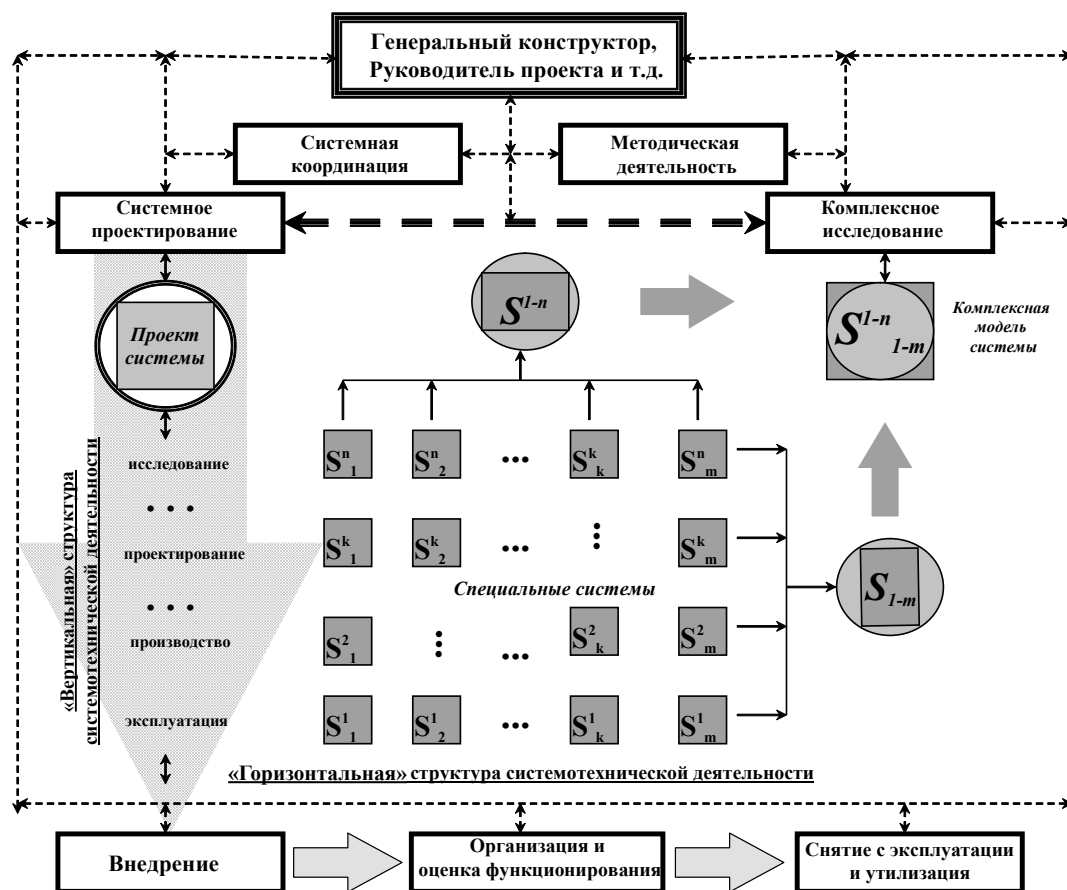


Рис. В.3. Структура системотехнической деятельности

Это неизбежно накладывает отпечаток на всю сферу современной науки, которая становится технаукой, поскольку теперь «техника действительно не может существовать без науки, а наука без техники». Этот феномен Латур назвал технаукой [19], причем речь в данном случае идет не только об изменениях в технических науках, в которых теоретические исследования становятся все более фундаментальными, но и во всей науке, которая все более ориентируется на промышленные разработки, часто дополняющие и даже замещающие традиционный технически подготовленный естественнонаучный эксперимент. Вслед за изменениями в инженерной сфере произошли и сдвиги в институализации науки.

«Например, в 1946 г. Гарвардский университет переименовывает отделение технических наук на отделение технических наук и прикладной физики и вскоре вслед за Корнельским университетом организует отделение технической физики. Л.И. Мандельштам и Н.Д. Папалекси в России, следуя идеям немецкого ученого Ф. Брауна, которого можно считать одним из создателей физико-технических исследований и физико-технического образования, стремившегося поднять радиотехнику до радиофизики, продолжили его работу по развитию научно фундированной физической радиотехники. Они смогли создать в России в 30–40-х гг. то, что не удалось Брауну в Страсбургском университете в начале XX века, — физико-технические подразделения в Московском государственном университете и Академии наук, параллельно работая в тесном сотрудничестве с нарождающейся радиотехнической промышленностью (Центральной радиолабораторией Государственного электротехнического треста заводов слабого тока). Это не только позволяло теоретическими методами решать многие стоящие перед новой отраслью промышленности практические проблемы, но и формулировать оригинальные постановки проблем в технической и естественнонаучной теориях. Мандельштам подчеркивал продуктивность “радиотехнических аналогий” в физике и “взаимопомощи” между различными “колебательными” разделами физики — оптики, теории электричества и магнетизма, акустики» [20]. (Подробнее об этом см. разд. 2.1.) К сфере технотехники могут быть отнесены, например, компьютерная наука или нанотехнология, которую в последнее время так прямо и обозначают как нанотехнотехника. Им соответствуют такие вновь образованные социальные институты на уровне международной кооперации, как, например, ЦЕРН в Женеве. Однако в отличие от крупных научно-технических проектов предыдущего периода исследования и разработки здесь осуществляются небольшими коллективами ученых и инженеров, что совсем не означает возвращения к традиционным формам науки и инженерии. Речь идет о большом числе проектов, объединенных в распределенную исследовательскую сеть (extended lab).

Данная книга является исследованием истории технических наук с философской точки зрения. Образцы такого исследования мы находим в работах ведущих философов науки, проводивших рациональную реконструкцию истории науки, историко-критический анализ генезиса концептуальных структур науки, исследование социальных аспектов развития науки на конкретном историко-научном материале. Однако, как указывал М. Вебер, важно познать исторически значимое «в индивидуальном своеобразии явления», в его культурном

значении: «...ничто не может быть опаснее, чем коренящееся в натуралистических предубеждениях смешение теории и истории, в форме ли веры в то, что в теоретических построениях фиксировано “подлинное” содержание, “сущность” исторической реальности, или в использовании этих понятий в качестве прокрустова ложа, в которое втискивают историю... “Идеальный тип”... есть нечто, в отличие от оценивающего суждения, совершенно индифферентное и не имеет ничего общего с каким-либо иным, не чисто логическим “совершенством”... конструируя идеальный тип или идеально-типическое развитие, исследователи часто пытаются придать им большую отчетливость посредством привлечения в качестве иллюстрации эмпирического материала исторической действительности. Опасность этого самого по себе вполне законного метода заключается в том, что историческое знание служит здесь теории, тогда как должно быть наоборот. Теоретик легко склоняется к тому, чтобы рассматривать данное отношение как само собой разумеющееся или, что еще хуже, произвольно подгонять теорию и историю друг к другу и просто не видеть различия между ними... “Объективность” познания в области социальных наук характеризуется тем, что эмпирически данное всегда соотносится с ценностными идеями... каждый индивидуальный идеальный тип составляется из понятийных элементов, родовых по своей природе и превращенных в идеальные типы... и тем самым станет в логическом смысле идеально-типическим, то есть отойдет от эмпирической действительности»...

Идеально-типические изображения являются идеальными типами не только в логическом, но и в практическом смысле, а именно стремятся быть «образцами», в них отображается то, что исследователь считает в нем существенным, сохраняющим постоянную ценность, может представляться современникам практическим идеалом, к которому надлежит стремиться. Но в образовании абстрактных идеальных типов следует видеть не цель, а средство: идеальный тип — не гипотеза, он лишь указывает, в каком направлении должно идти образование гипотез. Если для естественных наук важность и ценность «законов» прямо пропорциональны степени их общезначимости, то для познания исторических явлений в их конкретных условиях «наиболее общие законы, в наибольшей степени лишенные содержания, имеют, как правило, наименьшую ценность» [21]! Именно такой анализ истории науки, преодолевающий разрыв между философскими рассуждениями, с одной стороны, и чисто фактологическим описанием историко-научных фактов, с другой, и лежит в основе данной книги.

Собственно говоря, именно такого рода исследование истории науки и техники на конкретных примерах (Case Studies, Fallstudien) было провозглашено философами науки в середине XX столетия. Образцы такого исследования мы находим прежде всего в работах Имре Лакатоса, проводившего рациональную реконструкцию истории научно-исследовательских программ (на материале истории математики), и Александра Койре, мастерски осуществившего в своих работах историко-критический анализ генезиса концептуальных структур науки на материале научной революции XVII в. Томас Кун в своей первой (менее известной российскому читателю) работе «Коперниканская революция. Планетарная астрономия в развитии западной мысли» также демонстрирует такого рода исследование, впрочем, с большим упором на социальные аспекты развития науки. С. Тулмин блестяще реализует развитую им модель эволюционного представления истории науки на конкретном историко-научном материале в книгах «Материя и жизнь», «Модели космоса» и «Открытие времени» [22]. Однако наибольшее влияние на исследование истории технических наук оказали работы В.С. Стёпина по содержательно-методологическому анализу становления научной теории в классическом и неклассическом естествознании на примере электродинамики [22–25].

Данная книга построена следующим образом. В ней выделены тематически три основные главы, посвященные соотношению техники и математики (глава 1) и техники и естествознания (глава 2), которые привели к становлению первых технических теорий: теории механизмов и машин, теории электрических цепей, теории автоматического регулирования и компьютерного моделирования, а также теоретической радиотехники и радиолокации. Глава 3 посвящена истории возникновения и развития системотехники на примере радиолокационной системотехники, опыта создания автоматизированных систем управления промышленностью, а также наносистемотехники. В главе 1 специально выделен раздел, посвященный исследованию соотношения математики и механики до возникновения технических наук. Именно к этому периоду относятся первые два раздела главы 2, освещающие взаимоотношения естественной науки и техники — электродинамики Фарадея, Маквелла и Герца и технических следствий естественнонаучных экспериментов. Глава 2 охватывает период развития взаимоотношений науки и техники в условиях возникновения и развития классических естественных наук на примере теоретической радиотехники и классической радиолокации. Глава 3 соответствует системотехническому этапу развития инженерной деятельности.

В основу всех этих исторических исследований положены методологические схемы и представления, направленные на анализ теоретических исследований в технических науках.

## **2. Строеение технической теории в классических технических науках**

В теоретических схемах технической науки задается образ исследуемой и проектируемой технической системы. Такого рода теоретическую схему развил, например, в технической термодинамике Сад Карно. «Он изучил машину, проанализировал ее, нашел, что в ней основной процесс не выступает в чистом виде, а заслонен всякого рода побочными процессами, устранил эти безразличные для главного процесса побочные обстоятельства и сконструировал идеальную паровую машину (или газовую машину), которую, правда, также нельзя осуществить, как нельзя осуществить геометрическую линию или геометрическую плоскость, но которая оказывает, по-своему, такие же услуги, как эти математические абстракции: она представляет рассматриваемый процесс в чистом, независимом, неискаженном виде» [26, с. 543–544].

Техническая теория ориентирована не на объяснение и предсказание хода естественных процессов, а на конструирование технических систем. Естественнаучные знания и законы должны быть значительно уточнены и модифицированы в технической теории, чтобы их можно было применять для решения практических инженерных задач. Чтобы довести теоретические знания до уровня практических инженерных рекомендаций, в технической теории разрабатываются, во-первых, особые правила, устанавливающие соответствие между сферой абстрактных объектов технической теории и конструктивными элементами реальных технических систем, а во-вторых, операции перенесения теоретических результатов в область инженерной практики.

В технической теории рассматриваются три основных вида теоретических схем: функциональные, поточные и структурные схемы.

*Функциональная схема* фиксирует общее представление о технической системе независимо от способа ее реализации и является общей для целого класса технических систем. Блоки этой схемы фиксируют только те свойства элементов технической системы, ради которых они включены в нее для выполнения общей цели, и выражают обобщенные математические операции, а отношения между ними представлены определенными математическими зависимостями.

На функциональной схеме решение математической задачи осуществляется с помощью стандартной методики расчета типовыми способами на основе применения ранее доказанных теорем. Для этого функциональная схема по определенным правилам преобразуется к типовому виду. В классической технической науке функциональные схемы привязаны к конкретному типу физического процесса (режиму функционирования технического устройства) и отождествляются с какой-либо математической схемой или уравнением. Однако они могут быть выражены в виде декомпозиции взаимосвязанных функций, направленных на выполнение общей цели, предписанной данной технической системе, на основе которой строится алгоритм функционирования технической системы и выбирается ее конфигурация.

*Поточная схема* описывает естественные, например физические, (электрические, механические, гидравлические и т.д.) процессы, протекающие в технической системе, т.е. ее функционирование, и опирается на естественнонаучные, например физические, представления. Однако это могут быть любые естественные процессы — химические, если речь идет о теоретических основах химической технологии, биологические, если речь идет о биотехнологии, а в общем случае и вообще любые потоки субстанции (вещества, энергии, информации). Стационарные состояния рассматриваются в данном случае как вырожденный частный случай процесса.

*Структурная схема* технической системы показывает конструктивное расположение ее элементов и связей, т.е. ее структуру с учетом предполагаемого способа реализации. Она представляет собой теоретический набросок этой структуры с целью создать проект будущей технической системы, т.е., с одной стороны, результат технической теории, а с другой — исходный пункт инженерно-проектной деятельности по разработке на ее основе новой системы или теоретическое описание существующей технической системы с целью ее теоретического расчета и усовершенствования. Эти схемы строятся на основе представлений специализированных научно-технических дисциплин.

В частном случае структурная схема в идеализированной форме отображает техническую реализацию физического процесса. В современных же человеко-машинных системах такая реализация может быть самой различной, в том числе и нетехнической.

В технической теории на основе одной и той же технической системы строится несколько оперативных пространств, которым соответствуют различные теоретические схемы. В каждом таком пространстве используются разные абстрактные объекты и средства

оперирования с ними, решаются особые задачи. В то же время их четкое соответствие друг другу и структуре реальной технической системы позволяет переносить полученные решения с одного уровня на другой и в сферу инженерной деятельности.

В одной из своих ранних работ Р. Карнап, по его собственному свидетельству, под влиянием кантианской философии ввел представление о трех видах пространства — формальном, созерцательном и физическом [27]. Если их понимать как различные слои картины исследуемой реальности или теоретических схем, оперативные поля теории, то можно усмотреть параллели с введенными нами выше представлениями о трех типах теоретических схем. Сам Карнап, кстати сказать, в более поздних работах отказался от этих представлений, считая их заблуждением молодости. И действительно, они не вписываются в последовательную неопозитивистскую модель теории.

В *формальном пространстве* речь идет о бессодержательных (формальных) отношениях, на место которых могут быть поставлены самые разные вещи — числа, цвета, степени родства, круги, суждения, люди и т. д.

В *созерцательном пространстве* отображаются отношения между обычными пространственными структурами — линиями, плоскостями, частями пространства, определенные особенности которых мы схватываем в чувственных восприятиях или простых представлениях. Но при этом речь идет еще не об опытной реальности имеющих пространственных фактов, а о сущностях, которые могут быть приняты в качестве своего рода их репрезентанта.

*Физическое пространство* — пространство конкретных вещей и связей между ними — предполагает для своего познания созерцательное пространство, которое, в свою очередь, находит в формальном пространстве чистую форму своего строения и соответствующие мыслительные предпосылки.

Если трактовать понятие «пространство» абстрактно как картину исследуемой реальности, то тогда «физическое пространство» чувственно осязаемых предметов и связей между ними предстает для физической теории в виде структурной схемы экспериментальной ситуации, всегда достигаемой со времен физики Нового времени техническими средствами.

Действительно, чтобы осуществить эксперимент, необходимо, устранив побочные явления, воссоздать естественный процесс искусственным путем в условиях, которые не наблюдаются в природе в чистом виде. В свою очередь, искусственно созданные в эксперименте ситуации должны быть представлены и описаны как идеализирован-

ные конструкции. Достаточно вспомнить эксперимент по проверке свободного падения тел Галилео Галилея, который выбрал для бросаемого шарика очень твердый материал, позволяющий фактически пренебречь его деформацией. Кроме того, стремясь устранить трение на наклонной плоскости, он оклеил ее отполированным пергаментом.

В данном случае такой идеализированной структурной схемой эксперимента является наклонная плоскость. Искусственно полученная экспериментальная ситуация рассматривается далее как некоторый идеализированный естественный процесс движения природных тел по наклонной плоскости, т. е. уже в некотором «созерцательном пространстве», где фигурируют не данные нам в чувственном восприятии конкретные предметы и связи реальной экспериментальной ситуации, а их обобщенные репрезентанты, выражающие наиболее существенные свойства естественных (физических) процессов.

Фактически именно «созерцательное пространство» задает картину физической реальности, которая может быть экстраполирована на некоторый класс реальных объектов, относительно которых, например, можно пренебречь трением и упругой деформацией, и является условием построения и объяснения конкретных экспериментальных ситуаций. В то же время оно представляет собой оперативное средство представления этих реальных ситуаций и в этом аспекте коррелируется с «формальным пространством», в котором структуры «созерцательного пространства» выступают в качестве объектов оперирования (с которыми осуществляются различные математические действия и преобразования), замещающих в определенном отношении реальные объекты. В развитой теории именно в «формальном пространстве» происходит ее дедуктивное развертывание с целью разрешения возникающих научных проблем математическими средствами. Это пространство может быть отождествлено с введенными нами выше представлениями о функциональных теоретических схемах технической теории.

Особое звучание эти идеи приобретают в связи с исследованиями в области искусственного интеллекта, прежде всего графического представления информации. Здесь также выделяются три уровня: абстрактная вычислительная теория, в которой формулируются формальные информационные структуры, представления алгоритма, т. е. «поточная» схема обработки информации, и, наконец, структура их физической реализации в виде конкретного технического исполнения. Причем подчеркивается, что реализации трехмерного изображения реальных предметов предшествует их двумерное геометрическое представление, которое, в свою очередь, основывается на формальном математическом исчислении. Эти работы по машинному воспроизведению графических



представлений основываются на самых современных исследованиях в области психофизиологии зрительного восприятия и формирования образов. Они фактически продолжают традицию художников эпохи Возрождения, заложивших основы экспериментального математизированного естествознания Нового времени.

Структурные теоретические схемы можно обнаружить и в естественных науках. Только они, как правило, менее развиты, смешиваются часто с практическим описанием экспериментальных ситуаций и поэтому обычно выпадают из сферы методологического анализа естественнонаучной теории. Наиболее рельефно соотношение математической (функциональной) схемы — геометрической кривой, которую описывает маятник в часах, циклоиды, представления физического процесса качания маятника (поточной схемы) и конструкции часов (структурной схемы), прослеживается в теории изохронного качания маятника Христиана Гюйгенса (см. гл. 1, разд. 1.1). По характеристике А. Койре, часы Гюйгенса — это воплощенная физическая теория. Таким образом, в классической технической и физической теориях обнаруживается много общего.

Точно так же, как и в естественной науке, в технических науках можно выделить частные и обобщенные (фундаментальные) теоретические схемы. Первые соответствуют отдельным исследовательским направлениям или областям исследования, вторые — целым научно-техническим дисциплинам или даже семействам таких дисциплин, группирующихся вокруг какой-либо одной базовой технической науки. В последнем случае обобщенная теоретическая схема становится универсальной относительно данного класса технических систем за счет введения процедуры синтеза, позволяющей проецировать эту схему на класс потенциально возможных (гипотетических) технических систем определенного типа.

Становление новой технической теории может происходить несколькими способами. Однако внутридисциплинарный теоретический синтез всегда связан с интеграцией научно-технических знаний внутри дисциплины за счет дифференциации, выделения в ней новых направлений и областей исследования и включает в себя:

- 1) отпочкование новой области знания от базовой математической или естественнонаучной дисциплины;
- 2) ветвление внутри данного семейства научно-технических дисциплин.

В первом случае осуществляется приспособление функциональной (математической), поточной и структурной (экспериментальной) схем для описания и проектирования технических систем определенного типа.

На первом этапе формирования новой научно-технической области знания по этому типу идеальные объекты и даже целые теоретические схемы транслируются из смежных теоретических областей. Например, такую транспортировку исходной теоретической схемы теории механизмов осуществил французский ученый и инженер, основатель Парижской политехнической школы Гаспар Монж, создатель начертательной геометрии. Первоначально именно в начертательной геометрии формулирует он исходную теоретическую схему теории механизмов и машин (см. гл. 1, разд. 1.2). В данном случае исходная теоретическая схема, заимствованная из базовой дисциплины, проходит процесс длительной адаптации путем наложения на определенный эмпирический материал. Этот процесс сопровождается перестройкой исходной модели за счет конструктивного введения новых идеальных объектов и схем.

В условиях формирования новой технической науки процесс адаптации исходной теоретической модели включает в себя попытки описания существующих технических систем с помощью этой модели и выделения частей данных систем, наиболее хорошо представимых в ней. Впоследствии они становятся самостоятельным объектом исследования и проектирования новой научно-технической дисциплины.

Аналогичным образом формируется радиотехническая теория на основе приложения и спецификации теоретических схем электродинамики Фарадея, Максвелла, Герца к решению проблемы передачи сообщений без проводов. Одновременно формируются основные науковедческие характеристики новой научно-технической дисциплины (табл. В.1.).

Итак, становление технических наук связано с приданием инженерному знанию формы, аналогичной науке. В результате сформировались профессиональные общества, подобные научным, были основаны научно-технические журналы, созданы исследовательские лаборатории, а математические теории и экспериментальные методы науки были приспособлены к техническим нуждам. Таким образом, инженеры в XX в. заимствовали из науки не просто результаты научных исследований, но также ее методы и социальные институты. С помощью этих средств они смогли сами генерировать специфические, необходимые для их сообщества знания.

Во втором случае происходит *ветвление* внутри данного семейства научно-технических дисциплин. При этом привлекаются либо новые математические методы и схемы (как в статистической радиотехнике), либо новые естественнонаучные представления (как в квантовой электронике), либо новая технологическая и конструктивная база (как в микроэлектронике).

Таблица В.1

**Этапы формирования научно-технических дисциплин  
по схеме «исследовательское направление — область  
исследования — научная дисциплина»**

<b>Этапы формирования</b>	<b>Наукоед-ческие харак-теристики</b>	<b>Техникоед-ческие харак-теристики</b>	<b>Инженерное образование</b>	<b>Методологи-ческие харак-теристики</b>
1	2	3	4	5
1. Предысто-рия	Отдельные публикации, препринты, отчеты	Совершенство-вание экспери-ментального оборудования и схем экс-перимента	На произ-водстве, в лаборато-риях, переход специалистов из смежных областей	Практическое решение но-вого класса инженер-ных задач
2. Прикладное исследова-тельское на-правление	Формирова-ние массива статей, первые патенты	Изобретатель-ская дея-тельность и опытное производство; техническая система как разновид-ность объекта исследования базовой тео-рии; неболь-шие коллек-тивы исследо-вателей и раз-работчиков	Кафедры и спецкурсы в вузах	Частные теоретиче-ские схемы как результат конкретиза-ции базовой теории
3. Область исследования	Обзоры и рефераты, монографии; регулярные конференции и семинары	Серийное производство, техническая система как особый тип объекта исследова-ния и про-ектирования; формирова-ние профес-сионального сообщества	Факультет и специаль-ность в вузе; проблемная лаборатория	Частные теоретиче-ские схемы как результат обобщения структурных схем техниче-ских систем данного типа

Окончание табл. В.1

1	2	3	4	5
4. Научно-техническая дисциплина	Учебники и несколько монографий, выпуск специального журнала; образование новых исследовательских направлений и областей исследования	Массовое производство качественно нового типа технических систем, необходимость стандартизации и унификации	Подготовка специалистов высшей квалификации, формирование сети лабораторий и кафедр	Обобщенная теоретическая схема и математизированная теория, задание процедур анализа и синтеза
5. Семейство дисциплин	Отпочкование от базовой научно-технической дисциплины новых дисциплин	Экспансия в смежные области	Сеть институтов и вузов	Универсальная теоретическая схема — целостная картина области функционирования технических систем данного типа

Образование новой научно-технической дисциплины по этому способу может происходить и за счет отпочкования новой области исследования от классической технической теории (например, радиолокации от радиотехники). В данном случае в качестве базовой выступает уже не математическая или естественнонаучная, а техническая теория, из которой и транслируются нормы и образцы научного исследования и различные теоретические схемы.

В процессе формирования новых исследовательских направлений, областей исследования и дисциплин внутри данного семейства дисциплин новые теоретические схемы как бы подслаиваются под старые схемы базовой технической теории с одновременной их модификацией и развитием. Примером может служить теоретическая радиолокация, в которой можно выделить три вида взаимосогласующихся теоретических схем, условно называемых нами электротехническими, радиотехническими и радиолокационными (см. гл. 2, разд. 2.2).

С развитием целого ряда классических технических наук в отношении некоторых наиболее распространенных частей технических систем (например, различного рода регуляторов) постепенно выяс-

няются, во-первых, аналогичность их принципа действия независимо от способа реализации и, во-вторых, тождество (и применимость) разных математических описаний данных частей несмотря на разницу в исполнении (на электрической, гидравлической или механической основе). Это стимулирует отвлечение от конкретной формы реализации естественного процесса, протекающего в технической системе, т.е. конкретного способа организации его функционирования, и акцентирует внимание на анализе обобщенной структуры технической системы независимо от деталей специфического конструктивного воплощения. Формируется новый тип теоретического исследования – междисциплинарный (см. гл. 1, разд. 1.4, где описывается формирование теории автоматического регулирования).

Комплексное теоретическое исследование, характерное, например, для системотехники, ориентировано на общенаучные понятия и представления (прежде всего системные и кибернетические), а также универсальные для определенного типа задач средства имитационного моделирования на ЭВМ (об алгоритмических языках имитационного моделирования см. гл. 1, разд. 1.5).

### **3. Современные комплексные научно-технические дисциплины**

Процесс «онаучивания» техники был бы немыслим без научного обучения инженеров и формирования дисциплинарной организации научно-технического знания по образцу дисциплинарного естествознания. Однако к середине XX в. дифференциация в сфере научно-технических дисциплин и инженерной деятельности зашла так далеко, что дальнейшее их развитие становится невозможным без междисциплинарных технических исследований и системной интеграции самой инженерной деятельности. Формируется множество самых различных научно-технических дисциплин и соответствующих им сфер инженерной практики. Наряду с узкими специалистами появляются так называемые универсалисты (рис. В.3). И хотя статус этих универсалистов в системе дисциплинарной организации науки и в структуре специализированной инженерной деятельности до сих пор четко не определен, без них становится просто невозможно не только решение конкретных научных и инженерных задач, но и дальнейшее развитие науки и техники в целом. Сами инженерные задачи становятся комплексными, и при их решении необходимо учитывать самые различные аспекты, которые раньше казались второстепенными, например экологические и социальные аспекты.

В настоящее время научно-технические дисциплины представляют собой широкий спектр от самых абстрактных до весьма специализированных дисциплин, ориентированных на использование знаний и методов не только естественных наук и математики, но и общественных наук, как, например, в инженерно-экономических или инженерно-психологических исследованиях.

За последние десятилетия в сфере научно-технических дисциплин произошли существенные изменения, позволяющие говорить о становлении качественно нового неклассического этапа их развития, который характеризуется новыми формами организации знаний и деятельности. Отличия неклассических научно-технических дисциплин от классических технических наук заключаются в комплексности теоретических исследований, в какой бы форме они ни проводились и каким бы способом они ни формировались. Если в классических технических науках теория строилась под влиянием определенной базовой естественнонаучной дисциплины и именно из нее заимствовались первоначально теоретические средства и образцы научной деятельности, то многие современные научно-технические дисциплины не имеют такой единственной базовой теории, так как ориентированы на решение комплексных научно-технических задач.

В то же время в них разрабатываются новые специфические методы и собственные средства, которых нет ни в одной из синтезируемых дисциплин и которые специально приспособлены для решения данной комплексной научно-технической проблемы. Поэтому если классические технические науки предметно ориентированы на конкретный класс технических систем (механизмов, машин, радиотехнических устройств, радиолокационных станций и др.), то комплексные научно-технические дисциплины являются проблемно-ориентированными на решение конкретного типа комплексных научно-технических задач, хотя объект исследования в них может частично совпадать.

Это разграничение на классические и неклассические научно-технические дисциплины коренится в развитии самой инженерной деятельности и проектирования. В определенных рамках традиционные сферы научного исследования и инженерной практики продолжают функционировать и решать стоящие перед ними конкретные научные проблемы и технические задачи, но очень важно представлять себе, каковы эти рамки и налагаемые ими ограничения.

Многие классические науки, используемые при исследовании новых исследовательских и проектных задач, меняют свой облик, трансформируются под решение этих задач. С этим процессом свя-

зано и осознание проектирующей, программирующей роли науки в целом по отношению к практической деятельности. Одним из наиболее ярких репрезентантов перехода из первого класса такого рода дисциплин во второй является радиолокация, которая, отделившись от радиотехники в новую классическую техническую науку (см. разд. 2.2), на определенном этапе своего развития становится радиолокационной системотехникой (см. гл. 3).

Эта вторая фаза может быть рассмотрена как «революционный» переход от электродинамической картины мира, на которой базировались теоретическая радиотехника и классическая радиолокация, к радикально иным кибернетическим и системным представлениям и методам.

В данной работе на примере радиолокационной науки и техники детально прослеживается, каким образом появляются радикально новые технологии. Причем речь в нашем случае идет не об отдельных изобретениях, открытиях и инновациях, а о новой сфере науки и техники — о возникновении новой научно-технической дисциплины. Однако при этом мы будем концентрироваться главным образом не столько на рассмотрении новых историко-научных фактов, сколько на вскрытии в данном конкретном случае общих социальных и логических механизмов возникновения современных научно-технических дисциплин. Причем мы будем не только рассматривать внешние социальные условия появления научных исследований и проектно-конструкторских разработок, а также промышленных организационных структур в сфере радиолокации (прежде всего в Советском Союзе), но также анализировать внутреннюю логическую структуру теоретической радиолокации с помощью выработанных философией науки методологических средств.

При формировании технической теории по типу *комплексного теоретического исследования*, как правило, первоначально имеет место некоторый достаточно общий конкретно-методологический подход с универсальной сферой применения, которая постепенно специфицируется относительно определенной проблемной области (комплексной научно-технической проблемы). Исходным пунктом в этом случае является широкое научное движение, в результате которого возможно появление новой научно-технической дисциплины. Для решения таких проблем привлекаются в принципе любые теории, знания и методы, над которыми надстраивается слой обобщающих теоретических схем с соответствующими математическими и концептуальными аппаратами, являющимися проблемно-ориентированными. При этом отдельные теоретические средства, методы и дисциплины, включенные в такое комплексное исследование, хотя и соответству-

ющим образом перерабатываются, переосмысляются и испытывают обратное воздействие со стороны новой дисциплины, в то же время продолжают сохранять самостоятельность и развиваются (вне данной комплексной проблемы) обособленно. К данному типу дисциплин относится, например, системотехника.

Для того чтобы лучше понять значение *системотехники* и ее отличие от традиционного научно-технического знания, необходимо перечислить те задачи, которые в ней решаются, а именно:

- подготовка информации для принятия руководством научно-обоснованных решений по управлению процессом создания сложной системы;
- формулировка общей программы разработок как основы для взаимной увязки проектов отдельных подсистем;
- стыковка проектных задач и координация специалистов, решающих эти задачи;
- обеспечение интеграции системы в единое целое;
- обеспечение в процессе разработки сложной системы наилучшего использования ресурсов при одновременном достижении проектных целей возможно более эффективным способом;
- согласование планов частных проектов с общим направлением работы, выявление существующих и прогнозирование будущих потребностей;
- внедрение в практику проектирования последних научных и инженерных достижений.

Подготовка информации для принятия руководством решений в процессе проектирования сложной системы не является сегодня такой тривиальной задачей, как это может показаться на первый взгляд. Напротив, для ее решения необходимо проводить особые исследования и изыскания, ориентируясь на достаточно широкую предметную область и имея в виду все возможные (настоящие и будущие) проекты данной системы. При этом выбор даже общего направления работ оказывается не таким уж простым. Действительно, в каком направлении вести разработки, какие проектные решения предпочесть — решение этих и других подобных задач требует тщательной научной подготовки, поскольку от этого может зависеть успех всего процесса проектирования.

Исправление неверно принятого на ранних стадиях решения требует гораздо больших затрат, чем расходы на содержание специальных системотехнических служб. Отсюда вытекает задача формулировки общей программы разработки, опирающейся на прогноз развития системы. Именно для решения этой задачи необходима информация о возможных будущих ситуациях, ресурсах, научно-технических от-



крытиях и изобретениях, которые могут коренным образом преобразовать систему и протекающие в ней процессы, а также о возможных будущих изменениях социальных ценностей, которые могут оказать существенное влияние на систему и трансформацию ее целей. Такая общая программа разработки необходима, кроме того, для взаимной увязки проектов отдельных подсистем в процессе создания сложной системы. Она позволяет подготовить мощный задел для разработки этих проектов.

Необходимость в системотехнике впервые появилась тогда, когда выяснилось, что отдельные, даже хорошо работающие компоненты, необязательно составляют хорошо функционирующую систему. В сложной системе часто оказывается, что даже если отдельные компоненты удовлетворяют всем необходимым требованиям, система как целое не будет работать. Для того чтобы связать различные частные оптимумы, цели и критерии отдельных специалистов, и нужен инженер-системотехник.

На практике, конечно, стыковка отдельных проектных задач и координация специалистов, решающих эти задачи, может быть решена и кустарным способом — с помощью принятия волевых решений руководителем проекта. Однако для достаточно сложных систем эти решения должны быть подкреплены серьезным обоснованием. Дать такое обоснование сам руководитель не может, так как один человек не в состоянии одинаково хорошо разбираться в вопросах электроники, в экономических проблемах и т. д. Для управления процессом создания системы необходимы ее постоянный диагностический анализ, направленный на выявление резервов и узких мест, а также подготовка решений с целью устранения выявившихся недостатков. А для этого, в свою очередь, каждый руководитель достаточно крупного проекта вынужден держать при себе особый научно-координационный центр — бригаду экспертов-системотехников. Она должна помочь руководству достичь согласия по всей программе работ, включающей разные проекты, на основе периодической оценки всех частных проектов, на какой бы стадии выполнения они ни находились.

Комплексное теоретическое исследование в системотехнике включает в себя ряд одноаспектных и одноплановых теоретических исследований и характеризуется множеством частичных идеальных объектов. Средства и способы исследования выбираются из различных научных дисциплин или разрабатываются специально применительно к каждой конкретной проблеме. В комплексном теоретическом исследовании должны быть учтены все эти частичные представления, частные теоретические схемы. Они должны быть

обобщены и переформулированы в своего рода частные теории систем, а их абстрактные объекты представлены как особые специальные системы, т. е. переведены в системный модус. Эти специальные системы могут быть далее синтезированы в различные (в зависимости от решаемой задачи) комплексные модели сложной технической системы. Пространство всех возможных (в том числе и гипотетических) комплексных системных моделей (вместе с совокупностью специальных систем) и составляет фундаментальную теоретическую схему системотехники, являющуюся, с одной стороны, обобщением частных теоретических схем, используемых в ней теорий, а с другой — конкретизацией системной картины мира, развиваемой в системном подходе и общей теории систем.

Математический аппарат в системотехнике выполняет несколько функций. Он предназначен как для инженерных расчетов, так и для анализа и синтеза сложных систем, точнее их теоретических схем, т. е. различных дедуктивных преобразований абстрактных объектов, что обеспечивает саморазвитие системотехнической теории и позволяет получить новые знания без обращения к инженерной практике. Причем применение математики даже только для инженерных расчетов требует уже определенной идеализации сложной технической системы. В системотехнике используется самый широкий спектр математических дисциплин, и прежде всего теорий массового обслуживания, вероятностей, конечных автоматов, исследования операций и соответствующие разделы вычислительной математики.

В системотехнической теории, как и в любой технической теории, на материале одной и той же сложной технической системы строится несколько оперативных полей, которым соответствуют различные типы теоретических схем, обладающих в ней, однако, рядом существенных особенностей.

В сфере практической системотехнической деятельности решение задачи создания новой системы заключается в сочетании представлений различных научных дисциплин с инженерными представлениями без сведения их к единому теоретическому изображению. Это позволяет отдельному исследователю или разработчику при решении частной системотехнической задачи строить каждый раз заново непохожие друг на друга схемы сложных технических систем. При этом практически невозможно воспроизвести процедуру их построения, поскольку она находится в сфере интуиции проектировщика.

Схемы такого рода фактически представляют собой синкретическое соединение объектных представлений различных теорий (элементов электрических и кинематических схем, структурных схем теории автоматического регулирования и других дисциплин)

и представлений технической системы в инженерной деятельности: элементов разных схем изготовления, внедрения, функционирования и т.д. Способ их соединения зависит от каждой конкретной задачи. В одной общей структурной теоретической схеме, таким образом, присутствуют элементы кинематических, электрических и электронных схем, блок-схем и монтажных схем, на основе которых рассчитываются и собираются механические, электрические и другие блоки.

Существенным недостатком такого способа соединения представлений сложной технической системы является качественная неоднородность полученной теоретической схемы, что обуславливает невозможность имитировать на ней функционирование системы в целом, усложняет инженерные расчеты, проектные решения, разработку технологии, отладку и т.д. Использование синкретических схем фактически не дает решения проблемы целостного описания сложной технической системы в теоретической сфере. Чтобы решить эту задачу, следует представить данную синкретическую схему в виде системы однородных описаний (для разных режимов функционирования).

Основная проблема, стоящая перед теоретической системотехникой, заключается в переходе от синкретического описания сложной инженерной задачи с помощью теоретических средств и представлений самых различных научных дисциплин к однородной абстрактной теоретической схеме. Это необходимо, в свою очередь, для того, чтобы в системотехнике можно было применить соответствующий математический аппарат. Для этого и должен быть выработан способ единообразного описания качественно различных элементов. Именно поэтому в теоретической системотехнике структурные и поточные теоретические схемы принципиально формируются как предельно абстрактные. В классической технической науке они являются гораздо более специализированными и частными, причем в первую очередь это относится к структурным схемам.

Современная техническая теория в отличие от классической ориентируется не на какую-либо одну базовую естественную науку, из которой черпаются естественнонаучные представления, методы и средства математики, а на общенаучные (методологические) представления и понятия (системные, кибернетические и др.) и «универсальные» средства имитационного моделирования на ЭВМ соответственно. Поэтому процесс построения современной технической теории неизбежно ускоряется. Он связан с адаптацией этих уже развитых «универсальных» представлений и схем.

В качестве эмпирического базиса современной технической теории выступает научно-методический слой: прецеденты, рецептурные знания, списочные структуры. *Прецеденты* — это описания, фиксирующие отдельные акты деятельности, которые выступают как образцовые, т.е. как предписания к еще неосуществленной деятельности аналогичного типа. *Рецептурные знания* — это различные методические рекомендации, дизайн-программы, план-карты, типовые расчеты, руководящие стандарты и рабочие инструкции. *Списочные структуры* — это справочники, каталоги, перечни и т.д., фиксирующие знания, относящиеся к объекту исследования и проектирования. Однако все три элемента эмпирического базиса современной технической теории являются не просто готовыми рецептами предстоящей инженерной деятельности, как в традиционной инженерной практике, а одновременно и теоретико-методологической рефлексией, самоопределением современной инженерной деятельности и проектирования.

В отличие от традиционной инженерной деятельности в современных научно-технических дисциплинах рецептурное знание уже не лежит вне теории, а, напротив, вплетено в саму ткань комплексного теоретического исследования. Однако эта ткань не является такой теоретически однородной и четко иерархически структурированной, как в классических естественных и технических науках, напоминая, скорее, лоскутное одеяло, где сшиты вместе разнородные элементы теоретических представлений различных научных дисциплин и рецептурно-технологические схемы практической деятельности. Кроме того, само рецептурно-технологическое описание и предписание к осуществлению исследовательской и проектной деятельности становится особым идеализированным представлением процедур этой деятельности.

Появление технических наук, как показано в данном исследовании, было обусловлено развитием машинного производства и требовавшимся для него формированием специалистов — носителей научно-технического образования, т.е. инженеров, а также необходимостью усиления их теоретической подготовки. И именно технические науки становятся важным связующим звеном между теоретическим естественнонаучным знанием, инженерной деятельностью и производством. Как показали проведенные нами исследования, исходным звеном этой цепи являются фундаментальные знания, которые закладывают теоретические основы принципиально новых видов техники и технологии. Поэтому при сосредоточении внимания на технологическом приложении науки было бы большой ошибкой недооценивать необходимость развития фундаментальных

исследований, даже если это продиктовано соображениями практической целесообразности и экономии затрат на науку. В конечном счете такая недооценка ведет к подрыву самих основ продуктивного использования науки в интересах ускорения научно-технического прогресса. Исходя из этого, следует говорить о широком развитии теоретических исследований не только в естественных, но и в технических науках, а также о возрастании роли фундаментальных, теоретических исследований с точки зрения потребностей ускорения научно-технического прогресса. Без них никакое серьезное продвижение вперед в практической сфере просто невозможно. Это доказывает пример современной нанотехнологии, рассмотрению которой посвящается не только последний раздел последней главы, но и практически в каждом разделе уделяется особое место.

Резюмируем общие черты теоретических исследований, проводимых в современных комплексных (неклассических) научно-технических дисциплинах, и основные их особенности, отличающие эти дисциплины от классических технических наук.

1. Прежде всего — это *комплексность* теоретических исследований в них, в какой бы форме они ни проводились и каким бы способом они ни формировались. Развиваясь нестандартным путем, они отличаются от классических технических наук тем, что в последних теория строилась под влиянием определенной базовой естественнонаучной дисциплины и именно из нее заимствовались первоначально теоретические средства и образцы научной деятельности. Во многих современных научно-технических дисциплинах такой единственной базовой теории нет, так как они ориентированы на решение комплексных научно-технических задач, требующих участия представителей многих научных дисциплин (математических, технических, естественных и даже общественных наук), группирующихся относительно единой проблемной области. В то же время в них разрабатываются новые специфические методы и собственные средства, которых нет ни в одной из синтезируемых дисциплин и которые специально приспособлены для решения данной комплексной научно-технической проблемы.

2. Однако, хотя на первый взгляд главной задачей здесь является синтез разнородных знаний, теоретических представлений и методов, в основе такого синтеза лежит сложная задача координации, согласования, управления и организации различных деятельности, направленных на решение комплексной научно-технической проблемы. Поэтому объектом комплексного исследования в современных научно-технических дисциплинах будет уже не традиционный объект, а качественно новый *деятельностный объект*.

Объект исследования и проектирования системотехники состоит из двух частей: во-первых, объектом исследования и организации в ней становится деятельность, направленная на создание и обеспечение функционирования сложной технической системы, и, во-вторых, сама данная система, будучи создана, не только включается в человеческую деятельность как удовлетворяющая определенную потребность, но и замещает собой эту деятельность.

3. Ситуация, сложившаяся в современных научно-технических дисциплинах, во многом напоминает изменения в экспериментально-измерительной деятельности, характерные для неклассической физики и связанные с так называемым парадоксом неизмеримости. В классической физике предполагается, что измерительный прибор не влияет на состояние измеряемого объекта, с которым он взаимодействует, и всегда можно подобрать такие условия эксперимента, что этим возмущением можно пренебречь либо учесть его и внести соответствующие поправки в результаты измерений. Однако для микросистем достичь этого не удастся. Поэтому, во-первых, результаты уже проведенного измерения не всегда с точностью воспроизводимы (их можно только предсказать с определенной степенью вероятности) и, во-вторых, возмущающим действием экспериментально-измерительной деятельности нельзя пренебречь. Объект измерения не может рассматриваться отдельно от этой деятельности: он не является себе тождественным до, во время и после эксперимента.

Аналогичная ситуация наблюдается и в современной инженерной деятельности, направленной на создание сложных человеко-машинных систем и имеющей следующие особенности:

- Ключевым в ней становится эволюционное системное проектирование, т.е. проектирование не прекращается тогда, когда система уже создана, а поскольку система может устареть еще до того, как она создана, в проекте должны быть предусмотрены ее возможные будущие модификации.

- В проекте сложной человеко-машинной системы невозможно заранее учесть все параметры и особенности ее функционирования (их можно только предсказать с определенной степенью вероятности), поэтому в современной инженерной деятельности требуется особая деятельность внедрения, направленная на корректировку проектных решений в процессе отладки системы и в соответствии с изменениями социальных, природных, экономических, технических и других условий, поскольку окружающая среда включается в проектируемую систему в качестве особого элемента.

- Деятельность использования и деятельность создания и совершенствования таких систем становятся как бы слитыми, неразрывно связанными с самими этими системами.

Таким образом, *возмущающим воздействием исследования и проектирования* здесь уже *невозможно пренебречь*, его необходимо специально учитывать, поскольку и объект проектирования (исследования), и проектировщик (исследователь) имеют однопорядковую деятельностьную сущность.

4. Подобно тому, как в неклассической физике все большее значение придается методу математической гипотезы (минуя промежуточные интерпретации) и идеализированным экспериментам (без воспроизведения их на всех промежуточных стадиях в виде реальных экспериментов), в современных научно-технических дисциплинах определяющую роль начинают играть проектирование и *имитационное моделирование на ЭВМ*, позволяющие заранее, в форме идеализированного (машинного) эксперимента, проанализировать и рассчитать различные варианты возможного будущего функционирования сложной системы.

5. Аналогию между неклассическими естественнонаучными и научно-техническими дисциплинами можно провести еще и по той роли, которую играет в них научная картина мира. Современные неклассические научно-технические дисциплины, включая в себя сложную совокупность различных типов знания, методов и опираясь на множество разных дисциплин, используют их для решения специфических комплексных научно-технических проблем, не решаемых ни в одной из этих дисциплин в отдельности. Поэтому первым условием эффективной организации теоретического исследования в них является необходимость реконструкции той единой действительности, в которой возможно соотнесение всех частичных подходов и особое целостное видение объекта исследования (и проектирования). Причем поскольку эти дисциплины имеют дело с множеством теоретических представлений, выполняющих функцию частных теоретических схем по отношению к комплексному теоретическому исследованию, формирование неклассической технической теории начинается сразу с этапа разработки обобщенной теоретической схемы. А так как такой базовой теории, из которой можно было бы осуществить ее транспортировку, как правило, нет, она транслируется из методологической сферы (конечно, с последующей модификацией и конкретизацией). Эту функцию по отношению к современным научно-техническим дисциплинам выполняют чаще всего системный подход и общая теория систем, имеющие общенаучный статус.

Таким образом, в настоящее время сформировался целый блок научно-технических дисциплин, имеющих общую *системную ориентацию*, задающую относительно них особую плоскость объективации искусственно создаваемых сложных систем. В такой фунда-

ментальной теоретической схеме задается специфическое видение объекта исследования и проектирования. Кроме того, системная картина мира (или системная онтология) выполняет функцию методологического ориентира (по отношению к различным современным научно-техническим дисциплинам) в выборе теоретических средств и методов решения комплексных научно-технических задач, дает возможность транслировать их из смежных дисциплин или методологической сферы. Она является также методологическим ориентиром для конструирования сложных идеальных объектов современных научно-технических дисциплин, их последующего имитационного моделирования и интерпретации, т. е. позволяет экстраполировать накопленный в данной дисциплине опыт на будущие проектные ситуации. В макросистемотехнике она несколько иная, чем в наносистемотехнике, системном анализе или эргономике, но все же системная фундаментальная теоретическая схема.

6. Одной из наиболее важных с точки зрения философии особенностей современных научно-технических дисциплин является их явно выраженная *методологическая ориентация*. В рамках этих дисциплин осуществляются конкретно-методологические исследования (часто с выходом на практику через методические разработки и проектирование). Более того, методологические знания вплетены в само тело технической теории. Иногда они даже замещают теорию (т. е. методология в современных научно-технических дисциплинах может выступать в функции теории) в виду неразработанности общих теоретических средств, особенно на первых этапах развития этих дисциплин, поскольку не существует образцов или прецедентов такого комплексного исследования. Трансляция же их из других сфер возможна только с помощью предварительного анализа. Это значительно поднимает роль и ответственность методологии как науки по отношению к данным конкретно-методологическим исследованиям.

7. Отметим еще одну важную черту, общую для всех комплексных научно-технических дисциплин. Поскольку они имеют дело с деятельностью объектом исследования и проектирования, то возникает *проблема совмещения системных и деятельностных представлений*. В системотехнике это выражается в необходимости совмещения структурной и алгоритмической схем одной и той же системы в едином описании. Этим обусловлена и специфика идеальных объектов второго уровня (идеальные объекты первого уровня относятся к комплексируемым в данной дисциплине отдельным исследованиям); в них неразрывно переплетены объектные и деятельностные представления, объект как бы сплавлен с деятельностью его проектирования, совершенствования и использования.



8. В отличие от классических технических наук, которые предметно ориентированы на определенный класс технических систем (механизмов, машин, радиотехнических устройств, радиолокационных станций и т. д.), комплексные научно-технические дисциплины *проблемно ориентированы* на решение комплексных научно-технических задач определенного типа, хотя объект исследования в них может частично совпадать.

#### **4. Технонаука как новая форма современной научно-технической деятельности**

Формируемая в начале XXI столетия так называемая технонаука представляет собой симбиоз естественных и технических наук, поэтому те методологические различия, которые были получены в результате анализа тех и других, весьма хорошо ложатся на новый для философии науки эмпирический материал.

Даже фундаментальные исследования в естествознании становятся все более проблемно- и проектно-ориентированными на решение конкретных научно-технических задач, что делает их весьма сходными с технической наукой и находит свое выражение в обозначении этого нового этапа развития науки — технонауки, наиболее ярким представителем которой является нанотехнология. Нанотехнология признана ключевой научной сферой не только потому, что она ведет к изменению всего современного научно-технического ландшафта, но прежде всего потому, что общество в ближайшем будущем ожидает от нее позитивных экономических, экологических и социальных результатов. В связи с процессами сращивания науки и техники, например в нанотехнологии, возникает целый ряд новых, по сути дела, философско-методологических проблем, настоятельно требующих своего специального рассмотрения.

В нанотехнологии, например, исследование часто инициируется некоторой инженерной задачей, а само оно имеет проектную форму и является фактически проблемно ориентированным исследованием. В качестве примера можно привести исследование химической наносборки транзисторов из углеродных нанотрубок с целью получения более сложной наноструктуры. Главной проблемой здесь оказывается обеспечение соединения отдельных нанотрубок в наносхему и визуализация данной наносхемы для измерения входных и передаточных характеристик полученного нанотранзистора [29, р. 77–94].

Таким образом, исследовательская проблема детерминирована инженерной задачей, поскольку транзистор — важный компонент электронной промышленности, а в данном случае одновременно и объект исследования. Для достижения большей его миниатюризации, что диктуется фактически социальным заказом, требуется разрабатывать новые технологии и материалы, среди которых одними из наиболее перспективных считаются транзисторы, изготовленные из углеродных нанотрубок. Такие транзисторы изготавливаются разными способами. Однако возникает серьезная не только инженерная, но и научная проблема: как присоединить нанотранзистор из нанотрубок, сконструированных и работающих на наноуровне, к микросхемам, в которые они включаются в качестве основных элементов, а также соединить нанотрубки между собой. Сложной инженерной задачей является создание электродов, соединяющих нанообъект с микрообъектом — контактной площадкой традиционной микросхемы.

Соединение углеродных нанотрубок между собой в определенную функционирующую наносхему — также исключительно сложная инженерная задача. Ее можно решить химическим путем с помощью «самосборки», поскольку на наноуровне невозможно оперировать с макро- и даже микроинструментами: необходим инструмент, вынуждающий нанотрубки самоорганизовываться в заданные пространственные структуры. Чтобы соединить между собой углеродные нанотрубки, их химически функционализируют, т. е. искусственным путем им придают определенную функциональную направленность, а также некоторые свойства, превращающие их из функционально нейтральных в функционально определенные, например электропроводящие. С этой целью в их стенки искусственно вводят атомы или дефекты. Для соединения нанотрубок используются радикалы, которые начинают действовать как связывающая молекула. Сканирующий силовой микроскоп в данном наноэксперименте выступает одновременно средством и научного исследования, и изготовления мостика между нанотрубками, а также между нанотрубками и электродами.

В сущности, в технотехнике научное исследование всегда сопровождается компьютерной симуляцией, и то, что мы видим на экране дисплея, уже опосредовано определенной теорией, на основе которой построена данная измерительная система, и ее математическими представлениями, «защитами» в программе имитационного моделирования. Технотехника пытается понять и использовать принципы, лежащие в основе природных процессов.

В нанотехнонауке, с одной стороны, как в классическом естествознании, на основе математических представлений и экспериментальных данных строятся объяснительные схемы природных явлений и формулируются предсказания хода определенного типа естественных процессов, а с другой стороны, как в технических науках, конструируются не только проекты новых экспериментальных ситуаций, но и структурные схемы новых, неизвестных в природе и технике наносистем. Поэтому ее часто называют наносистемотехникой (см. разд. 3.4).

То же самое, что мы сказали о роли теоретического исследования в современной науке и технике, приложимо к связи научного исследования с философской рефлексией, без которой развитие науки становится просто невозможным. Бурный прогресс нанонауки и нанотехнологии ставит перед учеными по-новому многие старые философские проблемы и выдвигает на первый план целый ряд новых методологических, социальных, когнитивных и других проблем, осмысление которых требует высокого философского уровня, т. е. должен проводиться с участием профессионалов в этой области. Однако и сама философия науки не может существовать без активного взаимодействия с развивающейся наукой. Поэтому философы, особенно философы науки и техники, обязаны в тесной кооперации и диалоге с учеными-специалистами осмысливать вновь возникающие философские проблемы в научно-технической сфере.

В сущности, можно выделить две стратегии развития философской науки. Согласно одной из них философия самодостаточна и должна развиваться на основе своей собственной внутренней логики, не обращая внимания на мир кажимости, или, иначе говоря, мир обыденного сознания. Согласно второй стратегии философия, в особенности философия науки и техники, не может плодотворно развиваться, не обращаясь к постоянному, часто мучительному осознанию реальных исторических процессов, в частности истории науки и техники. Поэтому она должна не только постоянно возвращаться к переосознанию предшествующих философских концепций, но и анализировать особенными, только ей присущими методологическими средствами весь реальный ход исторического развития. Именно анализировать, а не перечислять в виде подтверждающих или опровергающих примеров. Такая стратегия философско-методологического исследования принята в данной работе.

## Литература

1. Философия техники в ФРГ. М.: Прогресс, 1989.
2. Ленк Х. Размышления о современной технике. М.: Аспект Пресс, 1996.
3. Tondl L. Technisches Denken und Schlussfolgern. Neun Kapitel einer Philosophie der Technik. Berlin: Edition Sigma, 2003.
4. Böhme G. Models for Development of Science // Science. Technology and Society. A Cross-Disciplinary Perspective. L., 1977.
5. Böhme G. Daale van den, Kron W. The «Scientification» of Technology // Dynamics of Science and Technology. Dordrecht, Boston, 1978.
6. Rumpf H. Technik zwischen Wissenschaft und Praxis. Düsseldorf, 1981.
7. Rapp F. Technik und Naturwissenschaft // Interdisziplinäre Technikforschung. Berlin, 1981.
8. Rapp F. Technological and Scientific Knowledge // International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science, 5th. L. (Kanada) Ontario, 1975.
9. Rapp F. Philosophy and Natural Science – a Methodological Investigation // Contributions to a Philosophy of Technology. Dordrecht, Boston, 1974.
10. Rapp F. Analytische Technikphilosophie. Freiberg, München: Alber, 1978.
11. Janich P. Physics – Natural Science or Technology // Dynamics of Science and Technology. Dordrecht, Boston, 1978.
12. Lenk H., Ropohl G. Towards an Interdisciplinary and Pragmatic Philosophy of Technology: Technology as a Focus for Interdisciplinary Reflection and systems Research // Research in Philosophy of Technology. Vol. 2. Greenwich, Conn.: 1979.
13. Geschichte der Technikwissenschaften / G. Buchheim, R. Sonnemann (Hg.). Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag, 1990.
14. Чешев В.В. Техническое знание как объект методологического анализа. Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
15. Стёпин В.С. Теоретическое знание. М.: Прогресс-Традиция, 2000.
16. Technological Development and Science in the Industrial Age. New Perspective on the Science/Technology Relationship / ed. by P. Kroes and M. Bakker. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1992.
17. Philosophy of Technology and Engineering Sciences / ed. by A. Meijers (Handbook of the Philosophy of Science, Vol. 9). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier B.V., 2009.
18. Channell D.F. The Emergence of Engineering Sciences: An Historical Analysis // Philosophy of Technology and Engineering Sciences / ed. by A. Meijers (Handbook of the Philosophy of Science, Vol. 9). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier B.V., 2009.
19. Latour B. Science in Action. Harward University Prass, 1987.
20. Печёнкин А.А. Леонид Исаакович Мандельштам. Исследование, преподавание и остальная жизнь. М.: Логос, 2010.

21. Вебер М. Избранные произведения. Ч. II. «Объективность» социально-научного и социально-политического познания.
22. Лакатос И. Доказательства и опровержения. М.: Наука, 1967.
23. Toulmin S., Goodfield J. The Fabric of Heavens. London: Hutchison & Co., 1961.
24. Стёпин В.С., Томильчик Л.М. Практическая природа познания и методологические проблемы современной физики. Минск, 1970.
25. Стёпин В.С. Становление научной теории. Минск: Изд-во БГУ, 1976.
26. Маркс К., Энгельс Ф. Соч. Т. 20.
27. Carnap R. Der Raum. Ein Betrag zur Wissenschaftslehre. Berlin: Verlag von Reuther & Reichard, 1922.
28. Roth S., Kern D. Self-Assembly of carbon Nanotube Transistors // Nanotechnology – Physics, Chemistry, and Biology of Functional Nanostructures. Results of the first research programme Kompetenznetz «Funktionelle Nanostrukturen» (Competence Network on Functional Nanostructures). Th. Schimmel et al. Stuttgart: Landesstiftung Baden-Württemberg, 2008.

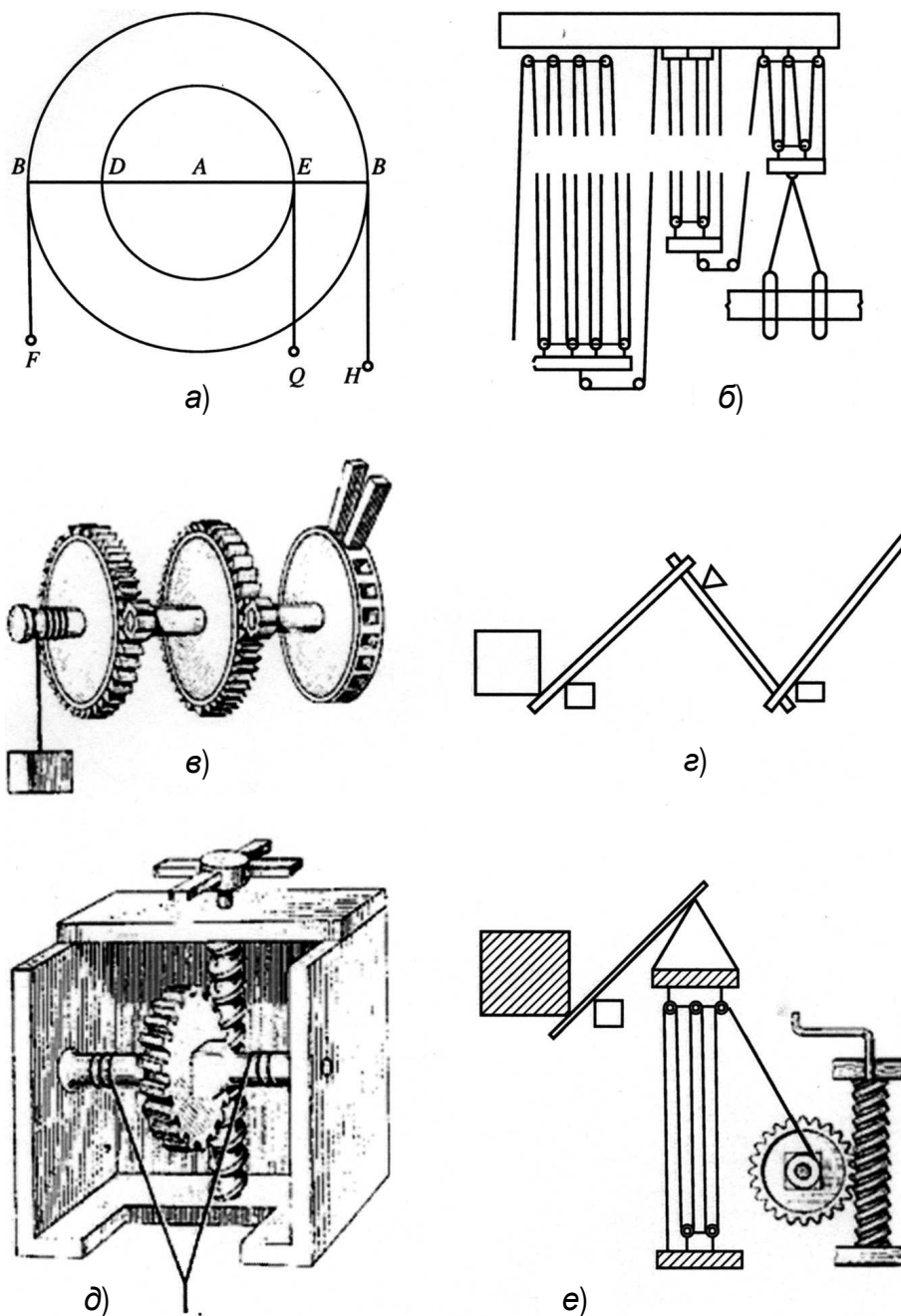
## Глава 1

# ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ И МАТЕМАТИКА

### 1.1. Предыстория: соотношение техники и математики до возникновения технических наук

Идея теоретического исследования техники с целью ее усовершенствования восходит еще к временам поздней античности. Архимед был первым, кто с помощью математики пытался решать технические задачи. И хотя известные нам работы Архимеда посвящены анализу математических проблем, его исследования закона рычага и состояния равновесия заложили основы механики, которая, однако, не принадлежала к естествознанию. Естественные движения и изменения рассматривались, в соответствии с учением Аристотеля, в качестве предмета исследования физики, не связанной тогда с математикой, механика же изучала простые машины (наклонная плоскость, блок, винт, рычаг, полиспаст) и составленные из них механизмы с использованием математических методов.

Герон Александрийский, будучи в большей степени механиком, чем математиком, демонстрировал в своих работах скорее практическое применение математических теорем и эмпирических правил для техники повседневной жизни. В своей книге «Механика» он не только перечисляет все пять так называемых «простых машин» (ворот, рычаг, полиспаст, клин и винт), но и описывает процесс их изготовления. Общий принцип их работы Герон видит в круге: «мы можем рассматривать линию  $BE$  как весы, которые могут вращаться около точки подвеса  $A$ . Это доказал Архимед в своей книге “О равновесии”» [1, с. 68] (рис. 1.1). Таким образом, опираясь на извлечения из теории Архимеда и применяя геометрические приемы, Герон следует принципам геометрической статики и с этой точки зрения объясняет принцип действия «простых машин» [2, с. 105–107]. Он рассматривает два типа комбинаций «простых машин» (рис. 1.1.): однородных (сочетания по несколько блоков, воротов и рычагов) и неоднородных (сочетания ворот — винт, блок — рычаг, ворот — винт). Сопровождая описания этих комбинаций числовыми примерами, он на каждом из них демонстрирует «золотое правило» механики [2, с. 106, 107].



**Рис. 1.1.** Два типа комбинаций «простых машин»: однородных (a–c) и неоднородных (d–e)

Астрономия вплоть до Галилея и Ньютона не была связана с исследованием естественных, физических процессов, поскольку движения небесных тел, относящихся к надлунному миру, были прямым воплощением, а точнее сказать, существованием геометрических фигур и законов. И для Галилея Вселенная — это книга, написанная «на языке математики, и знаки ее — треугольники, круги и другие геометрические фигуры, без которых человек не смог бы понять в ней ни единого слова; без них он был бы обречен блуждать в потемках по лабиринту» [3, с. 41]. Показав с помощью построенного им телеско-

па и доказав методами логического рассуждения схожесть надлунных и подлунных тел и процессов, Галилей открыл для математики путь к исследованию естественных, физических процессов.

В то же время и Вселенная открывается исследователю в виде созданного самим Господом огромного механизма, а математика — в качестве самого совершенного инструмента для ее описания. Речь идет фактически о небесной механике, в рамках которой со времен античности разрабатывались математические методы геокинематического моделирования небесных тел. Теперь они благодаря Галилею могли быть применены к описанию как физических процессов (движений физических тел) подлунного мира, так и движения частей машин.

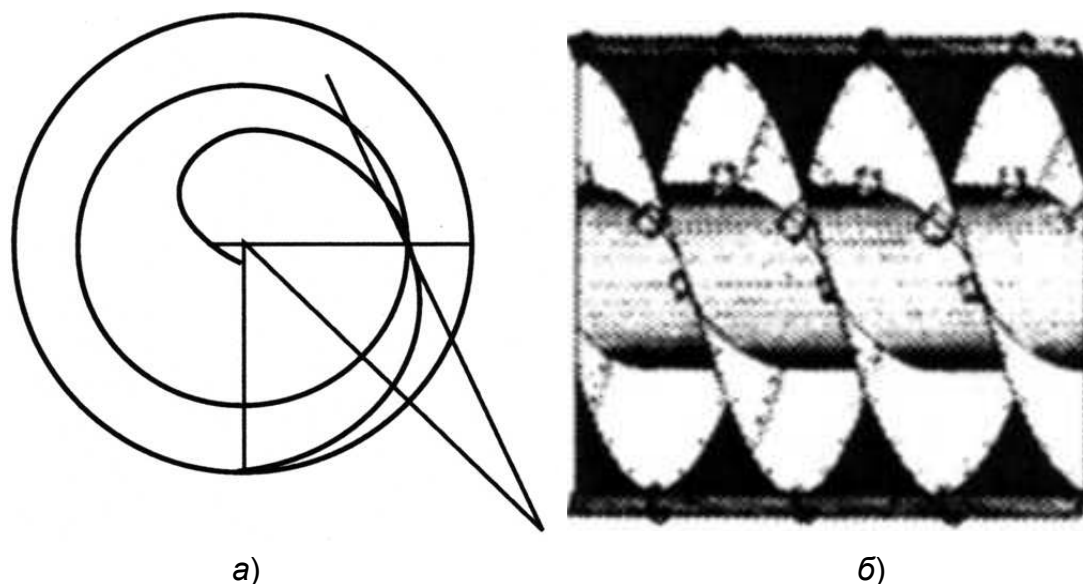
Галилей рассматривает Землю как «большое колесо, которое движется с огромной скоростью». Он замещает Землю колесом, а колесо-Землю геометрической фигурой и проводит геометрическое доказательство в соответствии с постулатами и нормами евклидовой геометрии. При этом он сравнивает на геометрическом чертеже вращение двух колес (маленького и большого), а затем переходит от технической модели к описанию природного явления: «можно считать, что вращение Земли способно отбрасывать камни не в большей мере, чем любое иное малое колесо, вращающееся столь медленно, что в двадцать четыре часа оно совершит всего лишь один оборот» [4, с. 294, 317].

Однако практически вплоть до середины XVII в. термин «механика» применялся лишь к узкому кругу проблем прикладной механики и элементарной теории пяти «простых машин». На развитие механики XVII в. оказало влияние древнегреческое представление о непрерывном движении. Галилей писал об архимедовой теории сложения криволинейного и прямолинейного движений, как о непосредственном истоке своей теории движения: «Я не предполагаю ничего иного, кроме определения движения, я хочу трактовать и рассматривать это явление в подражание Архимеду в его “Спиральных линиях”» [5, с. 82].

«Трактат о спиралях интересен тем, что он представляет собой одно из немногих сочинений древнегреческой математики (но не единственное), где широко используется идея движения...». Примером такой кривой, образуемой движением точки по линии, и является «архимедова спираль, которую можно определить как траекторию точки, участвующей в двух движениях — прямолинейном и равномерном (относительном), по прямой, равномерно вращающейся вокруг одного из своих концов (переносном)». Архимед пишет: «Если какая-нибудь прямая в плоскости, равномерно вращаясь вокруг



одного своего конца, удерживаемого неподвижным, вернется опять в исходное положение, и одновременно по вращающейся прямой равномерно движется некоторая точка, выходя из неподвижного конца, то эта точка на упомянутой плоскости опишет спираль» (рис. 1.2) [6, с. 220, 518].

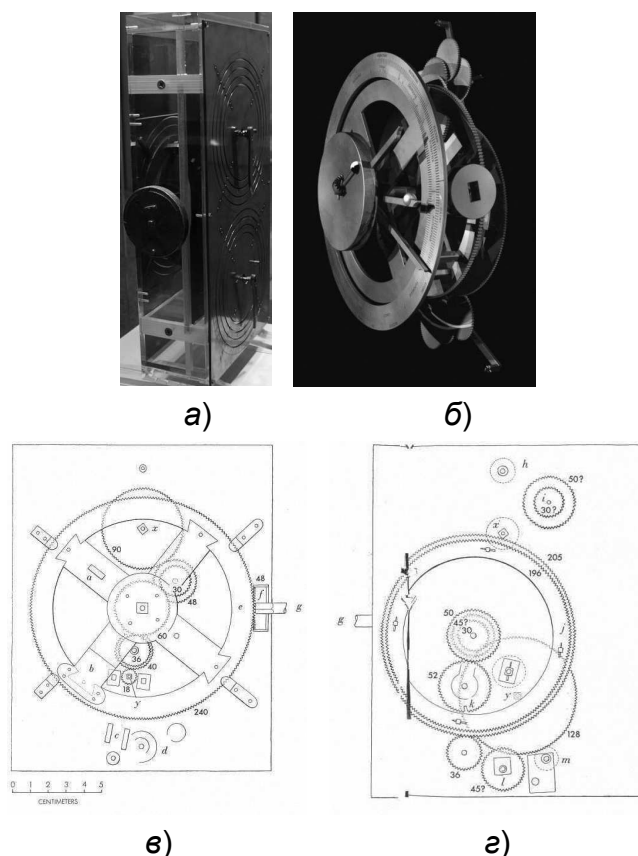


**Рис. 1.2.** Архимедова спираль (а) и винт Архимеда (б)

Еще одной сферой успешного применения математики к механике становится область создания научных инструментов, и в первую очередь часов для точного измерения времени, которое настоятельно требовалось, например, для уточнения астрономических наблюдений. Часы использовались как научный инструмент в самых различных областях науки, в первую очередь в астрономии, и стали образцовым объектом изучения в теоретической механике. Однако эти часы были громоздки и несовершенны.

Длительное время считалось, что первые действительно точные часы сконструировал на основе данных науки голландский ученый Гюйгенс. Сравнительно недавно это мнение было опровергнуто интересной находкой, которой стал так называемый антикитёрский механизм — механическое устройство, обнаруженное в 1900 г. на затонувшем древнем судне недалеко от греческого острова Антикитера. Этот механизм — образец применения античной математики к механике, которая тогда рассматривалась исключительно как техника, а не раздел естествознания. Создание механизма датируется приблизительно 100 г. до н. э. (по другим данным — 150 г. до н. э.). Механизм состоит из большого числа бронзовых шестеренок, заключенных в деревянном корпусе. Показания на циферблатах со стрелками использовались для расчета движения небесных тел.

Историк науки Дерек де Солла Прайс впервые определил, что антикитёрский механизм является уникальным античным механическим вычислительным устройством, провел его рентгеновское исследование и построил схему механизма. Раньше считалось, что такой механизм, создание которого приписывалось Архимеду, — это легенда. Например, известно, что Цицерон восторгался «сферами» Архимеда, представлявшими собой бронзовый планетарий для демонстрации движения Солнца, Луны и планет. По словам Цицерона, еще Фалес милетский и Эвдокс построили такие же небесные сферы. «Теория эпициклов прекрасно согласуется с антикитёрским механизмом, что дает основания полагать, что чистая теория и прикладная механика вдохновляли друг друга». Реконструкция этого механизма (рис. 1.3) показала, что его центральное колесо имеет 232 зубца и воспроизводит эллиптическую орбиту Луны [7].



**Рис. 1.3.** Реконструкция антикитёрского механизма: внешний вид макета (а), вид внутреннего строения (б)<sup>1</sup>, структура механизма —лицевая (в) и задняя (г)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> См.: <http://www.antikythera-mechanism.gr/project/overview> и <http://www.youtube.com/watch?v=UpLcnAIPVRA>, <http://www.youtube.com/watch?v=F1LbXSbxEJk&feature=related>

<sup>2</sup> <http://www.math.uni-muenster.de/8010/Professoren/Lippe/lehre/skripte/geschichte/pdf/Kap2.pdf>

Полная схема устройства была построена только в 1971 г. и содержала 32 шестерни. Система шестерен с передаточным соотношением 254:19 использовалась для моделирования движения Солнца и Луны относительно неподвижных звезд (рис. 1.4). Соотношение выбрано на основе метонова цикла: 254 сидерических месяца (периода обращения Луны относительно неподвижных звезд) с большой точностью составляют 19 тропических лет или  $254 - 19 = 233$  синодических месяца (периода смен фаз Луны). Положение Солнца и Луны выводилось на циферблат с одной из сторон механизма. С помощью дифференциальной передачи вычислялась *разность* положений Солнца и Луны, соответствующая фазам Луны. Она выводилась на другой циферблат. Британский часовщик Дж. Глив построил работающую копию механизма по этой схеме.

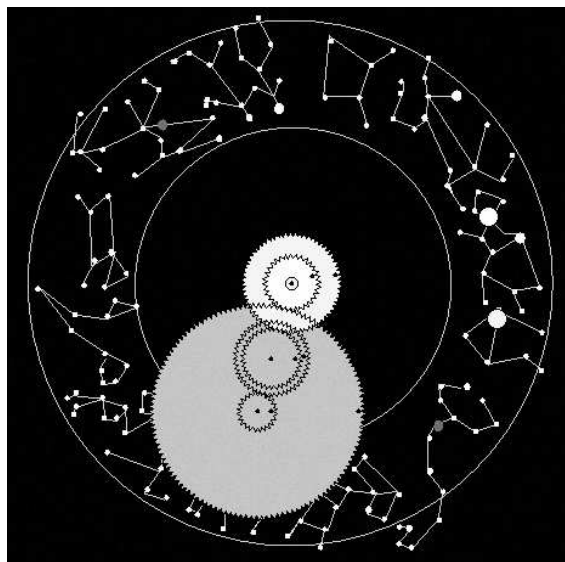


Рис. 1.4. Моделирование движения Солнца по эклиптике<sup>1</sup>

На основании 82 фрагментов механизма было подтверждено, что устройство может выполнять операции сложения, вычитания и деления. Удалось показать, что механизм был способен учитывать эллиптическую орбиту движения Луны, напоминающую математическую функцию кривой синусоиды, — для этого использовалась шестеренка со смещенным центром вращения. Число бронзовых шестерен в реконструированной модели было увеличено до 37. Вторая его сторона использовалась для предсказания солнечных и лунных затмений [8, р. 35].

Другие устройства подобной сложности неизвестны в эллинистической культуре. В нем использовалась дифференциальная передача, которая, как ранее считалось, открыта не раньше XVI в., а уро-

<sup>1</sup> <http://www.math.sunysb.edu/~tony/whatsnew/column/antikytheraI-0400/kyth1.html>

вень миниатюризации и сложность сопоставимы с механическими часами XVIII в.<sup>1</sup> Движение механизма предсказывало движение пяти известных в период античности планет Солнечной системы. По мнению исследователей, этот механизм аналогичен современным механическим астрономическим часам и представляет собой своего рода аналоговый компьютер. Конечно, трудно сказать, насколько точно современная реконструкция соответствует античному механизму, но она дает представление о соотношении математики и техники в античности. Американский часовщик Стив Крамер, также построивший такой механизм, смог с его помощью предсказать в 1994 г. солнечное затмение с точностью в 14 минут [9].

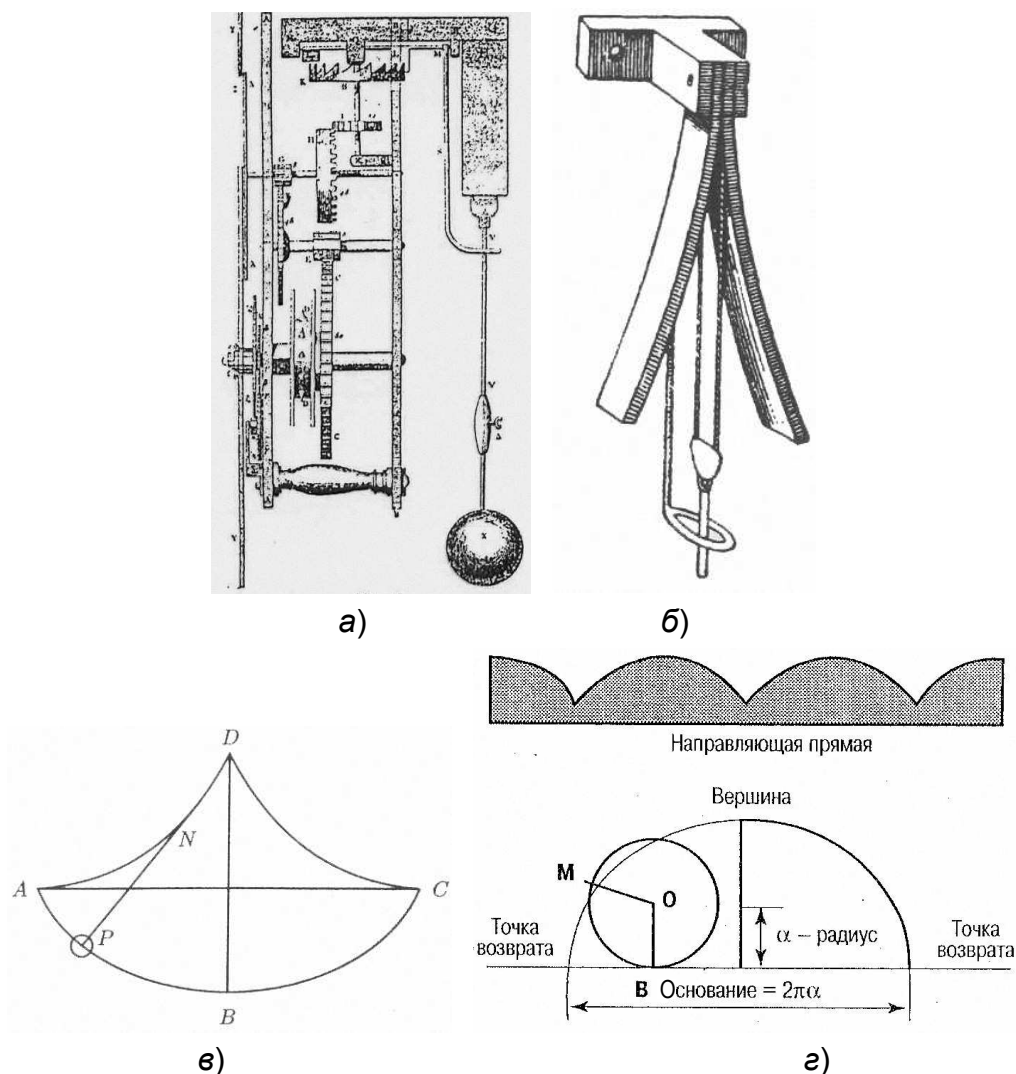
Классическим примером реализации науки в технике в Новое время явилась, однако, конструкция астрономических часов голландского ученого Х. Гюйгенса. Гюйгенс реализовал в механизме часов свойство изохронности маятника. Инженерная задача, которую предстояло ему решить, заключалась в необходимости сконструировать часы с изохронным качанием маятника, т. е. подчиняющимся определенному физическому соотношению, а именно: время падения такого маятника от какой-либо точки пути до самой его низкой точки не должно зависеть от высоты падения. Анализируя движение тела, удовлетворяющее этому математическому соотношению, он приходит к выводу, что маятник будет двигаться изохронно, если он будет падать по циклоиде, обращенной вершиной вниз. Новую конструкцию часов он разработал на основе теории маятника Галилея и известной еще античным математикам геометрической фигуры — циклоиды (рис. 1.5). «Галилеевский закон маятника вполне точен лишь для случая тяжелой точки, подвешенной на невесомой линии и совершающей бесконечно малые колебания... однако... при качании тела точки его в силу различного расстояния от точки привеса должны иметь различные периоды колебаний; отсюда возникал вопрос о том, *каким образом общая скорость целого тела складывается из этих различных скоростей отдельных точек*» [10, с. 10].

Таким образом, речь идет уже не о колебании точечного тела, что является в данном случае неправомерной математической абстракцией физического маятника, а о колебании сложного тела, состоящего из конфигурации грузов. Циклоида — это бесконечная математическая кривая, которая образуется точкой на окружности производящего круга, катящегося неограниченно долго по направляющей прямой, и состоит из бесконечного ряда арок. Открыв далее, «что развертка циклоиды есть также циклоида», Гюйгенс подвесил

---

<sup>1</sup> Ориентировочные размеры механизма в сборе 33 × 18 × 10 см.

маятник на нитке и поместил по обеим ее сторонам циклоидально изогнутые полосы так, «чтобы при качании нить с обеих сторон прилегала к кривым поверхностям. Тогда маятник действительно описывал циклоиду». «Простой маятник нельзя считать надежным и равномерным измерителем времени, — пишет Гюйгенс. — Однако при помощи геометрии я нашел новый, до сих пор неизвестный, способ подвешивания маятников... ход часов стал чрезвычайно правильным и надежным» [10, с. 9, 12–33, 79, 91]. Часы в это время представляли собой наиболее совершенную машину, а часовое дело было весьма развито в Европе. Они легко раскладывались на отдельные детали, доступные для изготовления разными рабочими.



**Рис. 1.5.** Часы Гюйгенса: а — оригинальный чертеж часового механизма, сделанный самим Гюйгенсом; б — конструкция часов (циклоидально изогнутые полосы) [11, s. 3, 4, 7, 15]; в — геометрическое пояснение обеспечения циклоидального качания маятника с помощью циклоидально изогнутых направляющих; г — общий вид циклоиды и изображение одной арки с производящим кругом [12]

Гюйгенс реализовал в массовом механизме свойство изохронности маятника. Он ввел в свои часы целый ряд усовершенствований: применил впервые пружинный завод и маятник в качестве регулятора равномерности их хода. В его часах в максимальной степени использовались элементы конструкции уже существовавших механизмов, чтобы облегчить возможность быстрой переделки имевшихся часов в маятниковые. Первый экземпляр часов по проекту самого Гюйгенса изготовил голландский часовщик Костер, а Гюйгенс получил патент на свое изобретение 16 июня 1657 г. В 1658 г. вышла книга Гюйгенса «Маятниковые часы» [11] с описанием изобретения и рекомендацией по его использованию для точного измерения времени.

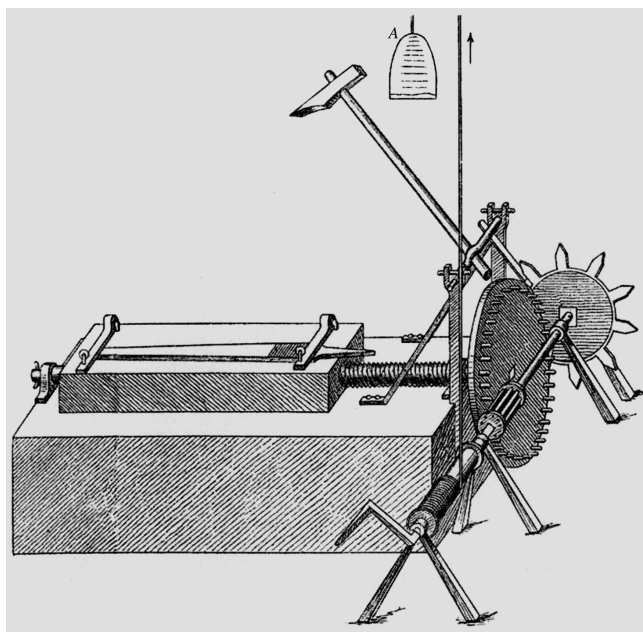
Замещая техническую задачу физической проблемой, а затем математическим представлением, Гюйгенс переходит к решению математической задачи: по какой кривой должна двигаться точка, чтобы период ее колебаний не зависел от амплитуды, т. е. (в терминах физической проблемы, эквивалентной этой задаче) чтобы время качания маятника не зависело от величины его размаха. На этом примере можно видеть, как в новой экспериментальной науке ученые усваивали методы работы ремесленников, постепенно совершенствуя их и поднимая на недостижимую высоту.

Ученые создавали образцы для подражания ремесленникам-техникам и тем самым тиражировали новый стиль научно-инженерного мышления и деятельности в их среду. Но одновременно техническое отношение к экспериментальной деятельности укоренялось и в среде ученых. «Так как ремесленники удовольствуются в работе лишь малой степенью точности, то образовалось мнение, что механика тем отличается от геометрии, что все вполне точное принадлежит геометрии, менее точное относится к механике. Но погрешности заключаются не в самом ремесле или искусстве, а принадлежат исполнителю работы: кто работает с меньшей точностью, тот — худший механик, а если бы кто-нибудь смог исполнить изделие с совершеннейшей точностью, тот был бы наилучшим из всех механиков... В этом смысле *рациональная механика* (курсив мой. — Прим. В.Г.) есть учение о движениях, производимых какими бы то ни было силами, и о силах, требуемых для производства каких бы то ни было движений, точно изложенное и доказанное» [13, с. 2].

Таким образом, идея плодотворности и необходимости соединения математики и механики, по крайней мере, с мировоззренческой точки зрения, к XVIII столетию стала очевидной. Иное дело, как она реализовывалась в сфере инженерной практики.

Уже сформировавшаяся в эпоху Возрождения профессия сначала военного, а затем и гражданского инженера к началу XVIII в. становится достаточно престижной при дворах князей и монархов. Инженер и начальник строительства именно руководят инженерными работами и рабочими; хотя они и зарабатывают на хлеб своим трудом и знаниями, но труд этот в большей степени интеллектуальный, а знания — многочисленные научные познания.

Руководитель строительства должен уметь не только начертить на бумаге эскиз замышляемой им постройки, как хороший художник, но и произвести измерения на местности с помощью различных измерительных приборов, уметь производить расчеты, разбираться в истории, чтобы выбрать подходящие для постройки статуи и колонны, в медицине, чтобы установить постройку в здоровом месте, а также в правовых вопросах, чтобы не пришлось, например, затрачивать огромные средства, прорезая в новом месте окно из-за тяжбы с соседями. Работающий в сотрудничестве с ним военный инженер должен иметь познания в геометрии и искусстве землемерия, а также строительной и военной науке, чтобы воспроизвести сначала в эскизе на бумаге, например схему механизма для изготовления напильников, сделанную Леонардо да Винчи (рис. 1.6).



**Рис. 1.6.** Машина для изготовления напильников, спроектированная Леонардо да Винчи в 1505 г. [14, s. 107, 108]

Кроме того, инженер должен уметь возвести на местности надежные фортификационные сооружения, а также сопутствующие им хозяйственные постройки и орудия защиты с достаточным количеством боеприпасов, водоснабжением и всем, что необходимо в случае длительной осады. В военное время такой инженер зани-

мается инженерным обеспечением армии: руководит разбивкой лагеря и созданием его укреплений, содержанием и обслуживанием артиллерии, а также подготовкой инженерных сооружений для осады и штурма неприятельских фортификационных сооружений. Деятельность такого инженера сравнивается с ролью Архимеда при осаде римлянами Сиракуз, конструировавшего различного рода механизмы, машины и укрепления, что сделало оборону его родного города неуязвимой для врага [15, s. 56–62].

Итак, понятие «инженер» означало первоначально лишь деятельность техников, которые имели или строго военные задачи (артиллерия, строительство крепостей) или такие государственные задачи, как землемерие, строительство дорог и каналов.

Постройка машин, особенно водяных и ветряных мельниц, вместе с механизмами для передачи силы и приводимыми ею в движение аппаратами и орудиями, вменялась в обязанность строителям мельниц. При этом речь шла об умелых практиках, получивших свои эмпирические знания главным образом в качестве наследства от отца к сыну и известных под именем «художник-мастер», «мельничный врач» [16, s. 19] или «механик». Начиная со Средних веков их значение в обществе возрастает. Они перестают быть просто забавными игрушками или служащими ритуальным целям механизмами, призванными удивить публику ухищрениями, демонстрирующими силу науки или божества (как у Гомера кузница бога Гермеса или механизм для открывания дверей храма у Герона Александрийского), а становятся полезными обществу машинами. Освобождение монахов от тяжелого ручного труда, рассматриваемого более не как обязанность рабов («говорящих орудий»), а как служение Господу, становится благим делом.

Французский историк Ле Гофф приводит следующее описание монахом из Клерво в XIII в. работы промышленного приспособления с помощью энергии речного течения, которое звучит как гимн во славу машин: «О мой Бог! Какое утешение даруешь Ты своим бедным слугам, дабы их не угнетала великая печаль! Как облегчаешь Ты муки детей своих, пребывающих в раскаянии, и как избавляешь от лишнего труда! Сколько бы лошадей надрывалось, сколько бы людей утомляли свои руки в работах, которые делает для нас без всякого труда с нашей стороны эта столь милостивая река, которой мы обязаны и нашей одеждой, и нашим пропитанием» [17, с. 207–208].

Такие мельницы, приводимые в движение водой, ветром или мускульной силой животных и людей, не только для изготовления муки, но и для резки камней и дерева, начинают повсеместно использоваться в Средневековье (рис. 1.7).



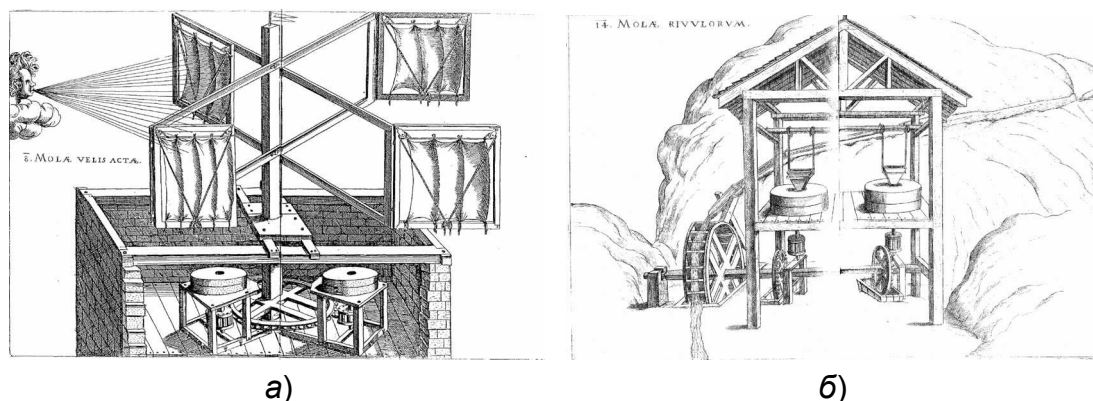


Рис. 1.7. Проекты ветряной (а) и водяной (б) мельниц [18]

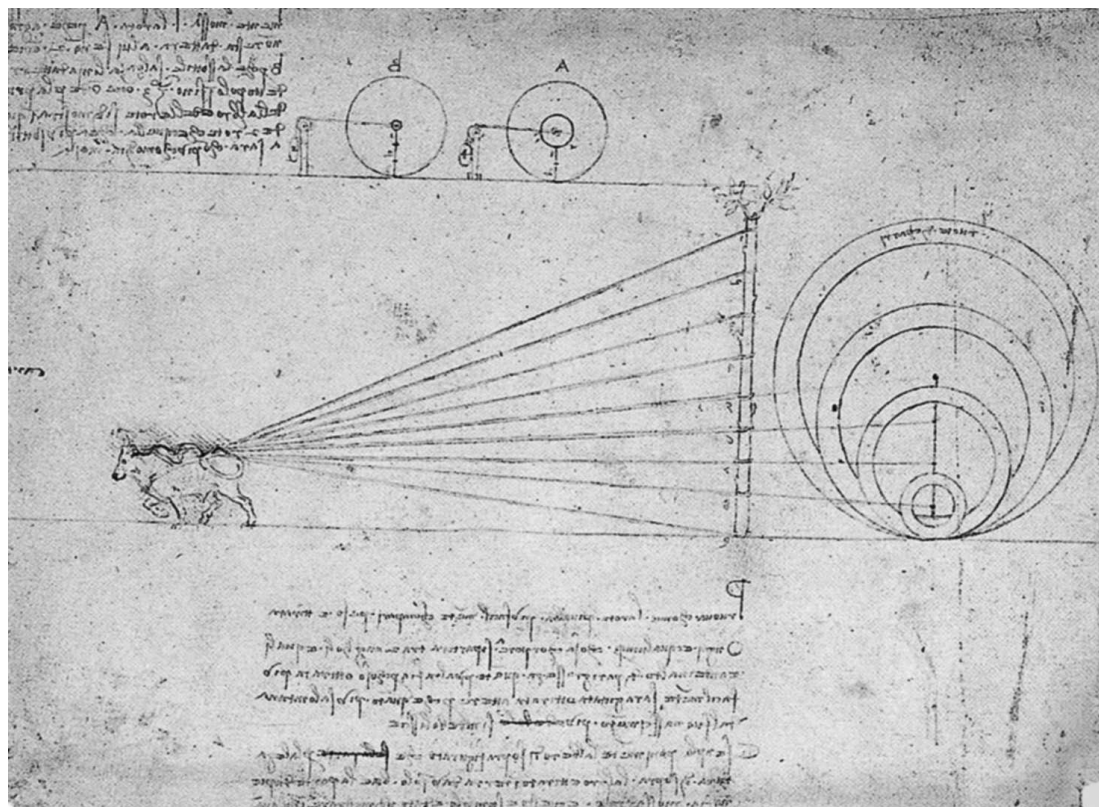
Само мироздание представляется как сотворенный Великим Зодчим механизм, действующий по божественным законам.

Ренессансные художники, инженеры, ученые еще более усиливают отношение к природе как к машине: «Машину мироздания можно назвать великой и благородной живописью, рукою господ и природы нарисованной» (Бенедетто Варки) [19, с. 397] или «наш мир есть машина, и при том машина величайшая, эффективнейшая, прочнейшая, прекраснейшая» (Леонардо да Винчи) [20, с. 9].

В эпоху Возрождения формируется новое отношение к ученому, инженеру, художнику, который занимает теперь место творца, подражающего творчеству божественного создателя самого бытия, природы и равного в искусстве самому Богу, поскольку ум «истинного художника может породить идею совершенного творения, а руки его в силах воплотить сию идею» (Винченцо Данти) [19, с. 454]. И природа, и техника рассматривается ими с точки зрения геометрии, но геометрии особого рода — теории перспективы и трансформационной геометрии. Например, Леонардо да Винчи пытается применить геометрические пропорции для исследования силы тяги (рис. 1.8).

Учитель Леонардо — Вероккио («ремесленник по происхождению, образованию и всей своей творческой физиономии») — усиленно и серьезно занимался математикой и обучал ей своих учеников [21, с. 315]. Он формулирует трансформационную геометрию для выражения мира геометрических объектов с помощью природных объектов, например для решения проблемы трансформации прямоугольной формы в цилиндрическую, используя комок глины для физической иллюстрации трансформации одной геометрической фигуры в другую. Такого рода геометрия предполагалась им и для представления трансмутации металлов, что является задачей алхимической, но в то же самое время и технической. «Интерес Леонардо к этим визуальным мостам между природой и геометрией, между абстрактным и конкретным, заслуживает рассмотрения как одно из его наиболее важных достижений...

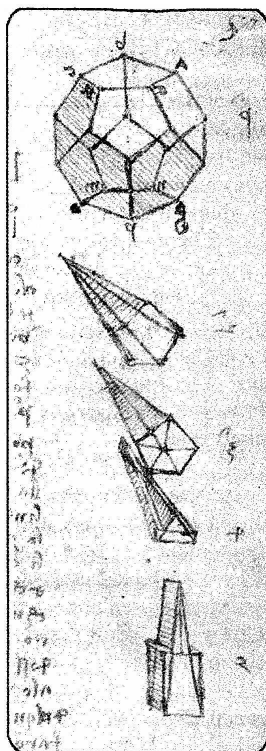
Со времен античности математики обсуждали правильные платоновские тела абстрактно. Леонардо берет эти формы и выражает их трехмерно с таким правдоподобием, на которое никто из его современников не был способен» [23, р. 189–190]. Он анализирует, таким образом, проблему перехода от геометрических фигур к природным объектам.



**Рис. 1.8.** Леонардо да Винчи: сила быка обратно пропорциональна диаметру колеса перемещаемого транспортного средства [22, р. 44]

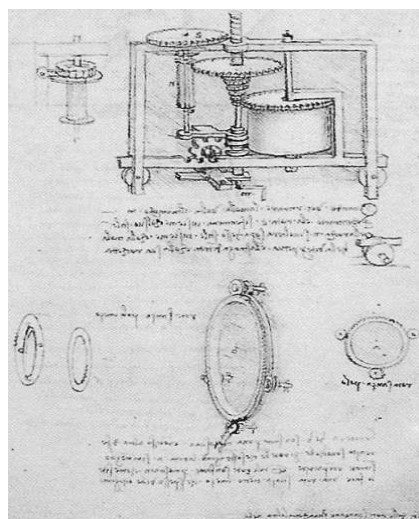
«Леонардо явился первооткрывателем метода, который в последующие века станет общепринятым в науке. Суть этого метода заключается в том, что сначала с помощью упрощенных моделей разрабатывается математическая схема, которая затем применяется к реальным исследуемым явлениям. В наиболее сложном примере Леонардо преобразует додекаэдр — правильное тело с двенадцатью пятиугольными гранями — в куб равного объема. Он делает это в четыре ясно иллюстрированных шага» (рис. 1.9) [24, с. 283].

Природный объект отображается сначала в виде физической или визуальной модели, которыми может быть скульптура, картина, макет и эскиз дома и т. д. Затем эта модель преобразуется в визуальный образ в соответствии с законами перспективы и, наконец, в геометрическую схему или фигуру. Для Леонардо как инженера важен, однако, и обратный переход: от визуальной модели к реальному техническому устройству.

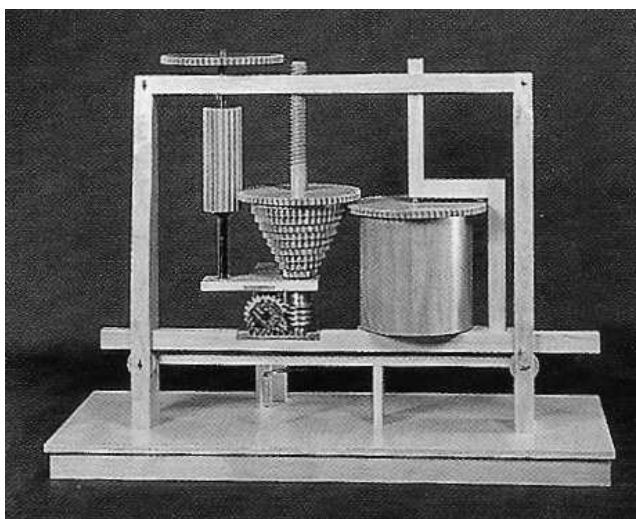


**Рис. 1.9.** Леонардо да Винчи: преобразование додекаэдра в куб. Кодекс Форстера

Чертеж, рисунок, набросок — основа не только живописи, но и архитектуры и скульптуры, в нем воплощается замысел художника и инженера, в том числе в виде машины (рис. 1.10).



а)



б)

**Рис. 1.10.** Механизм, приводимый в действие пружиной:  
а — эскиз Леонардо да Винчи (Мадридский кодекс. 1495 г.);  
б — действующая модель механизма, выполненная в наше время по этому эскизу (Флоренция. Музей истории науки. 1987 г.)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> См.: *Pedretti C. Leonardo. The machines. Florence: Giunti, 1999. P. 60.*

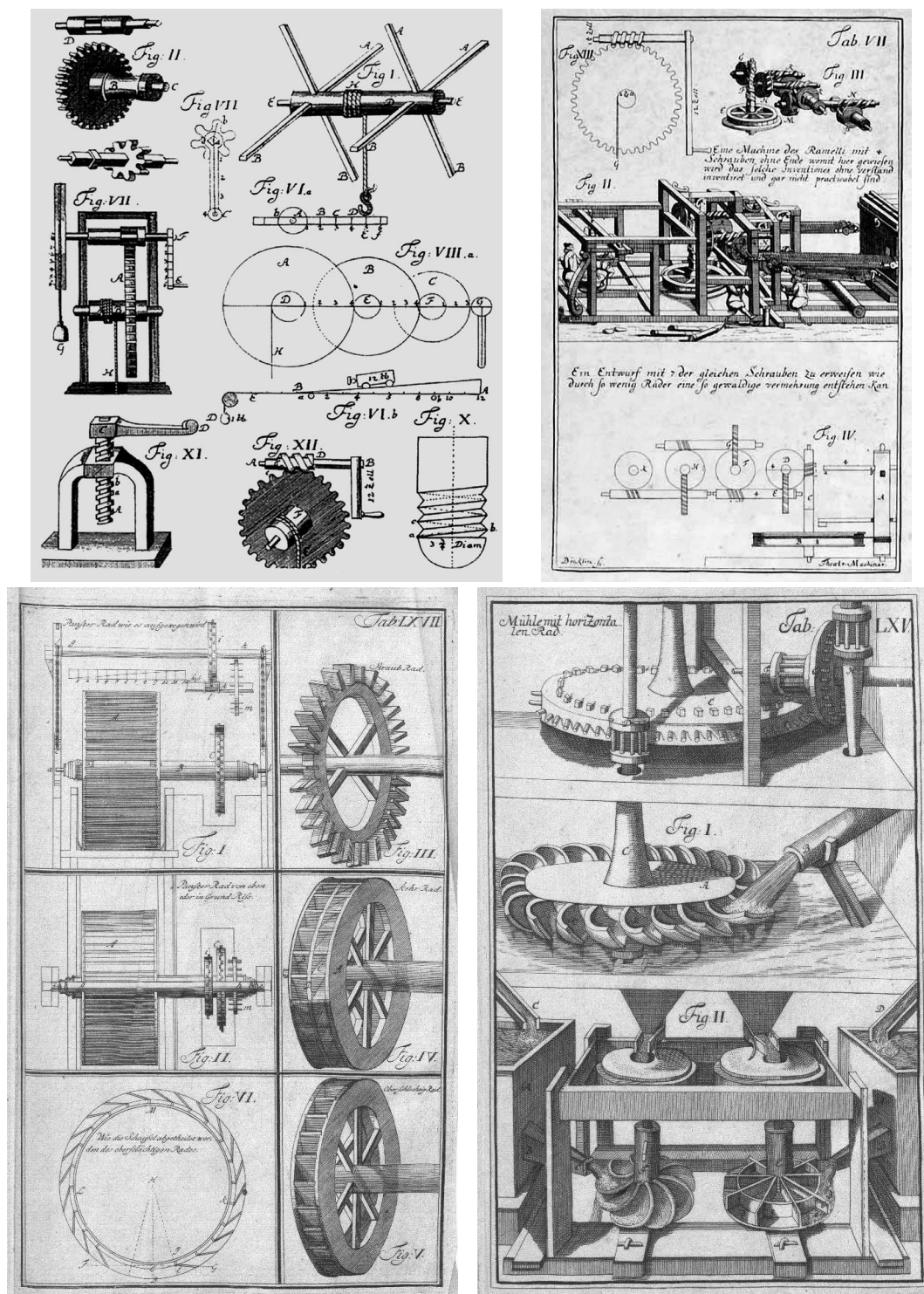
Живопись, рисунок являются основой всех механических искусств: «ведь ни один кузнец или ремесленник не сможет сделать даже ложки без рисунка» [19, с. 446, 491]. Так и современное инженерное проектирование не обходится без эскиза, чертежа, схемы. Такого рода схематизация лежит и в основе не только научного эксперимента, но и математизации естествознания. Таким образом, визуализация объектов природы художниками Возрождения закладывает не только основы современного инженерного конструирования — работа в плоскости чертежа, схемы составляет основу графической проектной документации, но и геометрического описания природных процессов в науке Нового времени.

Для художников, инженеров, ученых эпохи Возрождения характерно стремление не канонизировать недостижимые образцы, как это было в Средние века, не делать их достижением узкого круга мастеров данного ремесленного (в том числе и ученого) цеха, а усовершенствовать существующие образцы, улучшить их, внести в них свое «я» и сделать всеобщим достоянием, обнародовать, «опубликовать» их под своим именем, которое эти открытия и изобретения могут прославить. Это уже не нечто экстраординарное в культуре Возрождения, созданное лишь для демонстрации силы науки. Теперь архимедовы хитрые машины стали создаваться многими и повсеместно. Им не просто удивляются, они теперь нужны, труд по их созданию оплачивается и есть их многочисленные заказчики и потребители.

К механикам причислялись те люди, которые, особенно в городах-резиденциях или университетских городах, изготавливали астрономические, математические и физические аппараты и инструменты. Такие люди должны были обладать определенными математическими и естественнонаучными познаниями. Одним из них был, например, инженер-механик Якоб Леопольд (1674—1727), опубликовавший с 1724 по 1739 г. десять книг эмпирического описания уже существовавших к тому времени машин с попыткой их систематизации (последние тома вышли уже после его смерти).

Леопольд проводит различие между механиком-теоретиком, который знаком лишь с фундаментом, механиком-практиком, действительно знакомым с машинами и знающим, как их создавать, и механиком-эмпириком, к которым относятся ремесленники, создающие и эксплуатирующие машины. Самого себя он относит к механикам-практикам. И действительно, Леопольд более всего занимался точной механикой, созданием научных измерительных инструментов. В своем «Театре машин» он собрал всевозможные известные в то время механизмы, машины, мельницы, элементы машин и орудия для их изготовления (или им самим изобретенные, или им улучшенные,

или просто ему известные). Одни из них выполнены в виде рисунков с использованием открытой в эпоху Возрождения параллельной проекции, другие — как чисто технические чертежи (рис. 1.11).



**Рис. 1.11.** Примеры изображений различных машин для поднятия или перемещения тяжестей<sup>1</sup>

<sup>1</sup> См.: Leopold J. Teatri Machinarii, oder Schau-Platz der Heb-Zeuge oder Maschinen eine Last vorzubringen und zu erheben. Leipzig, 1725.

О важности такой описательно-систематизирующей работы свидетельствует тот факт, что для многих изобретателей этот каталог служил отправной точкой для их инженерной работы. Изобретатель паровой машины Джеймс Уатт изучил немецкий язык только для того, чтобы суметь ознакомиться с изданием «Театр машин» Якоба Леопольда. Следует, однако, отметить, что подробный труд Леопольда был не единственным в ряду различных «театров мельниц» того времени, своеобразным венцом такого рода технической литературы. В качестве примера можно привести «Machina Nova» Фаусто Веранцио (1551–1617) в конце XVI – начале XVII в. в Венеции. В книге даны не столько описания существующих машин, сколько наброски идей, подобные техническим изобретениям Леонардо да Винчи. К новым проектам можно отнести арочный мост на бронзовых опорах, железный цепной мост и ветряную мельницу с лопаточным венцом (см рис. 1.7)<sup>1</sup>. Эти эскизы не всегда описывают уже реализованные машины, но они проектные, т.е. в принципе воспроизводимы по этим описаниям, как, например, эскизы разнообразных механизмов Леонардо да Винчи, реализованные в виде действующих моделей лишь в наше время в музеях.

К более поздним таким описаниям машин и механизмов можно отнести энциклопедию Дидро, вышедшую в свет в 1762–1777 гг. и включившую в себя 35 томов со сведениями из самых различных областей науки и искусства. Наряду с так называемыми свободными искусствами важное место в энциклопедии отводится прикладным или механическим искусствам, включая технику, которые не только явно демонстрируют свою полезность, но и особую «философию»: они «обеспечивают людям то господство над природой, которое восхваляют прекрасные искусства. Господство, которое реализуется через комбинирование практики вместе с опытом и теории вместе с размышлением» [25, s. XVI].

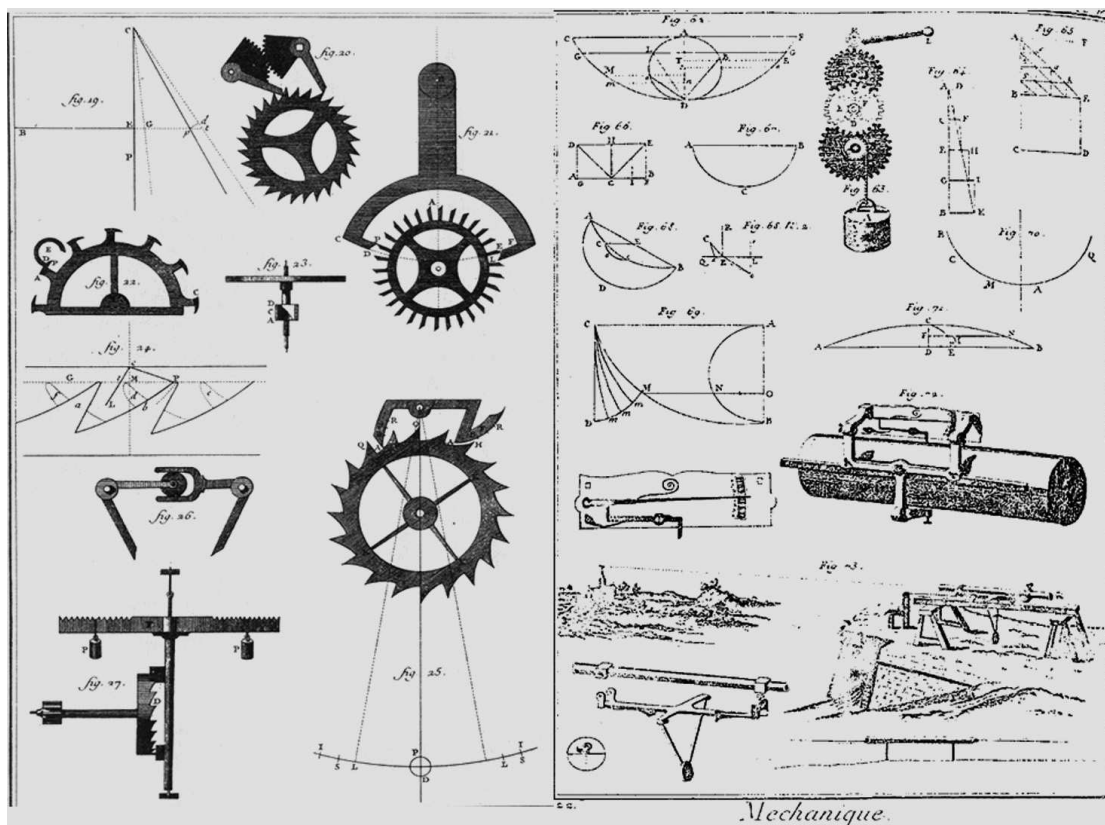
Не рассматривая подробно содержание этой энциклопедии, отметим лишь, что в ней разделы механических искусств представлены непропорционально: наиболее детализованная информация содержится в разделе, посвященном искусству создания часовых механизмов, остальные же разделы представлены весьма поверхностно и бегло. Однако само их наличие в такого рода всеобъемлющей энциклопедии показывает огромный интерес, который вызывали тогда разнообразные машины и механизмы (рис.1.12).

В 1794 г. на базе коллекции известного механика Вокансона была даже организована Консерватория искусств и ремесел, в технический музей которой были переданы также машины, хранившиеся

---

<sup>1</sup> См.: *Veranzio F.* Erfindungen von einst. Mit einer Einführung von Ernst H. Berninger. Dortmund: Harenberg, 1982 (Original: «Machinae novae», 1615).

во Французской академии наук, и из других коллекций. «По уставу в консерватории должны были храниться модели, чертежи и описания всех машин, применяемых во Франции, образцы изделий промышленности и т.д.» [26, с. 40].



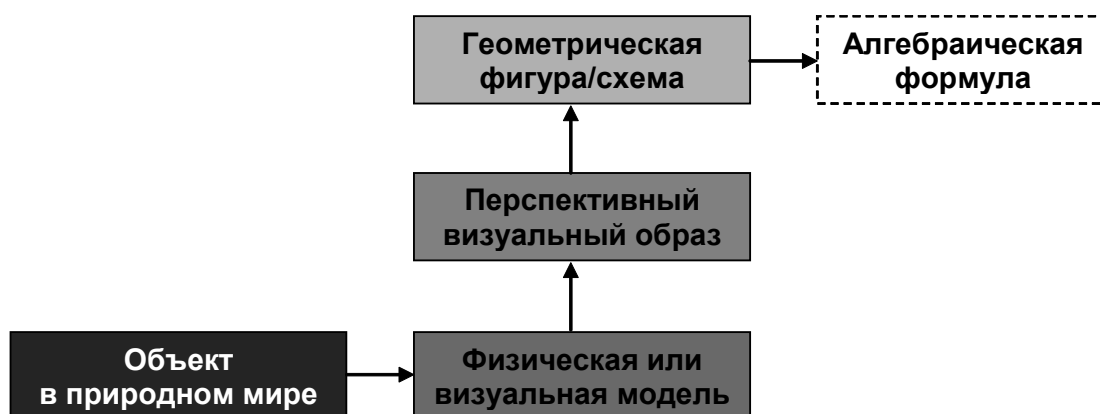
**Рис. 1.12.** Схематическое изображение механизмов во Французской энциклопедии [27, s. 948, 1024]

Таким образом, разработка разнообразных машин (подъемных, паровых, прядильных, ткацких, мельниц, часов, станков и т.п.) к концу XVIII в. становится самой развитой областью инженерной деятельности. Реально существующие и замышляемые механизмы и машины становятся предметом описания и предварительного исследования, которое, однако, основывалось первоначально на теории «простых машин», предназначенных в основном для передачи действия сил (подъема и перемещения тяжестей — рычаг, ворот, наклонная плоскость и др.). Чтобы применить ее в инженерной деятельности, необходимо было так схематизировать сложные машины, чтобы их части можно было представить в виде сочетания нескольких «простых машин» — идеальных объектов, с которыми были связаны типовые расчеты. Но многочисленные машины, построенные к этому времени, не укладывались в такого рода теоретическую схему, основанную на изображении передачи сил. В ин-



женерной практике все более требовалось реализовать передачу движения с изменением его характера, направления, скорости. Это было обусловлено особенностями машинного производства, где множество станков должны были приводиться в движение одной машиной-двигателем, например паровой машиной. Идеальные объекты теории «простых машин» не отвечали запросам практики, но для проведения инженерных расчетов, без которых невозможно создание «сложных машин», требовалась определенная схематизация проектируемой технической системы — машины. Дебаты теперь ведутся не о том, должна ли техника развиваться вместе с математикой или без нее, а о том, какие математические методы должны в ней применяться и каким специфическим образом. В то же время практики ревниво относились к попыткам применения математики к решению инженерных задач. Да и математика еще не была достаточно специфицирована для такого применения.

Художники, инженеры и ученые эпохи Возрождения уже ставили вопрос не только о математическом описании природы, но и о конструировании изображения (рис. 1.13).



**Рис. 1.13.** Геометризация визуального представления по Леонардо да Винчи<sup>1</sup>

Природный объект отображается сначала в виде физической или визуальной модели, которой может быть скульптура, картина, макет и эскиз дома и т. д., затем эта модель преобразуется в визуальный образ в соответствии с законами перспективы и, наконец, в геометрическую схему или фигуру. Последнее, важное для математизированной науки преобразование геометрической схемы в алгебраическую формулу Леонардо да Винчи не рассматривает вообще.

<sup>1</sup> См.: *Veltmann K.H.* Visualisation and Perspective // *Leonardo e l'Eta della Ragione* a cura di Eurico Bellone e Paolo Rossi. Milano: Scienza, 1982. P. 188—189.



Живопись для художников эпохи Возрождения — это не простое копирование природы, а конструирование совершенного изображения: если такового нет в природе, художник составляет его из различных существующих в природе вещей, как, например, изображение совершенного человека. Для конструирования визуального образа на основе теории перспективы у художников эпохи Возрождения была даже создана особая «машина»<sup>1</sup>. Именно в этом смысле надо понимать высказывание Леонардо: «искусство должно подражать природе». Не в смысле копирования, а в смысле воссоздания «в искусственных построениях, где существуют свои законы» [19, с. 397, 454, 446, 491, 539]. Здесь уже виден шаг к математическому описанию не только природных объектов, но и артефактов, в том числе машин. Наиболее очевидно это в архитектуре, где постройка соборов сопровождалась геометрическими расчетами пропорций проекта храма и его воплощением в виде деревянной модели. Поэтому неудивительно утверждение Леонардо, что «механика есть рай математических наук».

Однако это — не абстрактная математика, отвлеченная от действительности. Альберти в связи с этим отмечает: «Я пишу об этих вещах не как математик, а как живописец; математики измеряют форму вещей одним умом, отрешившись от всякой материи». Поэтому он дает материальные, зримые образы математических объектов: поверхность — это «крайняя часть тел, которая познается не в своей глубине, а только лишь в своей длине и ширине, а также в своих качествах... Плоская поверхность будет такая, что если положить на нее прямую линейку, она во всех частях будет к ней прилегать. С такой поверхностью очень сходна поверхность воды». И далее: «поверхности приобретают различия в зависимости от перемены места и света» [28].

Аналогичным образом и Дюрер разрабатывает теорию перспективы как особую геометрическую науку, применяя ее для изготовления своих картин и гравюр (Дюрер создал специальный аппарат для конструирования перспективного изображения и применял его для создания гравюры на меди «Меланхолия» [28]).

Таким образом, здесь налицо «математизация природы», характерная для современного математического естествознания со времен Галилея и Декарта в отличие от качественной физики — «философии

---

<sup>1</sup> Аппарат Дюрера для конструирования перспективного изображения (см.: *Harnest J. Albrecht Dürer und Perspektive* // Stridel P. Dührer. Augsburg: Bechtermünz Verlag, 1996).

природы» Аристотеля. Механика же не была «в противоположность сегодняшнему пониманию естественной наукой... Механика изучала простые машины, с помощью которых можно было перехитрить природу: наклонная плоскость, рычаг, винт, блок и полиспаг, а также собранные из них механические устройства. В противоположность физике механика связана с применением математических методов» [29, с. 40—41]. Галилей был хорошо знаком с учением о перспективе итальянских живописцев. Именно геометризация природы, или иначе — материализация геометрии, позволили во многом создать Галилею новую науку — математизированное экспериментальное естествознание.

Декарт, например, считал, что поскольку всякое тело имеет протяженность в длину, ширину и глубину, главной наукой о протяженной субстанции — природе (= материи) — и универсальным инструментом ее познания становится геометрия. Математическое и физическое фактически сливаются. Для Декарта «весь мир превращается в громадное беспрельдно простирающееся математическое тело» [30, с. 174]. А поскольку мир одновременно представляет собой машину, то и механика превращается в отрасль математики. «К области математики относятся только те науки, в которых рассматривается либо порядок, либо мера, и совершенно несущественно, будут ли это числа, фигуры, звезды, звуки или что-нибудь другое, в чем отыскивается эта мера...» [31, с. 40]. Но сближая математику с физикой и механикой, Декарт вносит и в математику принцип движения. «Органическое соединение физики как науки о движении с математикой, соединение, положившее начало экспериментально-математическому естествознанию Нового времени, требовало, во-первых, пересмотра оснований античной математики, внесения в нее начала движения, а во-вторых, пересмотра старой физики, освобождения ее от предпосылки, что сфера реального, природного бытия принципиально отличается от бытия идеального, каким занимается математика» [30, с. 183—184]. Причем математика осознается как средство для расчета элементов создаваемой им системы мира-машины, производящей подобные действия, которые наблюдаются в реальном созданном богом природном мире.

Аналогичный шаг в области математического описания машин сделал в своей начертательной геометрии Г. Монж. Чертежи и схемы для инженера становятся одновременно средством связи и с наукой (прежде всего математикой), и с реальным миром технической практики.

## **1.2. Становление теории механизмов и машин как технической науки**

### **1.2.1. Технологическая, конструктивная и кинематическая теория машин**

Машина становится одним из центральных общетехнических понятий начиная с XIX столетия. Оно выражает наиболее типичную техническую систему. Российский философ техники П.К. Энгельмейер проанализировал это понятие уже в конце XIX — начале XX столетия. В XVI и XVII вв. — считает он — машина рассматривалась как индифферентное целое; занятию отдельными частями машины или ее функциями на этой стадии уделялось совсем мало или не уделялось вообще внимания. По его мнению, именно в течение XIX в. произошел переход этого понятия из категории средства в категорию объекта технической деятельности. Это, однако, не означает, что машина перестала рассматриваться как средство и инструмент деятельности. Более того, понятие «средство» является более общим, чем понятие «машина», поэтому Энгельмейер специально рассматривает вопрос о соотношении этих двух понятий. Без орудия вообще не обходится никакая деятельность человека, но в особенности его роль видна в технической деятельности. Он различает два основных смысла понятия «орудие»: 1) общий — «совокупность всех вообще вещественных приспособлений для выполнения какой-нибудь работы» и 2) частный — та «часть приспособления (машины), которая непосредственно выполняет данную работу», т. е. инструмент. К орудиям в общем смысле относятся и машины, но и в самих машинах существует исполнительный орган, называемый орудием в частном смысле. Сами машины также можно разделить на машины-двигатели и машины-орудия. Таким образом, заключает он, «машина есть орудие, имеющее внешнее движение частей» [32, с. 49–51].

Далее Энгельмейер выделяет три основные точки зрения на машину: технологическую, конструктивную и кинематическую (механическую)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> К этим трем техническим точкам зрения он добавляет еще одну — экономическую, но специально ее не рассматривает. Не будем ее рассматривать и мы, так как этот аспект лежит в стороне от нашей основной темы в данной главе — соотношения техники и математики.

1. Технологическая теория машин описывает их с точки зрения выполняемой работы. Энгельмейер цитирует первое технологическое определение машины, данное римским техником Витрувием в его книге «Об архитектуре»: «Машина есть материальная совокупность, преимущественно приспособленная к передвижению тяжестей». Затем эту точку зрения развивали, например, Я. Леопольд и Г.Г.М. Поппе. Я. Леопольд в своем многотомном произведении «Театр машин» дает следующее определение: «Машина или орудие есть искусственное сооружение, с помощью которого можно получить полезное движение и нечто передвигать, сохраняя время и силу, чего иначе нельзя было бы сделать... Машина отличается от инструмента тем, что с ее помощью можно произвести полезное механическое движение, чего не может сделать инструмент, почему не только мельницы, фонтаны и другие подобные большие машины, но также клещи кузнеца, ножницы портного, топор и клин лесоруба следует считать машинами, поскольку они могут произвести движения, которые имеют свое обоснование в механике» [33, с. 65].

В XX в. технологическую теорию машин разрабатывали дальше Т. Бек и главным образом Э. Гартиг. «Стремясь уточнить понятие механизма, машины и привода, он детально проанализировал историю вопроса и пришел к выводу, что эти понятия определяются не только реальным составом объектов, но и их отношением к производственному процессу». Разбирая пример с тачкой, Гартиг пишет, что пустая тачка является механизмом, если находится в состоянии покоя. Если же рабочий двигает тачку, «то она является приводом... А если рабочий везет тачку, наполненную землей, то она является машиной» [33, с. 402].

2. Конструктивная теория машин рассматривает их с точки зрения форм и частей целого. Родоначальником этой школы является крупный немецкий инженер Ф. Редтенбахер, который поставил своей целью создать научное машиностроение, гармонично сочетающее в себе теорию и практику. В 1852 г. он выпустил «Принципы механики» [34, с. 279], где было изложено теоретическое учение о машинах. В 1862–1865 гг. вышло в свет его главное сочинение «Машиностроение». К машине Редтенбахер подходит как истинный конструктор: «Многообразные механизмы движения, которыми пользуются для устройства рабочих машин, не должны каждый раз изобретаться заново. Однако в свое время это было необходимо, когда были изобретены паровые и прядильные машины, так как тогда были известны лишь немногие механизмы для преобразования движений. Теперь же известно очень много разнообразных механизмов и всегда можно отыскать такой, который подходит для частного случая.

Таким образом, лишь для совершенно необычных условий движения действительно необходимы новые изобретения и очень ясное и полное знание изобретенных до настоящего времени передаточных механизмов, служащих для устройства рабочих машин» [35, с. 167–172]<sup>1</sup>. После трудов Редтенбахера конструктивная теория машин под названием «Машиностроение» стала обязательным предметом во всех технических школах.

3. Кинематическая теория машин рассматривает их с точки зрения движения частей. Эта теория зародилась в Парижской политехнической школе, основанной в 1794 г. Г. Монжем. По предложению Монжа курс построения машин, введенный им впервые в Парижской политехнической школе, должен был составить часть курса начертательной геометрии. Начертательная геометрия Монжа задала принцип рассмотрения машин с точки зрения их движения. Тогда даже самые сложные машины являются только результатом комбинирования простейших способов преобразования движения, и нужно лишь позаботиться, чтобы их перечисление было достаточно полным. Машина теперь рассматривалась с точки зрения движения частей в соответствии с требованиями инженерной практики. Элементарные составные части машины стали тогда описываться как приспособления, с помощью которых из движений одного вида можно получить движения другого вида. В каждой машине одной движущейся части должна соответствовать другая часть, делающая ее движение определенным. Именно эта последняя точка зрения на машину как механизм и стала основой новой технической теории — теории механизмов и машин.

### 1.2.2. Гаспар Монж и Парижская политехническая школа

Заслуга Гаспара Монжа заключается в том, что он сделал решающий шаг от чистой математики в сторону ее приложения к описанию конкретных машин, развив особую начертательную геометрию, которая, оставаясь строгой математической наукой, давала средства для такого описания. Эту новую науку Монж определил следующим образом: «Искусство представлять на листе бумаги, имеющем только два измерения, предметы, имеющие три размера, которые

---

<sup>1</sup> Вышедшая в 1848 г. работа Редтенбахера «Resultate für Maschinenbau» (издание 2-е — 1852 г., 4-е — 1860 г.) имеется в русском переводе: *Редтенбахер Ф.* Теоретические и практические данные для проектирования и постройки машин. СПб., 1862.

подчинены точному определению... Заслуга Монжа в том, что он из разрозненных методов, элементов теории отдельных задач и не всегда конкретных способов изображения создал новую отрасль геометрии» [36, с. 11].

Фактически начертательная геометрия давала инженерам математически точную систему графических изображений (математическую схему), позволяющую схематизировать пространственные структуры в виде плоскостного изображения, проводить на нем необходимые расчеты с помощью стандартизованных математических преобразований, а затем переносить полученные результаты на реальные условия. Такого рода задачи постоянно возникали и решались в инженерной практике в области архитектурного проектирования, строительства, геодезии и картографии. Монж попытался перенести в область проектирования машин и механизмов этот математический инструмент, дающий инженеру графический метод решения инженерных задач с помощью бесконечного множества преобразований плоских фигур, «способ на основании точного изображения определять формы тел и выводить все закономерности, вытекающие из их формы и их взаимного расположения» [36, с. 13].

По предложению Монжа курс построения машин, введенный им впервые в Парижской политехнической школе, должен был составить часть курса начертательной геометрии. Предлагаемая им программа включала семь разделов: основные принципы, резка камней, резка дерева, тени, перспектива, топография и машины. В последний раздел вошли:

«1. Представление способов, с помощью которых можно преобразовать поступательное движение в движение по окружности и наоборот, движение по окружности в возвратно-поступательное движение и наоборот, обратно-поступательное движение в поступательное движение и наоборот.

2. Представление способов облегчения движений всех видов.

3 и 4. Описание основных машин, приводимых людьми, животными, силами, заимствованными у природы, подобно текущей воде, падающей воде, ветру и водяному пару» [26, с. 49].

Машина теперь рассматривалась с точки зрения не равновесия ее частей, как это делалось прежде, а движения частей в соответствии с требованиями инженерной практики. Элементарные составные части машины стали описываться как приспособления, с помощью которых из движений одного вида можно получить движения другого вида. Такого рода идеализированное представление машины необходимо инженеру, создающему проект, во-первых, для проведения расчетов (поскольку оно дает представление об относительном

сравнении величин) и, во-вторых, для ее описания в виде последовательности преобразований естественного процесса — движения. Это обеспечивает переход от исходной математической (функциональной) схемы к поточной теоретической схеме машины, позволяющей использовать естественнонаучные знания.

Не случайно, что именно начертательная геометрия явилась первой дисциплиной, с которой связана «наука о машинах». Чтобы иметь возможность применять знания теоретической механики, необходимо таким образом схематизировать технические системы (машины), чтобы их части можно было представить в виде идеальных объектов теоретической механики (наклонная плоскость, блок, винт и т.д.), с которыми производились типовые расчеты. Кроме того, чтобы зафиксировать знания принципов действия и конструкций машин, их также необходимо было схематически изобразить. Наконец, математические средства решения различных инженерных задач сравнительно давно использовались при создании машин, они уже в значительной степени были разработаны в прикладной математике, прежде всего в работах Эйлера, Даламбера, Лагранжа, Фурье, Карно. Однако для применения графических и аналитических методов расчета требовалось сначала особым образом изобразить, схематизировать техническую систему (в данном случае машину).

Начертательная геометрия, получившая окончательное оформление как самостоятельная математическая дисциплина в трудах Монжа, как раз и давала (описывала) геометрические средства и законы такой схематизации, например метод проецирования объекта на координатные оси. Начертательная геометрия знакомит с результатами стереометрии, а также сообщает детальные познания об объектах, необходимых почти для всех искусств; частным применением ее является действенное описание форм и конструкций элементарных частей машин [37]. Монж рационализировал «чертежные процедуры», позволяющие поэтапно преобразовывать трехмерные изображения в двумерные конструкции, и доказал их аналогичность, что давало «возможность решать трехмерные проблемы виртуально на листе бумаги с помощью проекций и линий пересечения поверхностей». Тогда машиностроительное черчение становится «просто применением принципов начертательной геометрии для представления машин», имитацией реальных объектов на бумаге, их «идеальной реализацией» (*Booker P.J. A History of Engineering Drawing. London: Chatto & Windus, 1963*). При использовании принципа Монжа даже самые сложные машины являются только результатом комбинирования простейших способов преобразования движения, и нужно лишь позаботиться, чтобы их перечисление было достаточно полным.

Работы последователей Монжа были направлены на адаптацию выбранной им исходной теоретической схемы в соответствии с обширным новым эмпирическим материалом, накопленным к этому времени в практике создания машин. Один из учеников Монжа, читавший вместе с ним курс начертательной геометрии в Парижской политехнической школе, Жан Никола Пьер Ашетт, получил в 1806 г. официальное предложение подготовить курс построения машин. Его программа включила в себя следующие пункты:

«1. Действие двигателя, приводящего машину в движение, прилагается в точке, которая вследствие этого описывает круг или прямую линию. В результате получается вращательное или поступательное движение.

2. Движущаяся точка, пробежавшая некоторый отрезок пути по окружности или по прямой, может быть принуждена движущей силой вернуться в исходное положение, двигаясь в обратном направлении по той же линии; так получают круговое и прямолинейное возвратные движения.

3. Обозначая  $R$  — прямолинейное непрерывное движение,  $r$  — прямолинейное возвратное движение,  $C$  — круговое непрерывное движение,  $c$  — круговое возвратное движение (качание), получаем десять комбинаций из четырех букв: ...соответственно которым рассматривается десять элементарных преобразований движений».

В нее вошли также сведения об «элементарных машинах, о круговом движении, о движении прямолинейном, о движении возвратном; о формах машин, при помощи которых эти движения комбинируются по два; распределение этих машин на десять серий; объяснение таблицы, в которой все известные машины распределены на десять серий» [26, с. 140–141].

После этого начинается процесс адаптации этой исходной теоретической модели Монжа путем наложения ее на эмпирический материал, содержащийся, например, в «Театре машин» Леопольда или других справочных изданиях. В этом смысле показательной является книга И. Ланца и А. Бетанкура «Курс построения машин» [38, с. 11], которая представляет собой одну из первых попыток систематизации и объяснения всех основных машин того времени. В отличие от Ашетта они составили более обширную таблицу элементарных машин<sup>1</sup>, описав ее в своей книге. Ашетт предусматривал десять типов преобразований движения при помощи элементарных машин, у Ланца и Бетанкура их уже 21 (рис. 1.14).

---

<sup>1</sup> Но это уже не «простая машина» античной механики, так как ее основное назначение — не преобразование силы, а преобразование движения [26, с. 137].



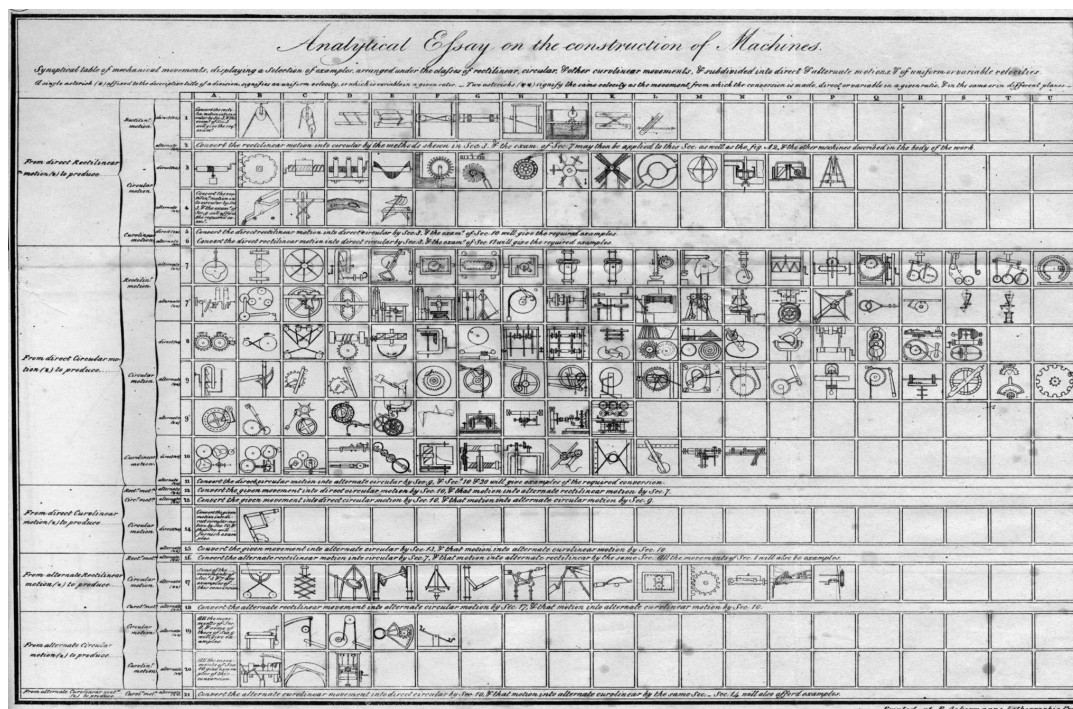


Рис. 1.14. Классификационная таблица «всех» машин в учебнике Ланца и Бетанкура

В предисловии к английскому изданию этой книги говорится, что она дает массу важной практической информации и может рассматриваться как «грамматика науки о машинах». Незаполненные клетки в таблице были резервированы для будущих открытий и изобретений.

Однако для них еще характерна неоднородность изображения машин. В одних случаях (в основном для наиболее теоретически разработанных областей, например теории зубчатых колес) изображение является последовательной реализацией исходного теоретического принципа. Оно представляет собой достаточно абстрактную схему, позволяющую решать инженерные задачи с применением средств прикладной математики и теоретической механики. В других случаях это только рисуночное изображение и объемные эскизы соответствующих машин, не подвергнутые теоретической обработке (см., например, увеличенную часть приведенной выше таблицы на рис. 1.15).

В книге М. Ланца и А. Бетанкура [39] почти полностью отсутствовали расчеты (для них также требовалось более обобщенное описание машин). Чтобы дать такое описание, требовалось сопоставить друг с другом машины данного класса. Это было бы возможно, если бы удалось вычленить элементы (т.е. приспособления для преобразования движений одного вида в движения другого вида), общие для всех существующих машин с точки зрения принятой теоретической схемы.

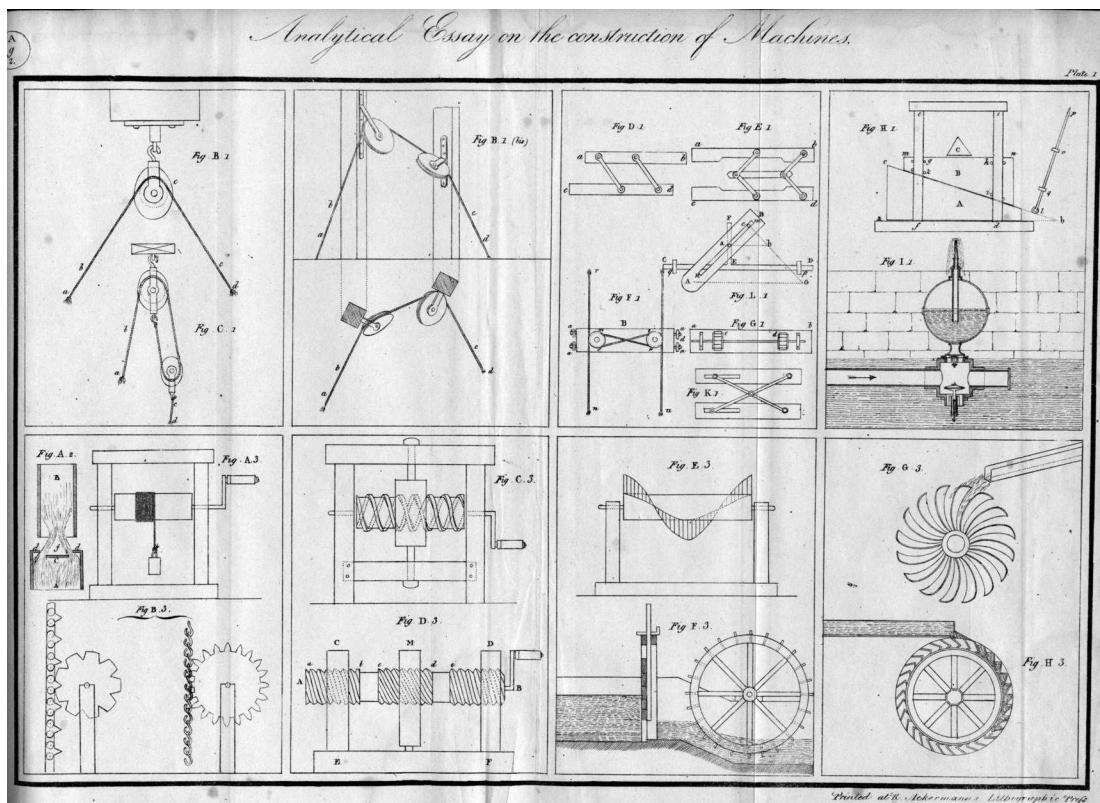
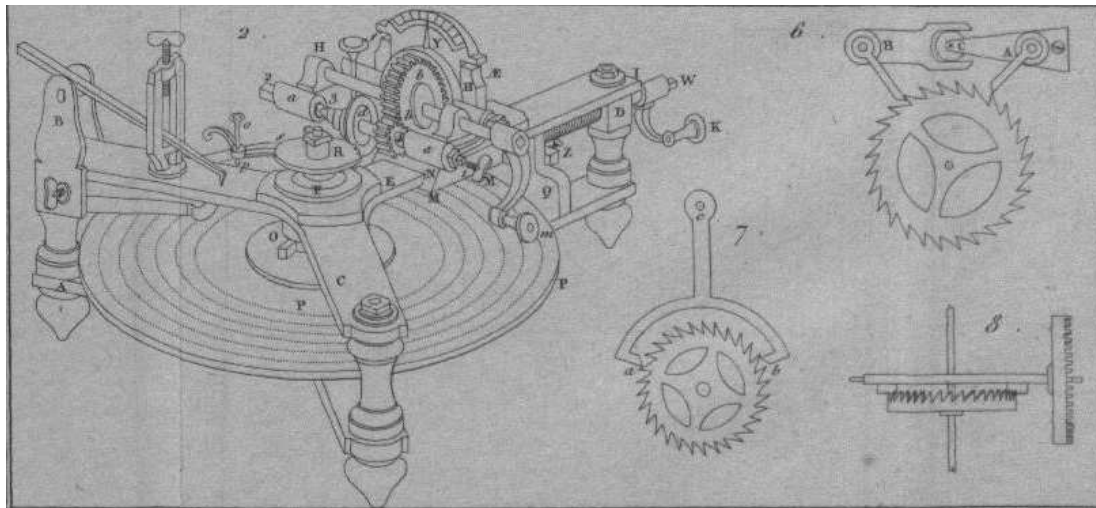


Рис. 1.15. Фрагмент таблицы, приведенной на рис. 1.14

Однако деление машин на части по единому теоретическому принципу пока не удавалось. Во-первых, требовалась модификация исходной схемы, во-вторых, первоначальное разложение машин на элементы еще было тесно связано со стихийно сложившимися в инженерной практике различиями и изображениями машин. Эту работу проделали другие последователи Монжа, работы которых были направлены на адаптацию выбранной им исходной теоретической модели в соответствии с обширным новым эмпирическим материалом, накопленным к этому времени в практике создания машин. Именно в результате такого рода работы удалось выделить объект исследования будущей теории механизмов — передаточный механизм, как ту часть любой машины, которая может быть подведена под данную схему.

Одна из первых попыток дать теоретическое описание машины содержится в работе Ж. Борньи (1781–1863) «Полный курс механики в приложении к технике» [40], где на рис. 1.16 дан пример изображения передаточного механизма. Отправным пунктом для Борньи служит расчленение любой машины на шесть порядков частей в соответствии с функцией каждой части, т. е. ее назначением: приемник, передача, модификатор, основание, регулятор, оператор (рабочий орган). Задача регуляторов, например, заключается в исправлении неравномерности движения. Выделение именно этих конструктив-

ных элементов было связано с различием методов, применяемых для их инженерных расчетов. Регулятор рассчитывается отдельно и иначе, чем основание. Однако у Борньи есть еще неясности в расчленении машины — непонятна, например, разница между модификатором и трансмиссией (передачей).



**Рис. 1.16.** Пример изображения передаточного механизма<sup>1</sup>

Ж. Кристиан в работе «Курс индустриальной механики» [41], исследуя сущность механической операции, отмечает, что первая группа элементов, составляющих машину, предназначена исключительно для восприятия движения, полученного от двигателя, вторая группа — для переноса в различных направлениях и для самых различных преобразований этого движения и, наконец, третья группа элементов машины необходима для выполнения действий над материалом (механической обработки). Таким образом, Кристиан четко выделяет три части всякой машины: двигатель, передаточный механизм и орудие.

Значительное место он уделяет специальному рассмотрению именно передаточных механизмов и подчеркивает необходимость их отдельного исследования. Такое выделение передаточного звена было связано с тем, что на него в то время приходилась основная доля инженерной работы. Однако прежде всего оно явилось следствием наложения на эмпирический материал и адаптации к нему исходной теоретической схемы Г. Монжа. Передаточный механизм — это именно та часть любой машины, которая может быть подведена под данную схему. Остальные части машины, например двигатели, бы-

<sup>1</sup> *Borgnis J.A.* Traité complet de mécanique appliquée aux arts, contenant l'exposition méthodique des théories et des expériences les plus utiles pour diriger le choix, l'invention, la construction et l'emploi de toutes les espèces de machines / par [Giuseppe Antonio] Borgnis, ... Paris: Bachelier, 1818.

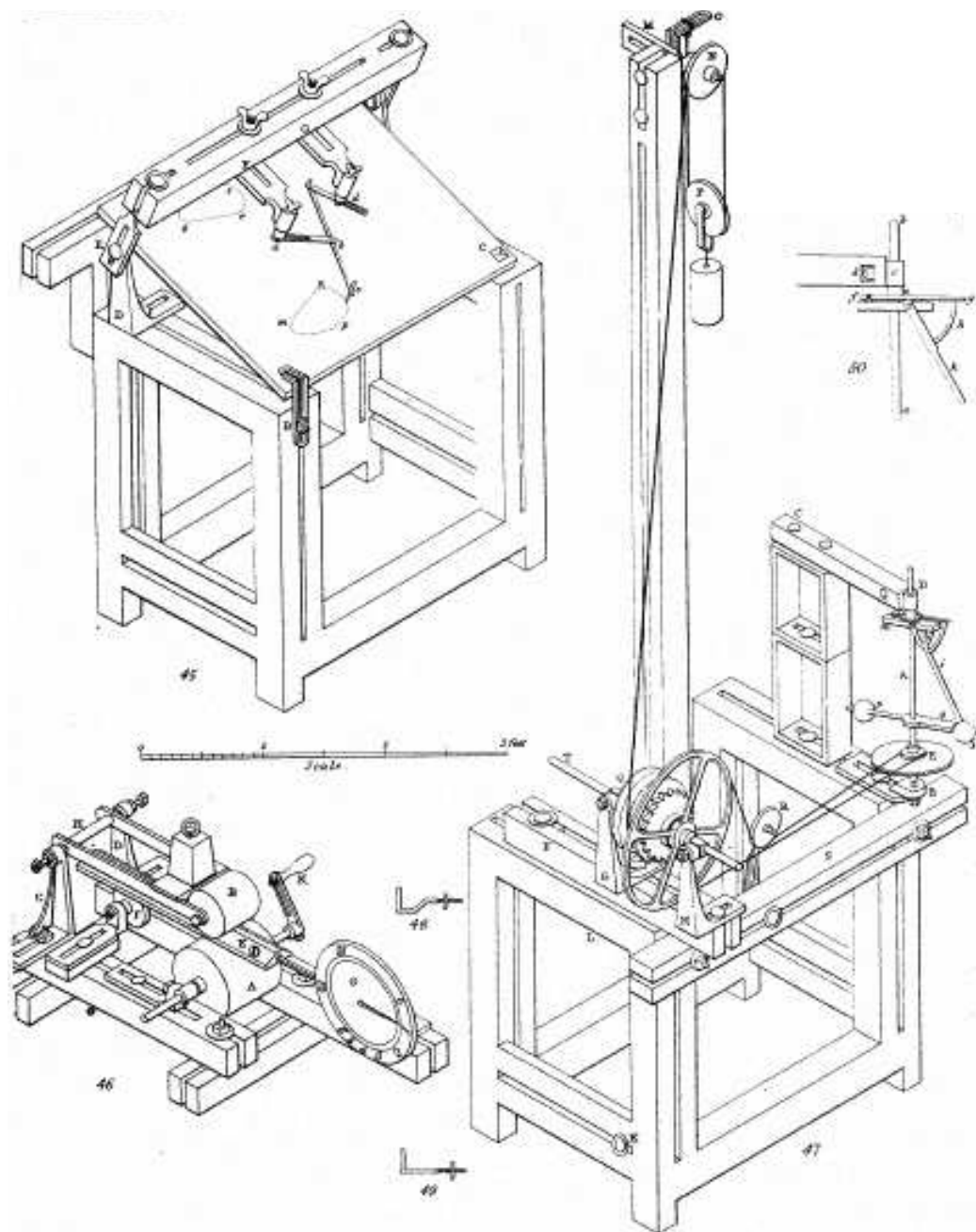
ли еще не развиты и изготовлялись на уровне ремесла или брались готовыми. Иначе говоря, Кристиану удалось выделить объект исследования формирующейся теории механизмов. Предметом же ее исследования стала кинематика механизмов — характер движения их частей.

### 1.2.3. Принципы механизма Роберта Виллиса

Английский ученый Роберт Виллис продвинулся еще на один шаг дальше, введя различие «конструктивного» и «чистого» механизмов. Последний представляет собой теоретическую схему механизма, необходимую для проведения кинематических расчетов. Кроме того, он очерчивает само понятие машины и более четко расчленяет ее на части: «Всякая машина конструируется с целью выполнения определенных механических операций, каждая из которых предполагает существование... движущей силы и объекта, подлежащего операции... Машины фактически расположены между силой и работой для того, чтобы приспособить одну к другой ...» [42, р. 1].

Р. Виллис издал «Основы механизмов» — сочинение, составившее ему имя в технической науке. Он первый заметил, что можно рассматривать механизмы как средство осуществлять произвольные соотношения движений и их составных частей независимо от приложенных сил, определяющих направление и скорость действительно происходящего движения, и предложил новую систему их классификации. Многие части книги были разработаны автором самостоятельно, например теория формы зубцов зубчатых колес, для вычерчивания которых он описывает особое приспособление, названное им «одонтограф» (рис. 1.17).

Вслед за Кристианом он выделяет три части машины: приемник, передаточный механизм и орудие. Принципы, на которых основаны конструкция и устройство этих частей, различны. Приемники рассматриваются с точки зрения источника силы, рабочие части — с позиций выполняемой работы. Механизм же, по Виллису, необходимо исследовать без ссылки на силу и работу. Один и тот же приемник может сочетаться с различными частями и наоборот. Точно так же и механизм, вставленный между приемником силы и множеством рабочих частей, может быть изменен многими способами. По мнению Виллиса, его надо рассматривать как самостоятельный объект исследования и проектирования.

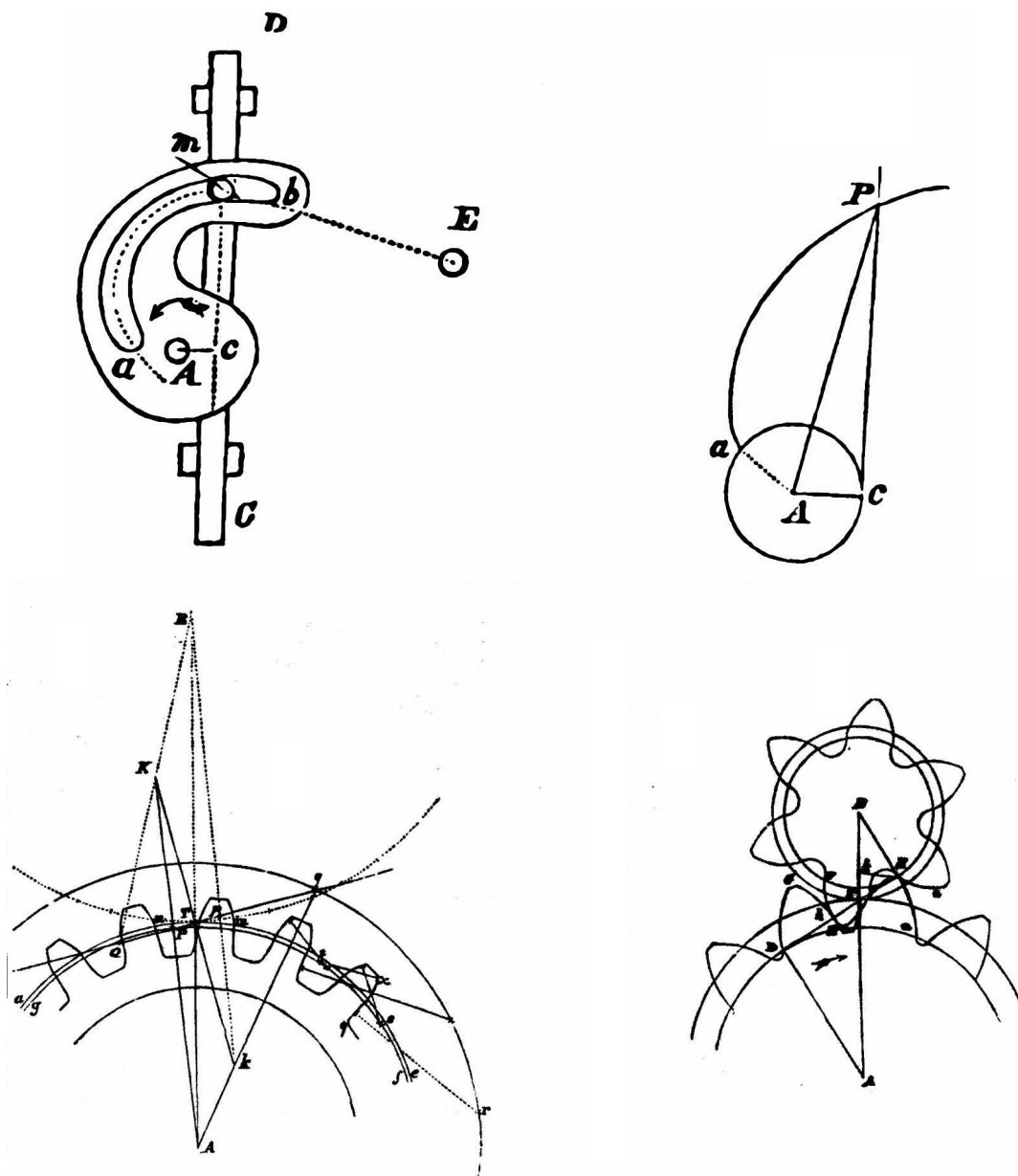


**Рис. 1.17.** Одонтограф Роберта Виллиса<sup>1</sup>

Виллис идет дальше Кристиана, предлагая исследовать механизмы исходя исключительно из геометрических принципов, без рассмотрения сил. Тем самым подводится итог процессу адаптации исходной теоретической модели Монжа: в сфере инженерной практики выделяются те части машины, которые могут быть наиболее эффективно описаны с ее помощью (рис. 1.18). Виллис вво-

<sup>1</sup> См.: *Willis R. A System of Apparatus for the Use of Lecturers and Experimenters in Mechanical Philosophy: Especially in those branches which are connected with mechanism. London, 1851. P. 34.*

дит также представление о жестких (ведущем и ведомом) звеньях и строит классификацию простых механизмов исходя из принципа отношения скоростей и отношения направлений. Кинематическая задача сложных механизмов — сложение направлений и скоростей — осуществляется посредством комбинации простых механизмов.



**Рис. 1.18.** Пример геометрического представления частей механизмов<sup>1</sup>

На этом этапе формирования технической теории проблема состоит в том, чтобы дать функциональное описание всех существующих технических систем данного типа — машин. Это позволит текстуаль-

<sup>1</sup> См.: Willis R. Principles of Mechanism. London: Longmans, Geen and Co., 1870. P. 123, 135, 153.

но закрепить принципы их действия. Поскольку к этому времени число реально созданных инженерных систем указанного типа уже достаточно велико, то такое описание должно быть достаточно общим. Простое перечисление переходит в полутеоретическую классификацию. В своей классификации Виллис пытается задать поле механизмов, т.е. описать каждый конструктивный механизм указанным выше способом — как «чистый» механизм. Он выделяет три класса простых механизмов и пять групп. Рассматривая механизм как систему жестких звеньев, Виллис выделяет ведущее и ведомое звенья, которые описывает исходя из принципа отношения скоростей и отношения направлений.

*Класс А.* Отношение скоростей ведущего и ведомого звеньев сохраняет постоянную величину и знак для всего времени движения механизма.

*Класс В.* Отношение скоростей переменное по величине, но постоянно по знаку.

*Класс С.* Отношение скоростей постоянно по величине, но отношение направлений переменное.

Соответственно типам механических связей между этими звеньями, т.е. способу передачи движения, различаются механизмы соприкосновения качением, соприкосновения скольжением, гибкой передачи, шарнирные механизмы и механизмы с передачей движения при помощи сдваивания звеньев. Кроме того, описываются сложные механизмы, общая задача которых — сложение направлений и сложение скоростей, осуществляемое посредством комбинации простых механизмов. Описание и схематизация всех этих механизмов дается с точки зрения четких теоретических позиций.

Виллис последовательно разворачивает исходные теоретические представления с помощью таких понятий, как покой, движение тела, траектория точки, направление, скорость (геометрически истолкованная), оборот, период, цикл, фаза, попеременное движение, круговое вращение и т.д. Однако он не задает еще единого теоретического поля, в котором можно было бы не только описывать существующие механизмы, но и строить новые. Это вызвано тем, что такая классификация не позволяет применить к исследованию механизмов какие-либо общие методы. На данном этапе это было в принципе невозможно, так как для этого необходимо более расчлененное представление идеального, абстрактного объекта технической теории. Невозможно было свести все многообразие сложных механизмов к совокупности ведомого и ведущего звеньев. Предложенная Виллисом классификация оказалась неполной даже для многих существующих механизмов.

Уже на этом этапе выдвигается требование к формирующейся технической науке — давать практические результаты. Это означает, что здесь осуществляется не только схематическое описание существующих технических систем, но и собственно теоретическое исследование — разработка методов расчетом, выдвижение теорем, проведение доказательств и развитие частных теоретических схем. Однако теоретическое исследование пока еще не приняло единой, всеобщей для данной дисциплины формы — это отдельные, плохо связанные друг с другом исследования. В своих лекциях в Кембриджском университете Виллис упрекает школу Монжа в том, что предлагаемая ею система годится только для перечисления и описания элементов машин, но ничего не дает для расчета этих элементов; кинематика же, по его мнению, должна быть не описательной, а расчетной наукой. Виллис специально разрабатывает отдельные части кинематики. При этом он не только создает методики расчетов, но и специально доказывает теоремы, например теорему, связывающую характеристику профилей зацепляющих поверхностей с законами изменения угловых скоростей. Разработанная им детально теоретически и применимая практически теория зацеплений может быть рассмотрена как частная теоретическая схема теории механизмов.

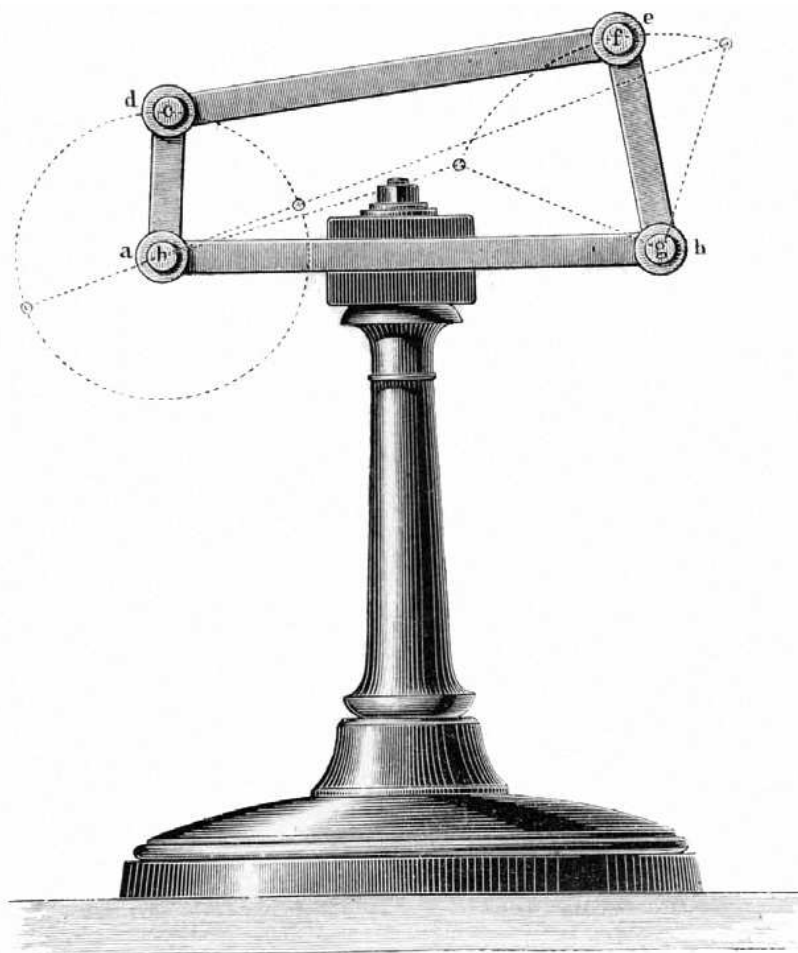
#### 1.2.4. Теоретическая кинематика Франца Рело

Создать обобщенную теоретическую схему этой развивающейся технической науки, которая позволила бы не только объяснить принцип действия существующих, но и облегчить создание новых механизмов, поставил своей целью немецкий инженер Франц Рело. Для этого он использовал достаточно развитую к этому времени графическую статику, опирающуюся на методы проективной геометрии («геометрии положения»). Однако если последняя имела дело с математически идеальными объектами (прямая, плоскость и т.д.), то в графической статике с помощью геометрических методов решались физические и инженерные задачи. Мосты, строения и другие инженерные объекты представлялись в ней в виде геометрических фигур, например многоугольника сил. Теоремы графической статики дают значительное число графических построений, очень просто решающих многие вопросы механики, зачастую гораздо проще аналитических методов, поскольку построение нескольких линий в ней заменяет целый ряд длинных и утонченных вычислений.



Транслировав обобщенную теоретическую схему из этой смежной области, Рело приспособил ее под новый эмпирический материал, развивая одновременно исходную теоретическую модель Монжа. Рело строит особую «кинематическую» геометрию и на основе выбранной им геокинематической схемы проводит более детальное, чем его предшественники, расчленение механизма как однородного абстрактного объекта технической теории на части, которое приобретает характер иерархического описания механизма.

В своей книге «Теоретическая кинематика»<sup>1</sup>, опубликованной в 1975 г., Рело развивает представление о кинематической паре. Составляющие ее тела он называет элементами пары. С помощью двух таких элементов можно осуществить различные движения. Несколько кинематических пар образуют кинематическое звено, несколько звеньев — кинематическую цепь. Механизм является замкнутой кинематической цепью принужденного движения, одно из звеньев которой закреплено (рис. 1.19).



**Рис. 1.19.** Модель простейшей кинематической цепи [43, s. 51]

<sup>1</sup> Работы Рело были хорошо известны и популярны в это время в России (см., например, *Лигин В.* Очерк новых воззрений Рело на машину. Одесса, 1878).

Поэтому из одной цепи можно получить столько механизмов, сколько она имеет звеньев. Если же мы принудим одно из звеньев с помощью некоторой силы изменить первоначальное положение, то получим машину. Франц Рело дает следующее определение машины: «Машина — это соединение сопротивляющихся тел, устроенное так, чтобы принудить механические силы природы действовать для выполнения определенных движений» [43, s. 38].

Такое строение абстрактных объектов является специфичным и обязательным для технической теории, делая их однородными в том смысле, что они сконструированы, во-первых, с помощью фиксированного набора элементов и, во-вторых, ограниченного и заданного набора операций их сборки. Любые механизмы могут быть представлены как состоящие из иерархически организованных цепей, звеньев, пар и элементов. Это обеспечивает, с одной стороны, соответствие абстрактных объектов конструктивным элементам реальных технических систем, а с другой — создает возможность их дедуктивного преобразования на теоретическом уровне. Поскольку же все механизмы оказываются собранными из одного и того же набора типовых элементов, то остается задать лишь определенные процедуры их сборки и разборки из идеальных цепей, звеньев и пар элементов, т.е. синтеза и анализа.

Франц Рело следующим образом формулирует задачи анализа и синтеза кинематических схем в теории механизмов и машин. *Кинематический анализ* заключается в разложении существующих машин на составляющие их механизмы, цепи, звенья и пары элементов, т.е. в определении кинематического состава данной машины. Конечным результатом такого анализа является выделение кинематических пар элементов (предел членения). *Кинематический синтез* — это подбор кинематических пар, звеньев, цепей и механизмов, из которых нужно составить машину, производящую требуемое движение.

Однако несмотря на явные достижения, Рело и его школа так и не смогли завершить работу, намеченную Виллисом, — создать теорию механизмов. Рело не только не сумел разработать единых теоретических средств для решения инженерных задач, но и совершенно опустил расчетную часть прикладной кинематики, уже в значительной степени разработанную Виллисом и Французской школой. Предложенный им формальный аппарат для обозначения состава механизмов оказался громоздким и не дал практических результатов. Как реакция на «теоретичность» кинематической школы Рело, наметилась более жесткая ориентация на инженерную практику. В то же время работа Рело вызвала широкую дискуссию, в результа-

те которой, с одной стороны, было констатировано, что разработать расчетную математизированную теорию ему не удалось, а с другой — еще более отчетливо была сформулирована необходимость создания единой теории механизмов с применением математических средств. И хотя Рело не применял математику, развиваемые им представления (подобно силовым магнитным линиям Фарадея) были весьма «геометричны». Поэтому именно обобщенная онтологическая схема, развитая Рело, и послужила исходным пунктом для создания математизированной теории.

В это время формируется представление о разграничении двух различных дисциплин под одной крышей механики, а именно теоретической и технической механики. «Теоретическая механика концентрируется на том, чтобы строго и систематически описывать с помощью математических средств естественные процессы. Приложения, если таковые предлагаются, ею лишь поддерживаются. Техническая же механика, напротив, всегда отталкивается от практических, технических проблем и пытается решать их любыми средствами...» [47, s. 56]. В то же время прикладная или техническая механика, как отмечает Франц Рело, рассматривает машинную систему как любой природный объект с целью исследовать причинную зависимость явлений в этой системе, имея методическую направленность, т. е. вырабатывая методы исследования движения различных систем, которые могут быть затем использованы в практике машиностроения. Собственно говоря, и раньше механика теоретическая отделялась от механики практической. Еще Ньютон различал в предисловии к «Началам» механику «рациональную (умозрительную), развиваемую точными доказательствами», и практическую, к которой «относятся все ремесла и производства, именуемые механическими, от которых получила наименование и сама механика» [11, с. 1].

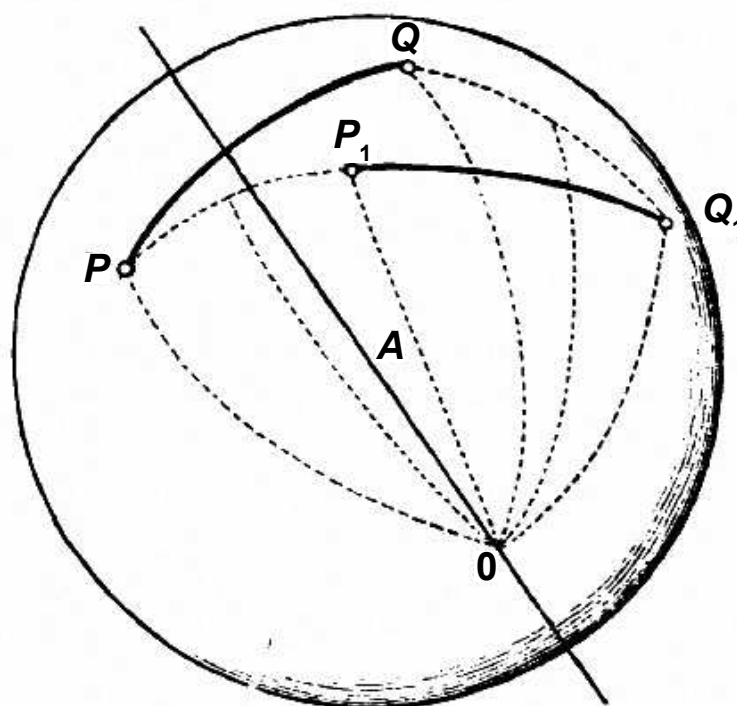
Однако в XIX столетии это разделение получило несколько иное звучание, поскольку рациональная, теоретическая механика оказалась отделенной огромным пространством от самых простых и обыкновенных приложений, а получаемые из теории выводы слишком несогласными с технической реальностью. Это было в первую очередь связано с тем, что инженерная практика продвигалась быстро вперед и требовалось теоретическое осмысление связанных с ней задач. Важно было приблизить теорию к практике, изменив сам характер теоретических идеализаций и схем. Например, в рациональной механике рассматриваются совершенно упругие и совершенно твердые тела, но ни те, ни другие не существуют в природе и тем более в искусственных сооружениях — машинах.

Техническая механика должна была восполнить образовавшийся пробел и соединить глубокие теоретические сведения с обширной практикой.

Под кинематикой, уже в классификации наук Ампера, понимается наука, «в которой рассматривается движение само по себе». Ампер в своем «Опыте философии наук», изданном в 1834 г., четко разделил предметы исследования кинематики, статики и динамики, которые являются частями механики как физико-математической науки. Кинематика «должна содержать все, что относится к различным видам движения, независимо от сил, производящих последние. Она, во-первых, должна заниматься всеми рассуждениями относительно путей, проходимых при различных движениях, относительно времен, затрачиваемых на их прохождение, а также определением скоростей... Она должна изучать также различные приспособления, при помощи которых можно преобразовать одно движение в другое; называя эти приспособления машинами, следует определить их... как приспособления, служащие для преобразования направления и скорости заданного движения... Вот этой-то науке, в которой движения следует изучать сами по себе, такими, какими мы наблюдаем их в телах, нас окружающих, и, в частности, в приспособлениях, называемых машинами, я дал название кинематики...».

Франц Рело также различал в кинематике исследования естественных движений, например планет вокруг Солнца, и искусственных движений, например колеса машины вокруг своей оси. В первом случае движение происходит и сохраняется за счет таких внешних сил, как инерция, тяготение, центробежная сила, и в любое время может быть нарушено, например влиянием других планет, комет и т. д. Во втором случае движение является принудительным, как движение колеса на твердо закрепленном валу [48, s. 94–95]. Рело пытается построить особую «кинематическую» геометрию, называя ее «чистой кинематикой» (или «форономией»), описывающую различные приемы решения задач. Эти приемы отдельно разрабатываются им для любых тел (рис. 1.20) и лишь затем прилагаются к машинам.

Он следующим образом определяет статус прикладной механики как самостоятельной науки: «Я называю ее наукой и не думаю, чтобы это было большой претензией с моей стороны: если угодно, назовите ее наукой второго или третьего порядка; она пользуется в своей области исследования научным методом и мало-помалу завоевывает свою самостоятельность, которая сделала необходимым ее обособление от других наук» [46, s. 39–40].



**Рис. 1.20.** Перевод любой сферической фигуры  $PQ$ , которая движется по своей собственной сферической поверхности, из одного ее положения  $PQ$  в другое  $P_1Q_1$  с помощью поворота вокруг пункта  $O$  сферической поверхности [49, s. 80]

Однако наукой она стала значительно позже. При этом важно отметить, что сначала кинематика возникла как прикладная наука: теоретическая кинематика выделилась в теоретической и аналитической механике позже. «Теория механизмов является производной наукой и... ее главными источниками являются прикладная механика и математика... Лучше всего называть ее *форономией*. Но часто ее называют *кинематикой*. Форономия... является учением об измерении поступательного движения тел и причем любых тел... Можно точно такое же представление... распространить на движение космических явлений». Таким образом, по Рело, форономия — это «учение о геометрических способах представления движения» или «чистая кинематика». Машины же «представляют собой особый вид, активируемый с помощью вращающихся везде геометрических структур», которые есть не что иное, как «душа машины», «геометрическая абстракция машины» [49, s. 59–60, 87]. Очевидно, что здесь опять налицо продолжение архимедовской модели науки о машинах, основанной на математике.

В начале XX в. стали развиваться два направления: во-первых, механика как математическая и как физическая наука, как наука о природе и, во-вторых, механика как теоретическая основа техники. Однако такое разграничение мы находим значительно рань-

ше. Классификацию простейших видов движения проводили уже Леонард Эйлер и Жан Лерон Д'Аламбер. «Они рассмотрели элементарные движения — поступательное движение твердого тела и вращательное движение — вокруг неподвижной оси и показали, что движение около неподвижной точки можно рассматривать как совокупность мгновенных вращений вокруг переменной мгновенной оси. Исследовав плоско-параллельное и пространственное движения свободного твердого тела, они показали, что эти движения сложные и их можно разложить на элементарные движения» [50, с. 116]. Эйлер, например, доказал теорему о том, что при сложении двух вращательных движений, оси которых проходят через одну точку, получается также вращательное движение вокруг оси, проходящей через ту же точку.

Кроме того, исследовалось вырождение винтового движения во вращательное или в поступательное движение. При этом многие вопросы кинематики твердого тела разрабатывались в связи с исследованием небесной механики, а также движения корабля и движения механизмов, например четырехзвенного кривошипного механизма. Причем даже при кинематическом исследовании механики механизмов и машин для этого направления движения в них представлялись частным случаем движения твердого тела, как, например, движение четырехзвенника представляло интерес с точки зрения изучения циклических кривых.

Леонард Эйлер в своей работе «Полная теория машин, приводимых в движение водой», изданной в 1756 г., дает теоретическое описание общего движения идеальной несжимаемой жидкости в достаточно узких трубках двоякой кривизны, вращающихся вокруг оси [51]. При этом параллельно развивается новый математический аппарат, например векторное исчисление, доказываются теоремы и разрабатываются частные теоретические схемы, в частности теория винтов (о возможности приведения любого движения твердого тела к винтовому движению).

В середине XX века в связи с новыми задачами, связанными с динамикой ракет, теорией прочности резервуаров, гидростроительством, теорией корабля и другими вопросами, особенно важной стала проблема движения твердого тела с полостями, полностью или частично заполненными жидкостью. Появилось много исследований в этой области, таких, например, как исследование линеаризованных уравнений движения с применением методов теории малых колебаний и спектральной теории операторов [50, с. 206—207]. Как видим, и в этом направлении технические задачи стимулировали постановку и исследование естественнонаучных проблем, результаты

которых были важны и использованы для инженерных разработок. Однако само это направление разрабатывалось в плане развития естественнонаучной теории.

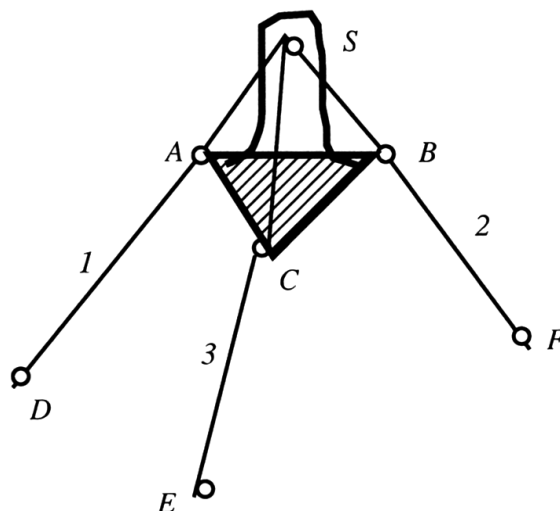
### **1.2.5. Универсальная классификационная схема и математизированная теория механизмов**

Второе направление было непосредственно связано с развитием технической механики как теоретической основы техники — кинематики машин и механизмов, выросшей в конечном счете в новую техническую теорию — теорию механизмов и машин. Последовательную универсальную для исследования различного рода механизмов теоретическую схему разработал в конце прошлого столетия Л.В. Ассур. При этом он исходил из единых принципов их структурной классификации.

Его целью была разработка системы общего кинематического и кинематостатического анализа механизмов любого строения. В связи с этим он расширяет и понятие кинематической цепи, рассуждая следующим образом: «Если ввести в терминологию степень изменяемости, то можно обобщить термин кинематической цепи и говорить о кинематических цепях разных степеней изменяемости. С этой точки зрения различие между фермой и механизмом только в степени изменяемости, лежащей в основе их кинематической цепи». При неподвижном укреплении одного звена такой цепи образуется ферма. Если говорить о статически определимых фермах, то достаточно «будет указывать, что лежащая в основе их цепь неизменяема» [52, с. 153–154].

Такая схема давала возможность не только распределять механизмы на группы по общим признакам, но и применять общие методы решения задач. Некоторые из них были разработаны самим Асуром, например методы «особых точек», «ложных картин скоростей» и т. д. Иные же методы, разработанные другими учеными и инженерами ранее, например Робертом Смитом в 1885 г. [53], он включил в контекст своей классификации.

Эти методы заключались в установлении четкого соответствия между геометрическими представлениями механизма (функциональными схемами) и его кинематическими (поточными) схемами: «дважды применив к описанию структуры механизмов процесс схематизации, Асур приходит к некоторым образованиям, являющимся схемами каких-то конкретных механизмов, но над которыми можно производить некоторые формальные операции» (рис. 1.21).



**Рис. 1.21.** Пример изображения механизма в виде геометрической схемы

В анализе структуры кинематических цепей метрические соотношения и форма отдельных звеньев не играют никакой роли, поэтому их изображение становится предельно простым: следует «бесповодковые звенья обозначить кружками, поводковые соединительные цепи — прямыми линиями, а замки — пунктиром, одноповодковые звенья, а также их группы, примыкающие к бесповодковым звеньям, — кривыми линиями. Тогда замкнутую цепь любого типа можно будет изобразить в виде кружков, соединенных между собой системами линий». Эта математическая схема, полученная путем выхолащивания механической сущности, наводит его на мысль о возможности использования незнакомого ему прежде математического направления — топологии. «Таким образом, задача структурного анализа механизмов оказывается задачей топологической...» [53, с. 110, 113, 114].

Заметим, что при использовании метода аналогов скоростей и ускорений решение задачи распадается на два этапа: сперва определяется геометрическая модель движения с помощью аналогов скоростей и ускорений, а затем с учетом кинематических и динамических данных движение механизма приводится к конкретному случаю.

Ассур рассуждает следующим образом: «пусть задано жесткое звено  $ABC$  и известны скорости трех его поводков... в концевых точках  $D$ ,  $E$ ,  $F$ . Требуется определить скорости вершин жесткого звена. Определим сначала проекции скоростей точек  $D$ ,  $E$ ,  $F$  на направления соответствующих поводков. Если направления двух поводков (например,  $1$  и  $3$ ) пересекаются в точке  $S$ , то для этой точки, принадлежащей жесткому звену, по двум известным проекциям скорости определится полная скорость. Проектируя затем скорость точки  $S$  на направление  $SC$ , получаем проекцию скорости точки  $C$ . Следовательно, можно по двум проекциям определить скорость точ-



ки  $S$  и, наконец, по известным двум скоростям точек  $S$  и  $C$  найти скорости точек  $A$  и  $B$  жесткой фигуры» [52, с. 125–141].

Л.В. Ассур предложил простой метод синтеза структурных схем плоских механизмов путем последовательного присоединения к первичному механизму особых кинематических цепей — групп. *Группой* называется кинематическая цепь, которая после присоединения к стойке своими свободными элементами имеет степень подвижности, равную нулю. Кроме того, в группах Ассура все кинематические пары низшие. Класс групп определяется по предложению И.И. Артоболевского числом кинематических пар, входящих в замкнутый контур, образованный внутренними кинематическими парами. Порядок группы определяется числом внешних элементов кинематических пар, которыми группа присоединяется к имеющемуся механизму: «первая группа присоединяется к первичному механизму, каждая последующая — к полученному механизму, при этом нельзя присоединять группы к одному звену» (рис. 1.22)<sup>1</sup>.

На базе такого рода обобщенной, или универсальной для данного класса технических систем (механизмов) теоретической схемы, В.В. Добровольский и И.И. Артоболевский создали математизированную теорию механизмов. Характерной особенностью науки о механизмах первой половины XIX века является то, что она возникла как описательная наука и такую же продолжала оставаться. Математические методы в ней, за очень небольшим исключением, не применялись. Преобразование кинематики механизмов и создание на ее основе принципов расчетной науки было начато П.Л. Чебышевым.

Параллелограмм Чебышева (рис 1.23) — плоский прямолинейно-направляющий механизм для воспроизведения движения некоторой его точки по прямой линии, т. е. механизм, преобразующий вращательное движение приближенно к прямолинейному движению. Он состоит из шарнирного четырехсторонника, в котором звено, противоположное неподвижному, представляет собой прямоугольник с равными катетами. На концах одного из катетов находятся шарниры, которыми это звено связывается с боковыми звеньями четырехсторонника, конец же другого катета описывает кривую, чрезвычайно мало отличающуюся от прямой. Одно из боковых звеньев четырехсторонника, производя полные обороты (непрерывное вращение), приводит механизм в движение. Соотношения между длинами звеньев определены Чебышевым строго математически.

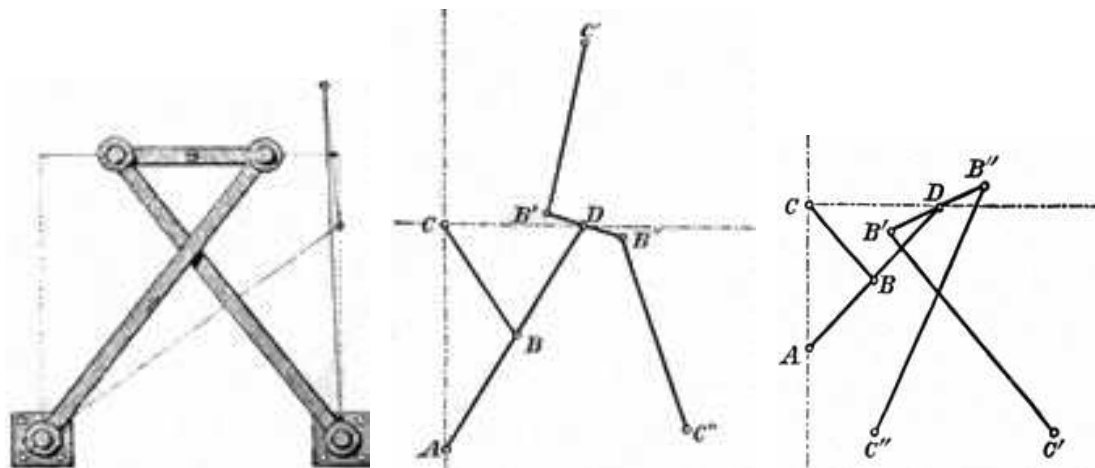
---

<sup>1</sup> Структурный анализ механизмов (электронный ресурс). См.: <http://www.nugu.ru/tmm/007.htm>

1-й вид	2-й вид	3-й вид	4-й вид	5-й вид
Вид группы Ассур II класса $n = 2, p_5 = 3$ (двухпроводковая)	Обозначение	Реализация	Формула строения механизма	
<b>Первый вид</b>  $W = 0$	$II_{1(2,3)}$	<b>Шарнирный четырехзвенник</b>  $W = 1$	Механизмы II класса	$I_{(0,1)} - II_{1(2,3)}$
<b>Второй вид</b>  $W = 0$	$II_{2(2,3)}$	<b>Кривошипно-ползунный механизм</b>  $W = 1$		$I_{(0,1)} - II_{2(2,3)}$
<b>Третий вид</b>  $W = 0$	$II_{3(2,3)}$	<b>Кривошипно-кулисный механизм</b>  $W = 1$		$I_{(0,1)} - II_{3(2,3)}$
<b>Четвертый вид</b>  $W = 0$	$II_{4(2,3)}$	<b>Тангенсный механизм</b>  $\varphi < 90^\circ$ $B = a \cdot \operatorname{tg} \varphi$ $W = 1$		$I_{(0,1)} - II_{4(2,3)}$
<b>Пятый вид</b>  $W = 0$	$II_{5(2,3)}$	<b>Синусный механизм (механизм двойного ползуна)</b>  $a = r \cdot \sin \varphi$ $W = 1$		$I_{(0,1)} - II_{5(2,3)}$

**Рис. 1.22.** Структурные группы II класса (обычно называемые двухпроводковыми группами Ассур), дополнительно классифицируемые по видам, различающимся сочетанием вращательных и поступательных пар. Класс и порядок механизма определяются классом и порядком наиболее сложной группы, входящей в его состав. Структурный анализ механизма проводится путем расчленения его на структурные группы и первичные механизмы в порядке, обратном образованию механизма<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Там же.



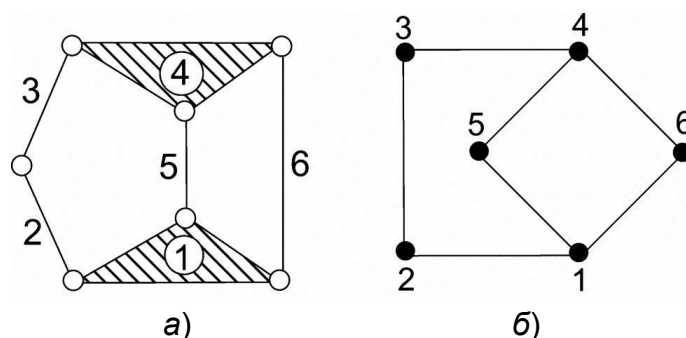
**Рис. 1.23.** Параллелограмм Чебышева

В последней четверти XIX века, наоборот, чрезмерное увлечение математическими упражнениями, оторванными от технической практики, привело к известному отчуждению техников от теоретиков, по мнению которых физическое и инженерное мышление угнеталось формальными математическими рассуждениями. Редакции многих технических журналов не хотели принимать к публикации статьи математического содержания, потому что результаты их зачастую противоречили действительности. Однако необходимость использования математических методов не оспаривалась, речь шла о разработке и применении таких методов, которые давали бы средства решения практических технических задач. Однако в развитии теории механизмов и машин настал такой момент, когда в ней был поставлен вопрос о математизации этой теории в целом, переведший ее из разряда прикладных наук в разряд наук фундаментальных.

Причем для решения задачи математизации потребовалась некоторая модификация обобщенной теоретической схемы, введенной Ассуром. Добровольский распространил принцип построения цепей, выработанный Ассуром для плоских механизмов, на любые пространственные механизмы. И.И. Артоболевский поставил в качестве цели исследования опыт создания единой теории структуры кинематических цепей: «В учении об элементах почти не делалось попыток установить связь и преемственность методов структурного анализа с методами кинематического и динамического анализа. Отсутствие подобной преемственности методов нам кажется существенным недостатком. Структурный анализ, кроме самостоятельных целей, имеет задачей дать исчерпывающий ответ на вопрос о наиболее рациональных методах кинематического и динамического анализа механизмов. Если подходить к вопросам структурного анализа с этой

точки зрения, то необходимо пересмотреть и уточнить некоторые основные понятия и определения, относящиеся к теории структуры кинематических цепей» [52, с. 195, 196].

Каждый механизм стал рассматриваться как кинематическая цепь, состоящая из одного или нескольких замкнутых контуров и нескольких замкнутых цепей, предназначенных для присоединения звеньев контура к основным звеньям механизма. Для того чтобы образовать из контура-ядра новые механизмы, принадлежащие к данной группе, необходимо присоединить к нему поводки и ветви. В результате проведения такой классификации выяснилось, что механизмы одного и того же рода исследуются идентичными методами. Это позволило создать общую теорию кинематических цепей с развитым слоем функциональных схем, в качестве которых могут выступать, например, схемы теории графов (рис. 1.24). В теории механизмов появилась возможность получать новые конструктивные схемы механизмов дедуктивным способом. «Наиболее часто используемыми для этого средствами являются теория графов, теория групп и матричные представления» [54]. Составление эквивалентной топологической схемы механизма является важным этапом структурного синтеза кинематических цепей [54].



**Рис. 1.24.** Соответствие между кинематической цепью (a) и графом (b)

Таким образом, в работах Добровольского и Артоболевского впервые было осуществлено проецирование теоретической модели на класс потенциально возможных (гипотетических) технических систем определенного типа — механизмов. Сам Артоболевский следующим образом характеризует полученные результаты:

«1. Законы структурного образования являются общими для всех механизмов.

2. Анализ общих законов структуры механизмов позволяет установить все возможные семейства и роды механизмов, а также создать единую общую классификацию механизмов.

3. Структурный и кинематический анализ механизмов одного и того же семейства и класса может быть проведен аналогичными методами.

4. Проведенные исследования показывают, что современная техника использует очень малое количество механизмов. Предлагаемый метод структурного анализа дает возможность обнаружить огромное число новых механизмов, до сих пор не применявшихся в технике. Эти новые виды механизмов могут быть рекомендованы к использованию на практике» [55, с. 65].

Дальнейшее развитие этой технической теории шло по пути разработки все более обобщенной теоретической схемы, ее развертывания в соответствии с заданными принципами.

Во-первых, она была распространена на новые типы конструктивных элементов — пространственные механизмы (рис. 1.25), «жидкие» звенья и т. д.

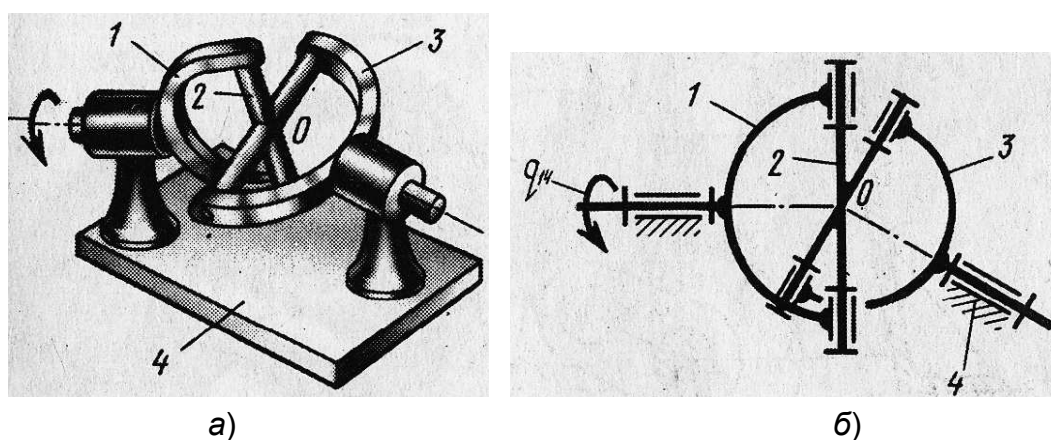


Рис. 1.25. Пример пространственного механизма (а) и его кинематической схемы (б)<sup>1</sup>

Во-вторых, кинематическое представление — структурные схемы теории механизмов — было распространено на двигатель и орудие: машина — это механизм в работе, машина на холостом ходу — механизм. Двигатель и орудие рассматриваются в этом случае как двигательный и исполнительный механизмы (рис. 1.26).

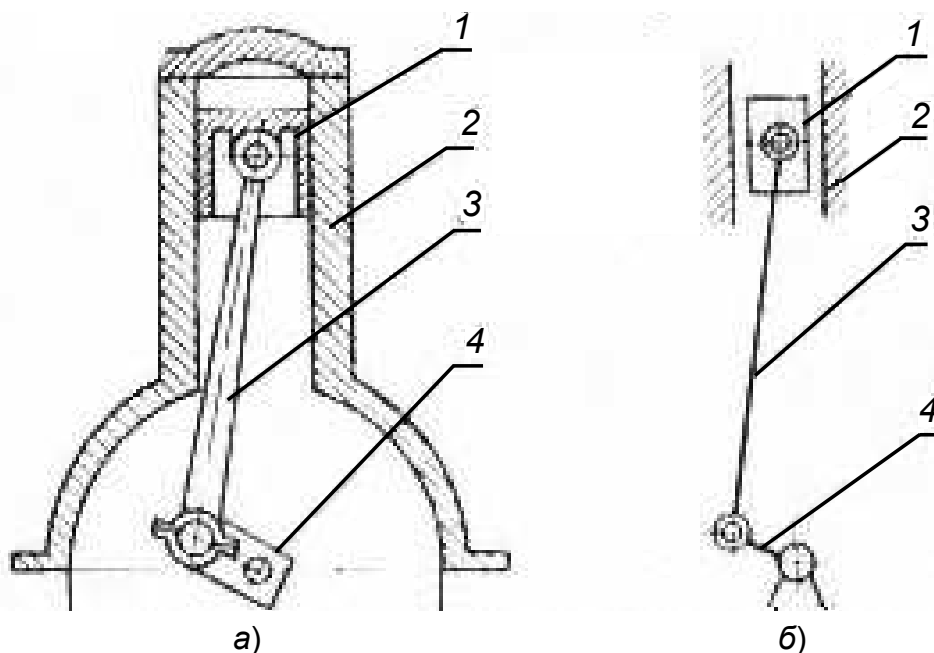
Поршень внутри цилиндра совершает возвратно-поступательное движение. Кривошип с валом представляют собой шарнирное соединение стержня с неподвижной опорой<sup>2</sup>.

В-третьих, методы и теоретические схемы динамики были распространены на исследование передаточных механизмов, т. е. движение механизмов и машин стало рассматриваться также и с учетом

<sup>1</sup> Составление кинематических схем и структурный анализ плоских механизмов: Методические указания к выполнению лабораторной работы №2 по дисциплине «Теория механизмов и машин» для студентов механических специальностей всех форм обучения / сост. Н.И. Флусов, А.Ю. Дерипас. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2008, с. 8.

<sup>2</sup> <http://stroy-technics.ru/article/elementy-teorii-mekhanizmov-i-mashin>

действующих на них сил. Именно поэтому данная теория получила название «Теория механизмов и машин».



**Рис. 1.26.** Схема механизма двигателя внутреннего сгорания:

*а* — конструктивная схема механизма двигателя внутреннего сгорания;

*б* — его кинематическая схема; 1 — поршень,

2 — неподвижный цилиндр, 3 — шатун, 4 — кривошип

Доказательством универсальности построенной Добровольским и Артоболевским теоретической модели и правильности выводов из нее явилась сама инженерная практика. Модель оказалась весьма действенным инструментом в руках конструкторов: созданная система позволила облегчить создание новых механизмов, вооружила конструкторов научно-обоснованными методами проектирования механизмов. Однако при синтезе новых механизмов нельзя ограничиваться лишь структурным синтезом на основе исследования возможных сочетаний кинематических пар, образующих такие вновь синтезированные цепи, важно учесть всевозможные конструктивные параметры и функциональное назначение механизмов, т. е. перейти от функциональных и поточных к структурным (конструктивным) схемам. Для этих целей был привлечен и соответствующий математический аппарат: теории приближенных функций, матрично-тензорный анализ, винтовое исчисление и другие разделы современной математики [55].

Следует, однако, отметить, что несмотря на то что был достигнут значительный прогресс в разработке общих методов геометрического анализа и классификации механизмов различных типов, кинематический синтез все еще в значительной степени является вызовом

для современной теории механизмов и машин. «Рациональные методы синтеза механизмов все еще неясны... Аналитические методы существуют для некоторых специальных видов механизмов... но не в общем виде...». Хотя сегодня для решения задач кинематического синтеза привлекаются методы компьютерного моделирования, теоретические решения остаются все еще непрактичными [56]. Задачи теоретического синтеза новых технических систем, как правило, сводятся к анализу уже существующих образцов или отдельных классов таких систем.

Рассмотрим теперь, как эти исторически сложившиеся точки зрения на машину реализуются в представлениях о наномашине в современной нонотехнонауке.

### 1.2.6. Наномашина как «механический механизм»

Так как реализация наномашин может быть совершенно иной, чем в классическом машиностроении, то для их теоретического описания наиболее подходящей является кинематическая (а не конструктивная, более тесно связанная с представлениями макромира) точка зрения на машину.

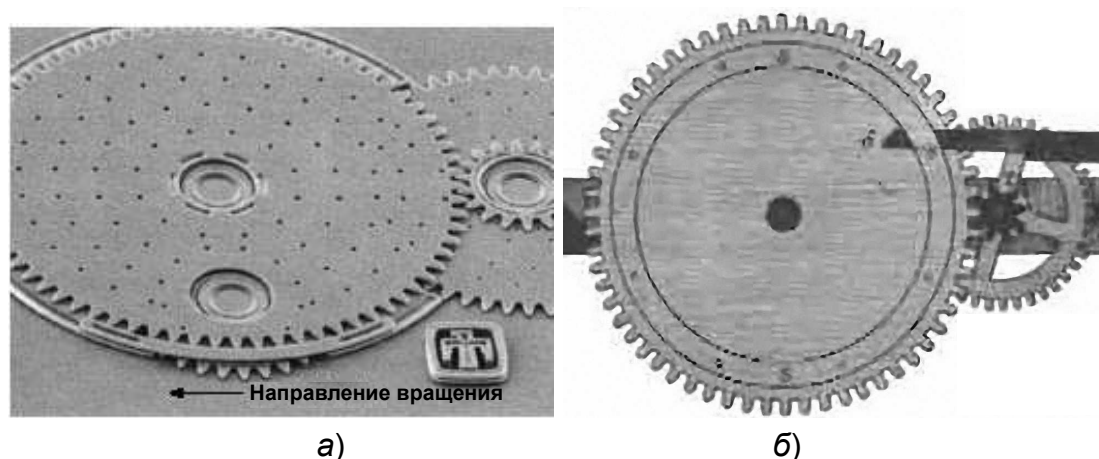
Понятие «чистого» механизма, введенное в теории механизмов и машин Виллисом, является, по нашему мнению, важным для нанотехнологии, поскольку абстрактная («чистая») механическая модель может дать более или менее адекватное представление о наносистемах, но «конструктивная» версия наносистем является совершенно отличной от конструкции макромеханических систем.

Дрекслер начинает с традиционного определения машины: «Именно так, как обычные орудия могут составить обычную машину из этих частей, молекулярные орудия будут связывать между собой молекулы для получения крошечных механизмов, машин, рычагов... и собирать их для создания сложных машин» [57]. Таким образом, функции, выполняемые отдельными частями молекулярного машинного оборудования, также являются, в сущности, механическими.

«Чистый механизм в принципе имеет дело с формой и движением машины...» [58]. В свою очередь чистым движением, описываемым в «чистом» механизме, адекватны типовые конструктивные элементы (ведущее и ведомое звенья) и связи между ними (соприкосновение качением, скольжением и т.д.) «конструктивного» механизма. «Кинематика — наука о чистом движении — связана с анализом и синтезом механизмов, составленных из связанных твердых эле-

ментов. Она имеет дело с относительными геометрическими перемещениями точек и связей механизма безотносительно к силам, которые породили эти перемещения, или к физическому воплощению, которые его реализуют» [59, с. 719].

*Жесткая машина Дрексlera* как наноустройство также фабрикуется из твердых движущихся частей, зубцов, подшипников, поршней и распределительных валов. Они имеют приемник или *машину-двигатель* (молекулярный мотор), передаточный механизм (рис. 1.27) и машину-орудие. Последняя может представлять собой, например, небольшой резец с нанокристаллическим алмазом режущих ребер.



**Рис. 1.27.** Микроснимок поликристаллического микропередаточного механизма, выполненного с помощью сканирующего электронного микроскопа (а)<sup>1</sup>, и изображение механизма, взятое из Энциклопедии Дидро (б)<sup>2</sup>

Одна из главных проблем, возникающих на наноуровне, — изгибание режущего инструмента и невозможность резать маленькими кусочками на низкой скорости. Следовательно, особое внимание должно быть уделено конструированию жесткого орудия и предотвращению скругления кромки орудия, если оно изначально было прямолинейным. Это можно преодолеть с помощью покрытия маленьких резцов нанокристаллическими алмазами, которые имеют множество режущих граней, сохраняющих контакт с рабочей поверхностью, даже если происходит закругление режущего инструмента.

Несовместимость алмаза с железистым материалом можно избежать, покрыв нанокристаллический алмаз тонким слоем компаунда, который имеет минимальный термодинамический потенциал для растворения.

<sup>1</sup> Springer Handbook of Nanotechnology. B. Bhushan (Ed.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2004, p. 226.

<sup>2</sup> Diderots Enzyklopädie. Die Bildtafeln 1762 – 1777. Zweiter Band. Augsburg: Weltbild Verlag 1995, s. 943.



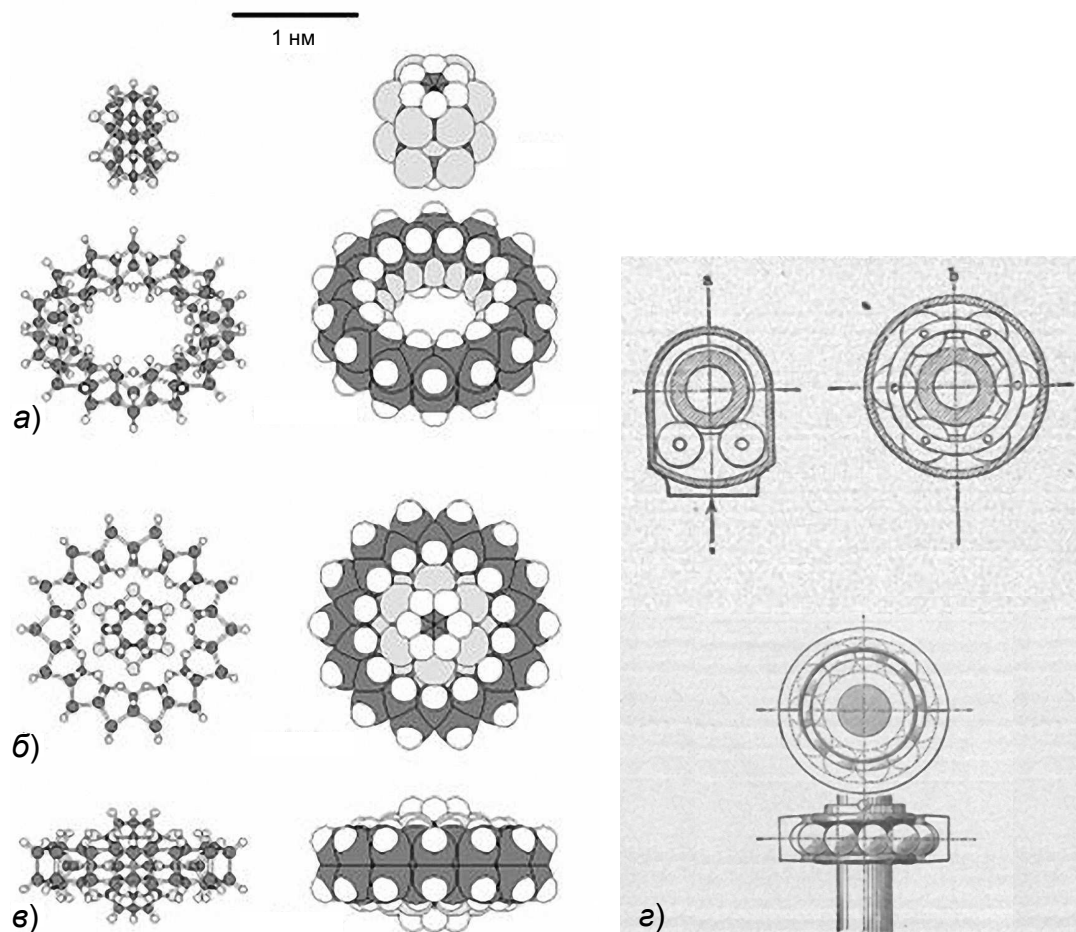
Данное направление дает начало использованию многослойных покрытий, которые имеют такие полезные преимущества, как теплопроводность, позволяющая выводить тепло из зоны резания и редуцировать генерацию тепла, выделяющегося при трении, за счет использования мягкой углеродной прослойки смазывающего покрытия [60].

Другой пример машины-орудия — наношетка, сделанная из углеродных нанотрубок. Группа ведущих ученых предварительно продемонстрировала, каким образом можно выращивать углеродные нанотрубки под контролем, а затем использовала это для создания наношетонок, имеющих форму зубных щеток, щеток для чистки бутылок и хлопковой почки. Во многих электрических моторах используются металлические щетки для проведения электричества к их вращающимся частям. Эти щетки могут быть также использованы для уборки нанопыли, раскрашивания наноструктур и даже для очистки воды от загрязнений.

Дрекслер пишет: «комбинация подшипника и оси обеспечивает возможность расширения систем машин с механическим приводом. Внешняя поверхность подшипника дает возможность *передаточного механизма на молекулярном уровне*. Контролируемое круговое движение вокруг оси внутри кольца вместе с понятием расширенной системы машинного оборудования наводит на мысль о *контролируемых молекулярных транспортировке и позиционировании*, которые необходимы для продвинутого *механосинтеза*» (рис. 1.28) [61].

В нанотехнологии созданные человеком наномашинны получают иные наномеханические конструкции: химические структуры или подражание функциям биосистем. «Изоощренные *моторы молекулярного уровня* были развиты в природе, где они используются в практически важных биологических процессах. Напротив, *разработка синтетических наномоторов, которые имитируют функционирование этих удивительных естественных систем и могли бы быть использованы в искусственных наноустройствах*, находится еще на детском уровне. Построение моторов на наноуровне не является просто задачей перенесения проектирования двигателей макромира на нижние уровни в область наноразмеров. Многие факторы характеристик, такие как трение, тепловое рассеяние и многие другие механические характеристики, являются совершенно различными на каждом из этих уровней — все находится в постоянном движении (с помощью кинетической энергии, доставляемой нагревом окружающей среды) и протискивается между другими атомами и молекулами (броуновское движение)... В природе биологические моторы используют каталитические реакции для создания сил на базе химических изме-

нений. Эти моторы не требуют таких внешних источников энергии, как электрические и магнитные поля. Вместо этого входящая энергия доставляется локально и химически. Несмотря на впечатляющий прогресс последних лет искусственным наномашинам все еще недостает эффективности и скорости их биологических дубликатов.



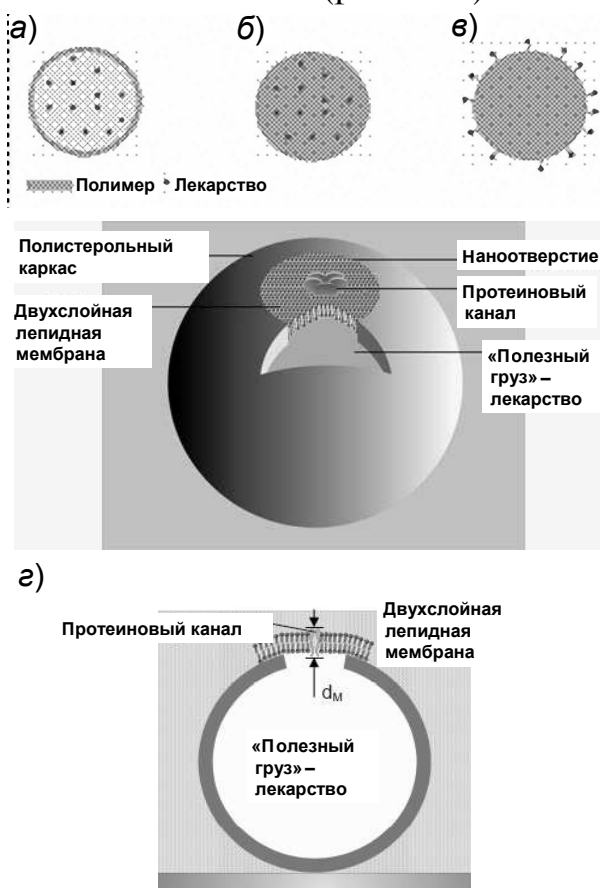
**Рис. 1.28.** Объемное изображение (а); осевая проекция (б); вид сбоку “молекулярного подшипника” (в); изображение обычного механического подшипника (г) [62]

Новые исследования демонстрируют, что введение нанотрубок в платиновый компонент металлических проводников ассиметричных моторов приводит к впечатляюще ускоренному движению в растворах перекиси водорода со средней скоростью 50–60 микрон в секунду...

В отличие от существующих сегодня биметаллических нанопроволок... введение углеродных нанотрубок в такие моторы приводит к существенному ускорению и высокой эффективности их работы. Эти новые возможности дают большую надежду использования *синтетических наномашин*, приближающихся по своим параметрам к биологическим наномоторам... Такие высокоэффективные нано-

моторы позволяют транспортировать “тяжелые” грузы, перемещать в условиях физиологической среды и создавать более изощренные наносистемы, выполняющие сложные задачи» [63].

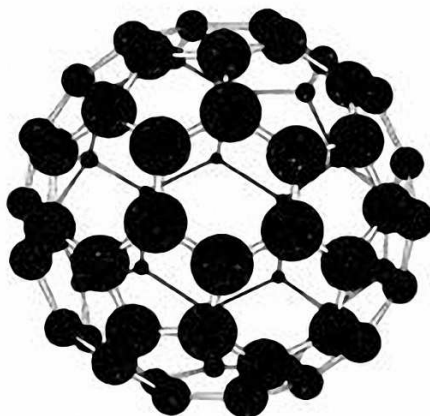
Подобно тому, как Гартиг определяет механизм по аналогии с пустой тачкой, а работающую тачку, наполненную землей, называет машиной, в нанотехнологии так же, — если макромолекула фуллерена используется для транспортировки лекарств в кровеносных сосудах, то она становится машиной (рис. 1.29).



**Рис. 1.29.** Системы доставки лекарств в искусственно созданных наноконтейнерах

На рисунке сверху показано схематическое представление трех основных типов такого рода «тачек», или «глубоководных аппаратов», состоящих из полого носителя, загруженного лекарством (а), «переносчика», заполненного внутри вяжущим веществом, в которое введен «полезный груз» (б), и транспортировщика с прикрепленным с внешней стороны лекарством (в). Ниже дано схематическое представление гибридного наноконтейнера (г), состоящего из герметичного полого полимерного каркаса с небольшим отверстием и полезным грузом — лекарством внутри него. Синтетическая двухслойная липидная мембрана с вырезанным каналом герметизирует это отверстие [64].

Молекула фуллерена  $C_{60}$ , компьютерная модель которого приведена на рис. 1.30, иногда рассматривается как однонаправленный ротор («точка») для транспортировки отдельного электрона от источника к стоку. После первой попытки Кристиан Йохим и его исследовательская группа сообщили о создании ненаправленного ротора. Для транспортировки отдельного электрона от источника к стоку они использовали колебания молекулы  $C_{60}$  между электродами. Несимметричное положение молекулы позволяет контролировать вращательное движение. «Точка состоит из ротора ( $C_{60}$ ), статора и шарового шарнира (атом рутения). Сам корпус является металло-органической структурой, имеющей форму трехстержневого фортепьянного стула» [47]. Но эта же молекула может быть описана и как рабочий инструмент для мезомашин-орудий — шпиндель, который вращает режущий инструмент с чрезвычайно большой скоростью. «Шпиндель воздушной турбины с интегрированным газовым подшипником является возможным решением для получения чрезвычайно высокой скорости шпинделя» [60].



**Рис. 1.30.** Структура молекулы фуллерена  $C_{60}$ <sup>1</sup>

В докладе политехническому обществу 2 ноября 1907 г. «Что такое: принцип, система, конструкция в машинах» П.К. Энгельмейер сравнивает эти три точки зрения на машину: «Технология определяет характер той работы, которую от машины потребует практика. Для технологии все равно, как осуществить эти условия. Затем вступает в свои права кинематика и предписывает, каким механизмом надлежит осуществить нужные движения. Наконец, входит машиностроение с конструктором во главе и вырабатывает машину во всех деталях. Стало быть, для того чтобы осуществить требования техно-

<sup>1</sup> Эта молекула получила название фуллерена  $C_{60}$  по имени архитектора Р. Бакминстера Фуллера, сконструировавшего геодезический свод, напоминавший структуру  $C_{60}$  (см. *Пул-мл. Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2006, с. 106–108*).

логические, надо осуществить требования кинематические, а для того чтобы осуществить эти последние, надо осуществить требования конструктивные. Другими словами: конструкция машины зависит от кинематической схемы, а эта последняя зависит от технологического принципа машины».

Далее он выделяет принцип, систему, конструкцию всякой машины. «Принцип машины, т. е. ее основная суть, определяется технологическими признаками, система определяется кинематической схемой, а конструкция определяется совокупностью и расположением деталей машины».

Итак, конструкция — это вещественное выполнение машины во всех деталях. При рассмотрении же системы машин интересуются не всеми деталями, а лишь существенными для системы. Говоря о принципе, обращают внимание на еще меньшее число самых важных рабочих органов. «Какой разряд машин мы бы ни взяли, везде мы различаем, во-первых, принцип, характеризующий целый тип или разряд машин, во-вторых, разные системы, составляющие подотделы типа и, наконец, в-третьих, конструкции, составляющие вещественное осуществление принципа и системы; при этом один данный принцип повторяется в целом ряде систем, а одна система повторяется в ряде конструкций» [65, с. 404—405].

Таким образом, рассмотренная с конструктивной стороны машина есть конкретное явление, из которого мы выносим конкретное представление. (То есть Энгельмейер рассматривает здесь конструкцию не просто как конкретную вещественную структуру машины, а как ее конкретное представление в теории.)

Система машины — это уже конкретное понятие, получающееся в результате первого обобщения или отвлечения. Обобщая целый ряд систем (как конкретных понятий), мы получаем абстрактное понятие — принцип машины. Это путь индуктивный. Он применяется, по мнению Энгельмейера, тогда, когда наука еще только создается. Когда же она уже создана, то ее излагают дедуктивным способом: сначала основные принципы, затем частные законы как развитие этих принципов и, наконец, отдельные факты как иллюстрации к законам.

Для наномашин мы можем применить только абстрактную идею — *принцип машины*, характеризующий целый класс или категорию такого рода машин, но не такую же конструкцию, как в классических механических макромашинах.

Мы в принципе представляем в нашей повседневной жизни машину как некое механическое устройство и проводим резкое различие между механизмом и машиной. Однако наноустройства, такие,

например, как «молекулярный мотор», преобразующий химическую энергию в механическую, могут существовать в виде природной формы, но использоваться для «перемещения бактерий». В этом случае организм описывается как специфическая сложная машина.

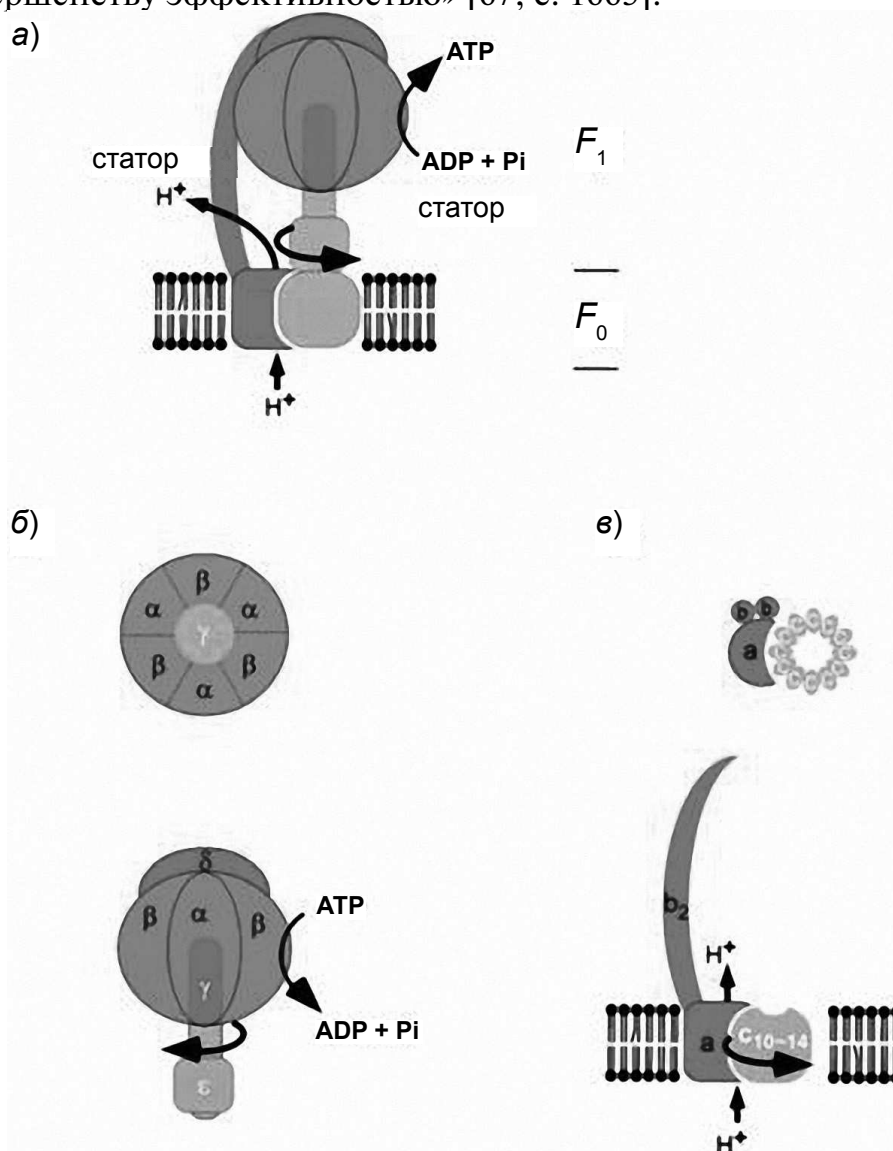
Стандартное определение наномашин — как *механического и электромеханического устройства*, размеры которого измеряются в нанометрах — в большей степени соответствует понятию машины как механического механизма. Однако наномашин могут быть рассмотрены не только как наномеханические устройства, но и как, например, наноэлектрические переключатели в наносхемах. Наномашин может быть, таким образом, симбиозом природного объекта и искусственного устройства.

«Молекулярные компоненты клетки описываются как орудия или машины, функционирующие на микромолекулярном уровне: рибосомы являются сборочными конвейерами, миозины — моторами, полимеразы — копировальными устройствами, протеазы... бульдозерами, мембраны — электрическим экранирующим ограждением и т.д. Хотя биологи в принципе и согласны с тем, что живые системы являются продуктом эволюции, а не проектирования, они описывают их как устройства, созданные для выполнения специфических задач» [57].

В нанотехнологии пытаются понять и использовать принципы, лежащие в основе природных процессов. Причем необязательно проводить редукцию биологического к физическим представлениям, как этого требовали неопозитивисты, считая физическое знание наиболее развитым и поэтому основополагающим по отношению к другим видам знания. В нанотехнологии все происходит иначе. Например, две исследовательские группы физиков и биологов попытались совместно изучить механизм действия единичного биологического наномотора в липидных мембранах, что потребовало в ходе такого междисциплинарного исследования решать проблему концептуального диалога в нанобиотехнологии, причем с ориентацией на получение, по сути дела, инженерных результатов. В ходе исследования в энзиме, ответственном в мембране митохондрии (маленьком сферическом или палочковидном теле, связанном двойной мембраной в цитоплазме большинства клеток) за производство энергии, были выделены два типа биомоторов: мотор  $F_0$  — турбина, приводимая в движение потоком протонов, и мотор  $F_1$  — высокоэффективный преобразователь химической энергии в механическую, который может производить вращение посредством гидролиза аденозинтрифосфата (АТФ). «Оба мотора непосредственно связаны, но движутся в противоположных направлениях... Размер всего энзи-

ма — примерно 10 нм в диаметре и 20 нм в высоту, что на три порядка меньше современных искусственных ротационных машин» [66, с. 41–43].

АТФ-синтаза рассматривается в этом случае как ротационная машина, которую в биологическом мире можно обнаружить в жгутиковом моторе бактерии (рис. 1.29). «Вращение изолированного мотора  $F_1$ , приводимого в движение АТФ-гидролизом, непосредственно наблюдалось с помощью оптического микроскопа, что позволило раскрыть его удивительное функционирование. Этот мотор вращается отдельными шагами в  $120^\circ$ , причем каждый из них приводится в движение с помощью гидролиза одной АТФ-молекулы с близкой к совершенству эффективностью» [67, с. 1665].



**Рис. 1.31.** Схематическое изображение АТФ-синтазы: *а* — вид сбоку на АТФ-синтазу; *б* — поперечное сечение и вид сбоку мотора  $F_1$ . Цилиндр гидролиза АТФ создает вращение против часовой стрелки части ротора, состоящей из элементов; *в* — поперечное сечение и вид сбоку мотора  $F_0$

АТФ-синтаза состоит из моторов  $F_1$  и  $F_0$ , расположенных на общем вращающемся валу (светло-серый цвет). Стержень статора соединяет эти два мотора (темно-серый и темный цвет) так, чтобы не было скольжения. Мотор  $F_0$  порождает крутящий момент, принуждающий посредством потока протонов мотор  $F_1$  синтезировать АТФ. Направление вращения — по часовой стрелке со стороны мембраны. Поток протонов сопровождает движение кольцевой структуры по часовой стрелке, создавая 10–14 копий элемента  $v$ .

Механические аналогии в науке часто критикуют как механицизм. Однако в истории науки существует множество примеров успешного применения механистической методологии для объяснения природных явлений. «Механизм — это не то же самое, что редукционизм. Механическое объяснение, в особенности в биологии, необязательно дается с физико-химической точки зрения ... Механицисту ничего не препятствует понимать организмы или их группы как организованные целые, но при этом он исходит из представления и автомобиля — парадигматического механического устройства — как организованного целого». Что же такое механизм? «Пружинные часы с механическим приводом рассматриваются в качестве парадигматического примера механизма. Действительно, многие оппоненты механицизма ... исходили из стратегии приписывания механизму такой ограничительной характеристики, а затем выдвигали в качестве аргумента тот факт, что некоторые явления не могут быть объяснены с этой точки зрения. Но, насколько я понимаю, сущностью механизма не являются такие ограниченные характеристики. Современные электронные часы, построенные на миниатюрной электронной схеме, не являются менее механическими, чем старые пружинные часы с гирей ... В биологии групповой отбор является весьма убедительным механизмом эволюционных изменений, даже если так не думали тридцать лет назад» [68, с. 185–188].

Механическим объяснением является и модель электрических частичек и вихрей, с помощью которой Максвелл объяснял свойства электромагнитных полей. Он развивает «механическую модель электромагнитных полей на основе эфирных вихрей и частичек трения, которые должны обеспечивать передачу движения молекулам эфира. Во всех этих механических аналогиях Максвелл видел, однако, полезное вспомогательное средство для лучшего понимания его представления об электродинамике и говорил о том, что они носят временный характер» [69, с. 32–33]. Он заменил вихри дифференциальными ячейками упругой среды и доказал, что в новой модели представлены все существенные черты электростатических взаимодействий.



Именно представление фарадеевых линий силы в виде тончайших трубочек с изменяющимся поперечным сечением, в которых протекает идеальная несжимаемая жидкость, послужило ему эвристическим средством для переноса математических уравнений из механики сплошных сред в электродинамику. Эти вихревые линии, по словам самого Максвелла, «образуют трубчатую поверхность, называемую вихревой трубкой или вихревой нитью» [70, с. 146–147, 149–150]<sup>1</sup>. Таким же, по сути дела, механистическим объяснением биологических систем оперирует сегодня и нанотехнология.

### **1.3. Теория электрических цепей и сетей – логика, математика, техника**

Задача теоретического описания электрических цепей была связана с усложнением инженерных задач по их расчету и проектированию, где оказалось недостаточно тех средств, которые были развиты в классической электродинамике и теории электричества. «Теория цепей как самостоятельная дисциплина со своими собственными представлениями и методами возникла из общей электромагнитной теории задолго до 1914 г. Уже прочно утвердилось рассмотрение цепи как системы с идеализированными сосредоточенными элементами – изображения банки и реостата были вытеснены привычными теперь для нас графическими символами» [71, с. 869].

Развитие теоретических представлений в этой области потребовало введения новых идеализаций. «Так, первые схемы электрических цепей представляли собой условные упрощенные изображения реальных электрических устройств, зарисовки схем соединения в электротехнических установках катушек индуктивности, конденсаторов, приемников, измерительных приборов, генераторов и т. д. Эти схемы использовались как вспомогательные знаковые изображения, позволяющие строить векторные диаграммы процессов в электротехнических установках с учетом устройства последних. Они обеспечивали при расчете согласование данных, получаемых из векторных

---

<sup>1</sup> Движение в некоторый момент каждой части жидкости, заключающей вихревые кольца, можно точным образом представить себе, вообразив, что некоторый электрический ток занимает место каждого вихревого кольца, причем сила тока пропорциональна напряжению кольца.


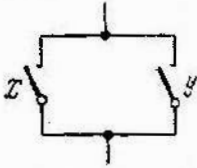
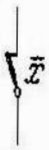
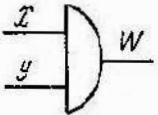
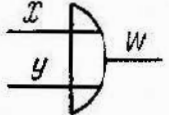
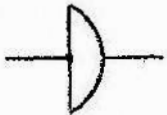
диаграмм, со значениями токов и напряжений, измеряемыми непосредственно на электротехнических устройствах и входящими в техническое задание» [72, с. 101]. Важным аспектом осознания системности в теории цепей и в инженерной практике становится создание и постоянный рост больших телеграфных и энергетических сетей<sup>1</sup>. «Доминирующая до конца XIX столетия сильноточная электротехника (машиностроительный период развития электротехники) была в основном ориентирована на практический опыт описания электрических цепей и поэтому не могла решающим образом помочь развитию теории электрических цепей... Впервые в начале нашего столетия быстро развивающаяся слаботочная электротехника (телефония и беспроводная телеграфия) дала решающий импульс становлению самостоятельной теории электрических цепей и стала в этом виде исходным пунктом для многочисленных математических подходов» [73, с. 26].

В структуре любой научной теории, как уж неоднократно подчеркивалось выше, в том числе и в технических науках (технической теории) наряду с концептуальным и математическим аппаратом важную роль играют теоретические схемы, образующие своеобразный внутренний скелет теории. Эти схемы представляют собой совокупность абстрактных объектов, ориентированных, с одной стороны, на применение соответствующего математического аппарата, а с другой — на мысленный эксперимент, т.е. на проектирование возможных экспериментальных ситуаций (в технических науках — технических систем). Это — особые идеализированные представления (теоретические модели), которые часто выражаются графически (геометрически) или логически. В технике такого рода графические изображения играют еще более существенную роль, чем в естественной науке, поскольку одна из особенностей инженерного мышления заключается в оперировании схемами и модельными представлениями. Именно такие изображения и были развиты в теории электрических цепей.

Наиболее наглядной моделью реализации логико-математических операций в современной технике стали релейно-переключающие схемы. На рис. 1.32 приведены основные логические элементы и соответствующие им логические операции [74, с. 197].

---

<sup>1</sup> «Под сетью следует при этом понимать совокупность нескольких связанных электрических цепей или «ячеек» (контуров), каждая из которых состоит из омических, индуктивных и емкостных элементов» (см. Карсон Д.Р. Электрические нестационарные явления и операционное исчисление. Харьков: Гос. науч.-техн. изд-во Украины, 1934, с. 11).

Название	Звено „И“	Звено „ИЛИ“	Звено „Не“																																				
Реле																																							
Переключа- тельная функция	<table><tr><th>X</th><th>Y</th><th>W</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	X	Y	W	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	<table><tr><th>X</th><th>Y</th><th>W</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	X	Y	W	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	<table><tr><th>X</th><th>W</th></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	X	W	0	1	1	0
X	Y	W																																					
0	0	0																																					
0	1	0																																					
1	0	0																																					
1	1	1																																					
X	Y	W																																					
0	0	0																																					
0	1	1																																					
1	0	1																																					
1	1	1																																					
X	W																																						
0	1																																						
1	0																																						
Способ записи в алгебре пере- ключаемых схем	$X \wedge Y = W$	$X \vee Y = W$	$\bar{X} = W$																																				
Символ																																							

**Рис. 1.32.** Основные логические элементы  
и соответствующие им логические операции

И хотя использование релейно-контактных элементов для построения логических схем вычислительных машин не оправдало себя ввиду низкой надежности, больших габаритов, большого энергопотребления и низкого быстродействия, как видно из этого рисунка, релейно-контактные схемы начинают играть роль особых абстрактных объектов по отношению к их физически-конструктивной реализации в виде транзисторных схем. Они становятся посредниками между конструктивными схемами технических систем и их логико-математическим описанием. В этом смысле теория релейно-переключающих схем стала идеализированной моделью, хотя и основывающейся на анализе функционирования некоторых реальных объектов, но абстрагированной от их конкретного физического содержания.

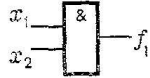
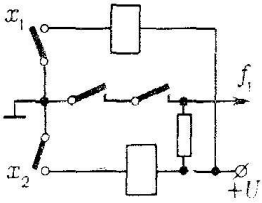
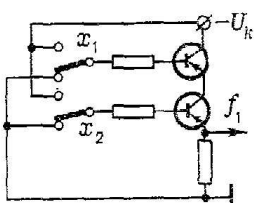

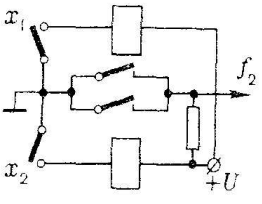
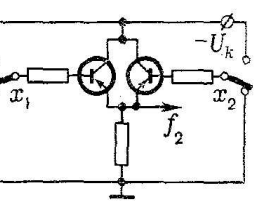
Алгебра логики переключающих схем «является орудием, которое может быть использовано для исследования сложных комбинационных и последовательных сетей с целью определения удовлетворительной схемы расположения контактов или отклонения неудовлетворительной такой схемы с минимальными затратами времени и усилий... Хотя алгебра переключаемых схем может быть ис-

пользована для проектирования простых электрических цепей, наиболее значительные успехи были достигнуты при применении этой алгебры для проектирования тех электрических схем, в которых управляющее и выходное воздействия являются сложными и взаимодействующими» [64, с. 282, 392].

Таким образом, в теории электрических цепей схематическое представление ставится в соответствие определенным алгебраическим выражениям.

В любой технической теории, как было показано во введении, имеют место *три основных слоя теоретических схем*: функциональные, поточные и структурные схемы. В теории электрических цепей эти типы схем выделяются особенно четко.

С появлением полупроводниковой техники релейно-контактные схемы в вычислительных устройствах были заменены на поставленные им в соответствие транзисторные схемы. На рис. 1.33 приведены релейно-контактные и транзисторные схемы, реализующие элементарные функции булевой алгебры.

Функция	Символическая функциональная схема	Релейно-контактная эквивалентная схема	Транзисторная схема
$f_1 = x_1 x_2$ <b>конъюнкция</b>			
$f_2 = x_1 \vee x_2$ <b>дизъюнкция</b>			

**Рис. 1.33.** Релейно-контактные и транзисторные схемы, реализующие элементарные функции булевой алгебры — конъюнкцию и дизъюнкцию<sup>1</sup>

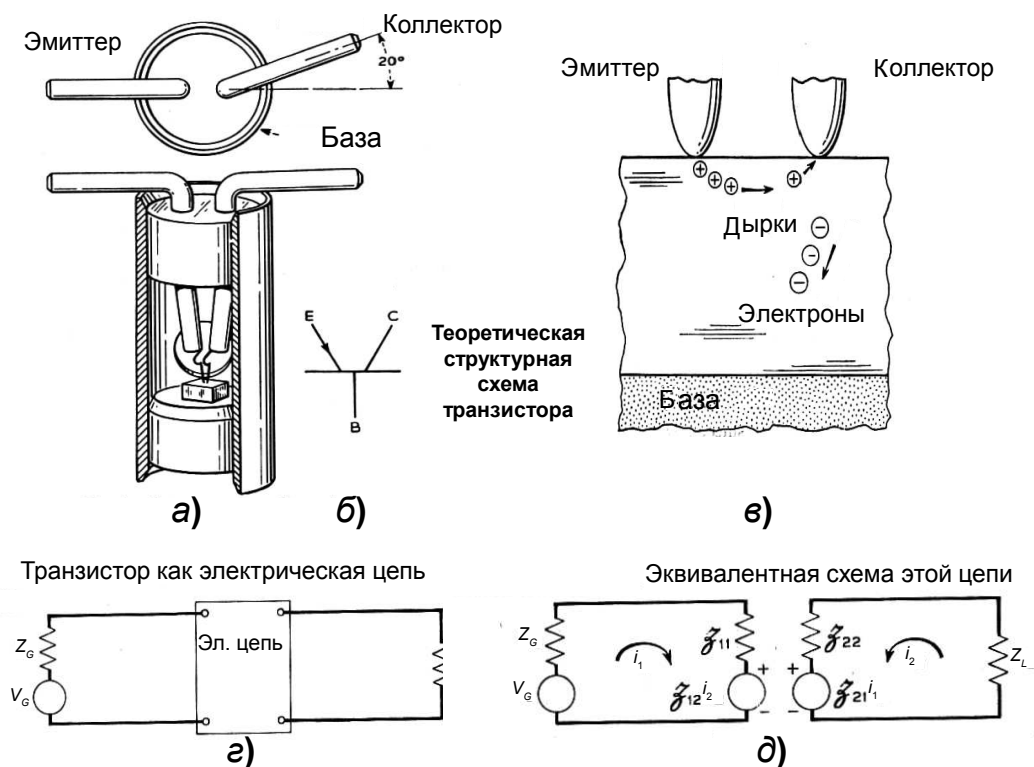
Транзисторные (*структурные*) и релейно-контактные (*поточные*) схемы, реализующие элементарные функции булевой алгебры — конъюнкцию и дизъюнкцию, представленные в виде *функциональных* схем, являются репрезентативным примером такого трехуровневого строения технической теории (рис. 1.33). В этом случае релейно-контактные схемы уже не имеют конструктивного коррелята в реальных технических системах, а представляют собой эквивалентные

<sup>1</sup> Полную такую таблицу см. Захаров В.Н., Поспелов Д.А., Хазацкий В.Е. Системы управления. М.: Энергия, 1977, с. 149.

транзисторным схемам абстрактные схемы замещения. Структурные схемы могут быть реализованы также на основе других элементов – электронных ламп, ферритовых сердечников, а позже – интегральных схем или наносхем.

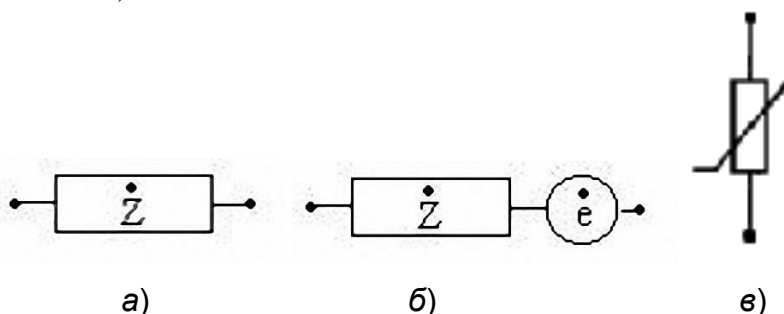
Итак, уже структурные схемы представляют собой идеализированное изображение электрической цепи, поскольку в них абстрагируются от многих частных характеристик электротехнического устройства (габаритов, массы, способов монтажа и т.д.). Эти характеристики учитывают в процессе проектирования и изготовления, т.е. в самой инженерной деятельности. На структурных же схемах указываются обобщенные конструктивно-технические и технологические параметры стандартизированных конструктивных элементов (резисторов, катушек индуктивности, батарей и т.д.), необходимые для проведения дальнейших расчетов: их тип и размерность в соответствии с инженерными каталогами, рабочее напряжение, способы наилучшего расположения и соединения, экранировка. Для теории электрических цепей подобные схемы являются исходными. Они берутся готовыми из других, более специализированных электротехнических дисциплин и подвергаются теоретическому анализу. При этом следует отличать структурную теоретическую схему от различного рода изображений реальных, встречающихся в инженерной деятельности схем, например монтажных схем, описывающих конкретную структуру технической системы и служащих руководством для ее сборки на производстве (см. пример на рис. 1.34).

Главные элементы структурной схемы в теории электрических цепей – источник электрической энергии, нагрузка (приемник электрической энергии) и связывающие их идеализированные конструктивные элементы, абстрагированные от многих параметров реальных конструктивных элементов, входящих в инженерные каталоги. Для этих идеализированных элементов структурных теоретических схем вводятся специальные условные изображения. В процессе развития элементной базы электро- и радиотехники появились новые конструктивные блоки, имеющие иную физическую основу, например цепи с распределенными постоянными, интегральные схемы и т.д. Таким образом, структурное теоретическое описание электрической цепи было обобщено на различные классы таких элементов, которые по своему внешнему виду и физической сущности оказались совершенно непохожими на их теоретические изображения. Именно так представляются так называемые распределенные элементы (например, проводники и длинные линии) в виде совокупности «концентрированных» элементов, т.е. двухполюсников. Это привело к еще большей степени идеализации таких представлений.



**Рис. 1.34.** Конструкция в разрезе (а); его теоретическая структурная схема (б); схема, разъясняющая физический механизм работы транзистора (в); эквивалентные схемы теории электрических цепей (г, д)

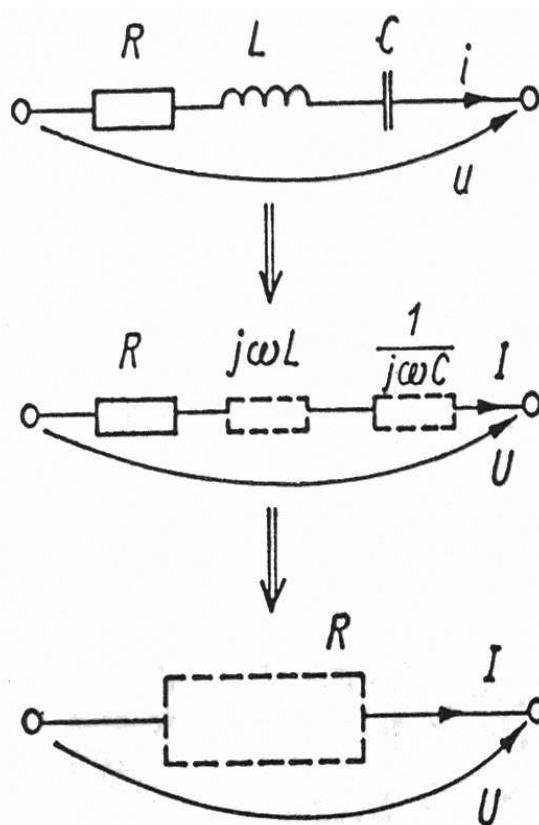
Теория двухполюсников используется для анализа сложных электрических цепей, параметры которых трудно поддаются расчетам (рис. 1.35). Двухполюсник — это система с одним входом и одним выходом, т. е. участок цепи с двумя полюсами, к которым приложена разность потенциалов и через которую течет электрический ток, — является абстрактным объектом технической теории (теории электрических цепей).



**Рис. 1.35.** Двухполюсники: а — пассивный, б — активный, в — нелинейный

Пассивный двухполюсник состоит из омического сопротивления, индуктивности или емкости или же представляет собой комплексное сопротивление (импеданс —  $Z$ ), состоящее из всех этих трех элементов вместе взятых; активный двухполюсник может быть заменен эквивалентным генератором с внутренним сопротивлением.

На примере последовательного соединения омического сопротивления, индуктивности и емкости видно, каким образом могут строиться эквивалентные схемы пассивного двухполюсника (последовательного колебательного контура, изображенного в виде двухполюсника), где индуктивность заменяется индуктивным сопротивлением, а емкость – емкостным сопротивлением. Пример упрощения системы параллельного включения омического сопротивления  $R$ , индуктивности  $L$  и емкости  $C$ , которая последовательно замещается более простыми моделями, содержащими эквивалентное индуктивное и емкостное сопротивление, а затем и одно комплексное сопротивление (как простой двухполюсник), позволяющими упростить расчет электрической цепи с помощью применения закона Ома, дан на рис. 1.36.



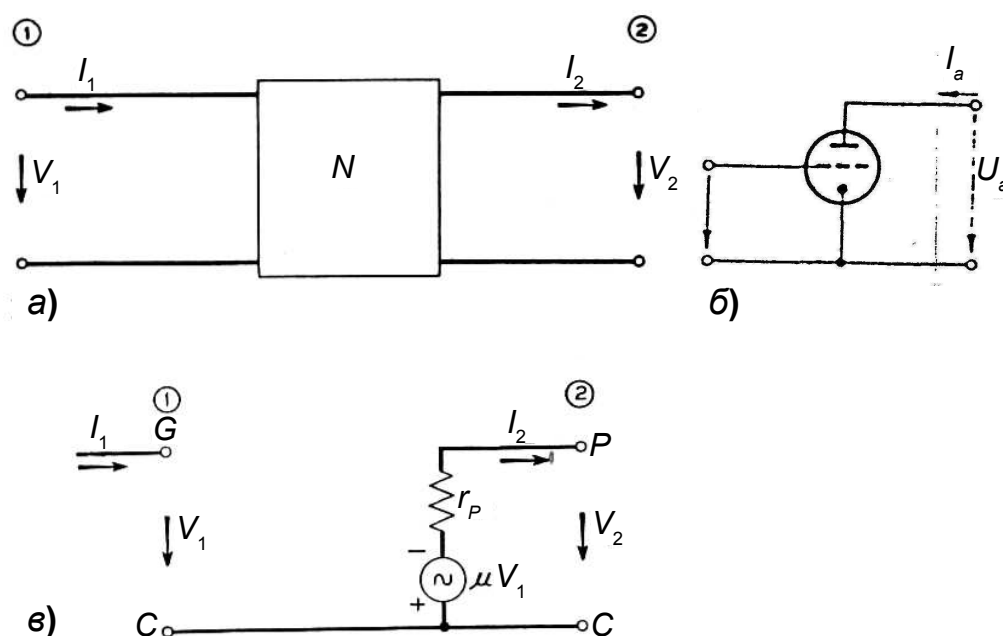
**Рис. 1.36.** Упрощенная  $RLC$ -схема электрической цепи, состоящая из параллельно включенных сопротивления  $R$ , индуктивности  $L$  и емкости  $C$ ;  $I$  – электрический ток,  $U$  – напряжение<sup>1</sup>

К двухполюсникам относятся линейные пассивные элементы электрической цепи, которые могут быть постоянными и переменными: реактивное (омическое), индуктивное и емкостное сопротив-

<sup>1</sup> См.: Wunsch G. Geschichte der Systemtheorie. Texte und Studien. Berlin: Akademie-Verlag, 1986, s. 35.

ления (получившие обобщенное название комплексного сопротивления, поскольку в реальном резисторе, конденсаторе или катушке индуктивности присутствуют все эти три типа сопротивлений) и активные двухполюсники (к таким элементам относятся прежде всего источники тока и напряжения), а также идеальный диод — ключевой элемент цепи, проводящий ток только в одном направлении, который является нелинейным двухполюсником<sup>1</sup>. У нелинейных двухполюсников вольт-амперная характеристика, т.е. зависимость проходящего через него тока от подводимого к нему напряжения, нелинейна. Для линейного двухполюсника такая характеристика — прямая линия.

Из двухполюсников состоят другие идеализированные объекты электрических цепей — четырехполюсники, т.е. системы с двумя входами и двумя выходами (рис. 1.37).



**Рис. 1.37.** Схемы эквивалентных четырехполюсников: *a* — абстрактная модель; *б* — ее реализация на основе трехэлектродной лампы; *в* — схема замещения четырехполюсника двухполюсниками<sup>2</sup>

<sup>1</sup> «Нелинейными электрическими элементами (НЭ) цепи называются элементы, параметры которых зависят от напряжений, токов, магнитных потоков и других величин. Параметры объектов, представленных электрической цепью, практически всегда нелинейны, но если степень выраженности этой нелинейности невелика, то их считают линейными. Если же пренебречь нелинейностью нельзя, то анализ процессов в цепи проводят с учетом реальных характеристик элементов (см.: [http://www.ets.ifmo.ru/usolzev/SEITEN/u1/t\\_2/2\\_1/2\\_1\\_1/t\\_2\\_1\\_1.htm](http://www.ets.ifmo.ru/usolzev/SEITEN/u1/t_2/2_1/2_1_1/t_2_1_1.htm)).

<sup>2</sup> Peterson L.C. Equivalent Circuits of Linear Active Four-Terminal Networks // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. Is. 4, p. 595.



К последним принадлежат различные типы таких структурных элементов электрических цепей – фильтры, приемники, интеграторы и др., которые являются абстрактными объектами теории электрических цепей, т.е. элементами ее структурных теоретических схем, соответствующих конструктивным элементам реальных электрических и электронных технических систем.

Итак, четырехполюсник представляет собой обобщенную систему (абстрактный объект), имеющую два входа и два выхода, к которой приводятся многочисленные конструктивные идеальные блоки – фильтры, контуры, усилители и др. Представление о четырехполюснике вводится для перехода к математическим соотношениям, которые позволяют составленные на основе законов Кирхгофа уравнения, описывающие движение тока в контуре с четырехполюсником, представить в матричной форме. Решая данные уравнения с помощью теории матриц, можно определить искомые конструктивные параметры четырехполюсников: входное сопротивление, мощность на входе и выходе, вносимое затухание и др.

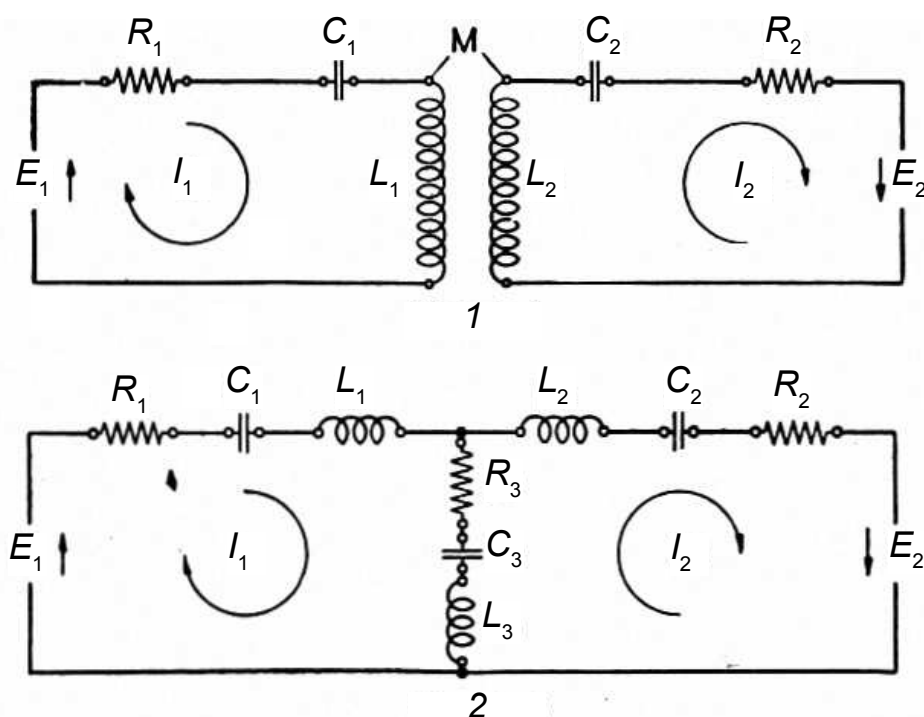
В теории четырехполюсников доказывается ряд теорем (например, об эквивалентном генераторе), дающих возможность не только упростить расчеты, но и синтезировать новые схемы путем дедуктивного эквивалентного преобразования четырехполюсников. Два четырехполюсника называются *эквивалентными*, если в электрической цепи они вызывают одинаковое действие, т.е. распределение токов и напряжений во внешней цепи, подключаемой к четырехполюснику, не изменяется при замене одного четырехполюсника другим.

При анализе сложных схем их предварительно преобразуют в соединение более простых четырехполюсников, параметры которых берутся из специальных таблиц. Затем по матрицам каждого из них производятся математические операции над ними в зависимости от типа соединения. Такое преобразование позволяет найти наиболее экономичные и эффективные инженерные решения.

Таким образом, теория электрических цепей имеет дело не с огромным разнообразием конструктивных элементов электротехнической системы, отличающихся своими характеристиками, принципом действия, конструктивным оформлением и др., а со сравнительно небольшим количеством идеальных элементов и их соединений, представляющих эти идеальные элементы на теоретическом уровне.

Следующим уровнем идеализации в теории электрических цепей стали поточные схемы, отображающие электромагнитный процесс, протекающий в электротехническом устройстве при его функционировании. Сама цепь представляется совокупностью элементов

и связей, образующих путь для электрического тока, основными параметрами которого (для синусоидального тока) являются напряжение, сила тока, мощность, амплитуда, фаза и частота. Каждому элементу поточной схемы соответствует вполне определенный физический процесс, детальное описание которого выходит за пределы теории электрических цепей, но учитывается в ней. Например, омическое сопротивление как элемент электрической цепи отображает безвозмездные потери электрической энергии в цепи в результате ее перехода в другие виды энергии — тепловую, химическую и т.д., индуктивность можно рассматривать как часть цепи, накапливающую энергию магнитного поля, а конденсатор служит для накопления энергии электрического поля. Эти «чистые» сопротивления, индуктивности и емкости являются идеализированными объектами теории электрических цепей (рис. 1.38). «В действительности, конечно, каждый элемент цепи сам по себе часть энергии превращает в тепло, а другую часть накапливает в форме магнитного и электрического поля...» [65, с. 12–13].



**Рис. 1.38.** Два магнитно-связанных колебательных контура и электрическая связь двух колебательных контуров:  $R$  — омическое сопротивление;  $L$  — индуктивность;  $C$  — емкость;  $I$  — электрический ток;  $E$  — напряжение; стрелки обозначают направления напряжений и токов, принятые за положительные [65]

В теории электрических цепей электрический ток рассматривается как однородный физический процесс с операционально выделенными параметрами. В соответствии с видами электрического тока

различаются и соответствующие им режимы функционирования цепи, например установившийся и переходный. Преобразование тока заключается или в количественном преобразовании его параметров (например, силы тока и величины напряжения), или в преобразовании характера его изменения во времени (скажем, постоянного на переменный либо наоборот).

Этот процесс в теории электрических цепей выражается определенной взаимозависимостью физических параметров элемента цепи (например, напряжения от силы тока или электрического заряда от напряжения) и числом соответствующих единиц измерения (ом, фарад, герц и др.). Элементы электрической цепи образуют ветви, которые соединяются в узлы и контуры с помощью идеальных электрических связей, т. е. связей, не обладающих сопротивлением, индуктивностью и емкостью, хотя реальные проводники ими, конечно, обладают.

Кроме того, поточная схема может быть представлена в дальнейшем разными функциональными схемами, основанными на соответствующем математическом аппарате. Для этого нужно составить дифференциальные уравнения, исходя из физических законов, т. е. математически формулировать физическую задачу, причем основаниями для составления уравнений сети являются законы Кирхгофа. Первый закон – сумма токов в любой точке всегда равна нулю, второй закон – общая электродвижущая сила, приложенная к любому замкнутому контуру или цепи, равна сумме падений напряжений, вызванных омическими, индуктивными и емкостными сопротивлениями. В результате строится система обыкновенных линейных дифференциальных уравнений, которая представляет собой основные уравнения теории электрических цепей. Решение этих уравнений позволяет выяснить особые свойства рассматриваемой системы. Их решение и истолкование является задачей теории электрических цепей [65, с. 11–13].

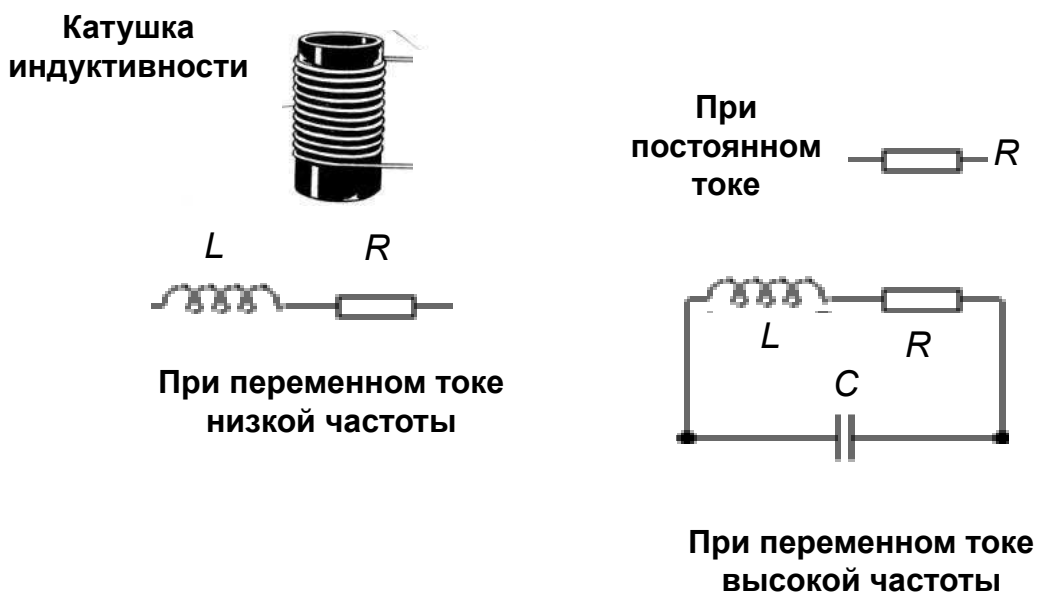
Для применения математического аппарата требуется дальнейшая идеализация: любой элемент электротехнической цепи рассматривается как *идеальный двухполюсник*, действие которого на проходящий через него ток описывается линейным уравнением. Несколько сложнее обстоит дело с нелинейными элементами, которые сначала замещаются эквивалентными схемами, содержащими линейные элементы<sup>1</sup>. Все элементы электрической цепи должны быть приведены

---

<sup>1</sup> См., например: Колосов С.П., Сидоров Ю.А. Нелинейные двухполюсники и четырехполюсники. М.: Высшая школа, 1981.

к указанному виду. Причем в зависимости от режима функционирования технической системы одна и та же схема может принимать различный вид.

Режим функционирования технической системы определяется прежде всего тем, какой естественный (в данном случае физический) процесс в ней происходит, т.е. какой электрический ток (постоянный или переменный, периодический или непериодический и т.д.) течет через цепь. В зависимости от этого и элементы цепи на схеме функционирования меняют вид: например, при постоянном токе индуктивность представляется идеальным омическим сопротивлением (так как ее индуктивностью и емкостью можно пренебречь), при переменном токе низкой частоты — последовательно соединенными идеальными омическим и индуктивным сопротивлениями, а при переменном токе высокой частоты ее поточная схема дополняется еще одним параллельно присоединяемым идеальным элементом — емкостным сопротивлением (рис. 1.39).



**Рис. 1.39.** Схемы замещения индукционной катушки идеализированными элементами электрической цепи  $R$ ,  $L$  и  $C$  при различных режимах функционирования<sup>1</sup>

Таким образом, одна и та же реальная электрическая цепь, состоящая из резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности, соединенных между собой проводочными проводами, может быть представлена для разных режимов функционирования этой электрической цепи различными эквивалентными схемами. Для посто-

<sup>1</sup> См.: Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. М.: Энергия, 1978, с. 32.

янного тока достаточно представить ее в виде (поточной) эквивалентной схемы – схемы замещения, состоящей только из омических сопротивлений. Для переменного тока низкой частоты к ним добавляются индуктивные сопротивления, а на высокой частоте нужно учитывать и емкостное сопротивление данной цепи. Для каждого вида физического процесса применяется различный математический аппарат анализа поточной схемы технической системы в каждом определенном режиме ее функционирования. Теория цепей «становится почти полностью математической дисциплиной... Оговорив для заданного типа схемы ряд необходимых и достаточных условий, мы теперь требуем, возможно, даже большего, чем может обычно дать математика. Мы требуем не только того, чтобы ряд условий был достаточным, но также и того, чтобы он был реальным, в котором условия действительно предопределяли бы средства синтеза рассматриваемых схем. Такой синтез включает в себя как определение отдельных привлекаемых схем, так и определение величин их элементов. Более того, мы требуем, чтобы условия достаточности были представлены в легко анализируемой форме, прежде чем приступить к фактическому синтезу схемы... В любой частной задаче ответ будет зависеть от вида рассматриваемой цепи, т.е. как от ее построения, так и от типа элементов, входящих в нее» [66, с. 888–889].

Например, для разных типов функционирования электрической цепи используются различные математические схемы: для анализа цепей постоянного тока и синусоидального тока используются, как правило, векторные потенциальные диаграммы; для переходных процессов<sup>1</sup> – операторные схемы, основанные на преобразованиях Лапласа; для расчета цепей, в которых протекают периодические синусоидальные процессы, – ряды Фурье и т.д. В то же время общая физико-математическая методика решения электротехнических задач стала «основанием для выделения при систематизации полученных результатов... ряда универсальных теоретических представлений и приемов исследования...» [67, с. 98]. Кроме того, задается графическая форма математического описания состояния электрической цепи в виде функциональной схемы.

---

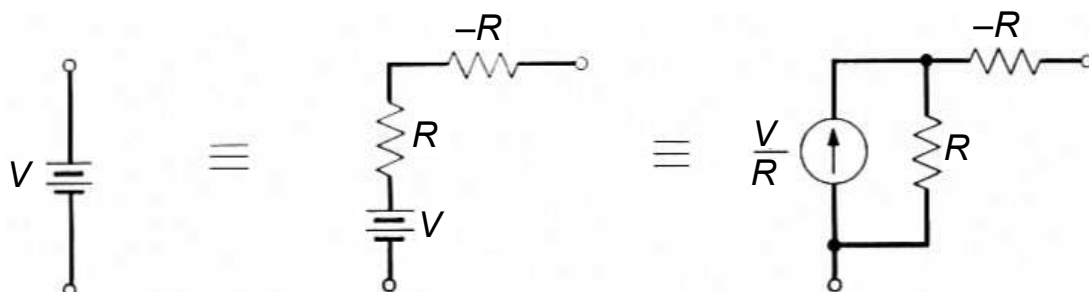
<sup>1</sup> В теории электрических цепей различают установившийся и переходный режимы и соответствующие им установившиеся или переходные процессы. Последние возникают при всевозможных коммутациях в цепи (включение и отключение отдельных ветвей, короткое замыкание участков цепи, внезапное изменение параметров элементов и т.д.). Переходные процессы во многих электронных устройствах играют решающую роль.

В естественнонаучной теории главное внимание уделяется не структурным, а поточным схемам, т.е. объяснению и предсказанию хода естественных процессов. Одна же из основных задач функционирования развитой технической теории заключается в тиражировании типовых структурных схем для всевозможных инженерных требований и условий, формулировке практико-методических рекомендаций инженеру-проектировщику. Ее абстрактным объектам обязательно должен соответствовать класс гипотетических технических систем, которые еще не созданы. В ней важен не только анализ, но и синтез теоретических схем новых технических систем. Поэтому Клод Шэннон, один из основоположников теории релейно-контактных схем, в своей классической работе «Символический анализ релейно-контактных схем» отдельную главу посвящает синтезу таких схем [68]. Конструктивная функция технической теории как раз и состоит в ее опережающем развитии по отношению к инженерной практике.

Каждому функциональному элементу такой схемы соответствует определенное математическое соотношение (скажем, между силой тока и напряжением на некотором участке цепи) или определенная математическая операция (дифференцирование, интегрирование и т.д.). Порядок расположения и характеристики функциональных элементов должны быть адекватны электрической схеме. В качестве такой функциональной схемы может быть использована потенциальная диаграмма, позволяющая весьма просто находить напряжения между любыми точками электрической цепи. Каждой точке цепи соответствует определенная точка потенциальной диаграммы по построению. Действующее значение и фаза исходного напряжения определяются прямой, соединяющей соответствующие точки потенциальной диаграммы. Для такой замены используются различные методы — комплексный, контурных токов, узловых напряжений, наложений и т.д.

На функциональной схеме проводится решение математической задачи по стандартной методике с помощью типовых способов на основе применения ранее доказанных теорем. Для этого функциональная схема по определенным правилам преобразования приводится к типовому виду. Так, в теории электрических цепей смешанные соединения преобразуются в более простые последовательные и параллельные соединения, многоконтурные схемы — в одноконтурные и т.д. Для описания такого рода упрощающих преобразований в теории электрических цепей специально доказываются эквивалентность некоторых типовых схем, например «треугольника» и «звезды» и наоборот, и особые теоремы, например об эквивалент-

ном источнике тока и напряжения (рис. 1.40), позволяющие получать более удобные для расчета схемы. Это дает возможность заменять определенные участки цепи другими, эквивалентными им и упрощающими схему, а следовательно, и последующий ее математический расчет.



**Рис. 1.40.** Эквивалентное преобразование источника напряжения в независимый источник тока<sup>1</sup>

«Таким образом, теория цепей содержит иерархическую систему идеализированных объектов изучения, из которой для решения определенного класса задач выбирается та или иная теоретическая модель (тот или иной идеализированный объект или их совокупность и та или иная форма ее математического описания (дифференциальные уравнения, векторные диаграммы, матрицы, графы). Принципы выбора и примеры расчета включаются в учебники наряду с изложением теории» [67, с. 107–110].

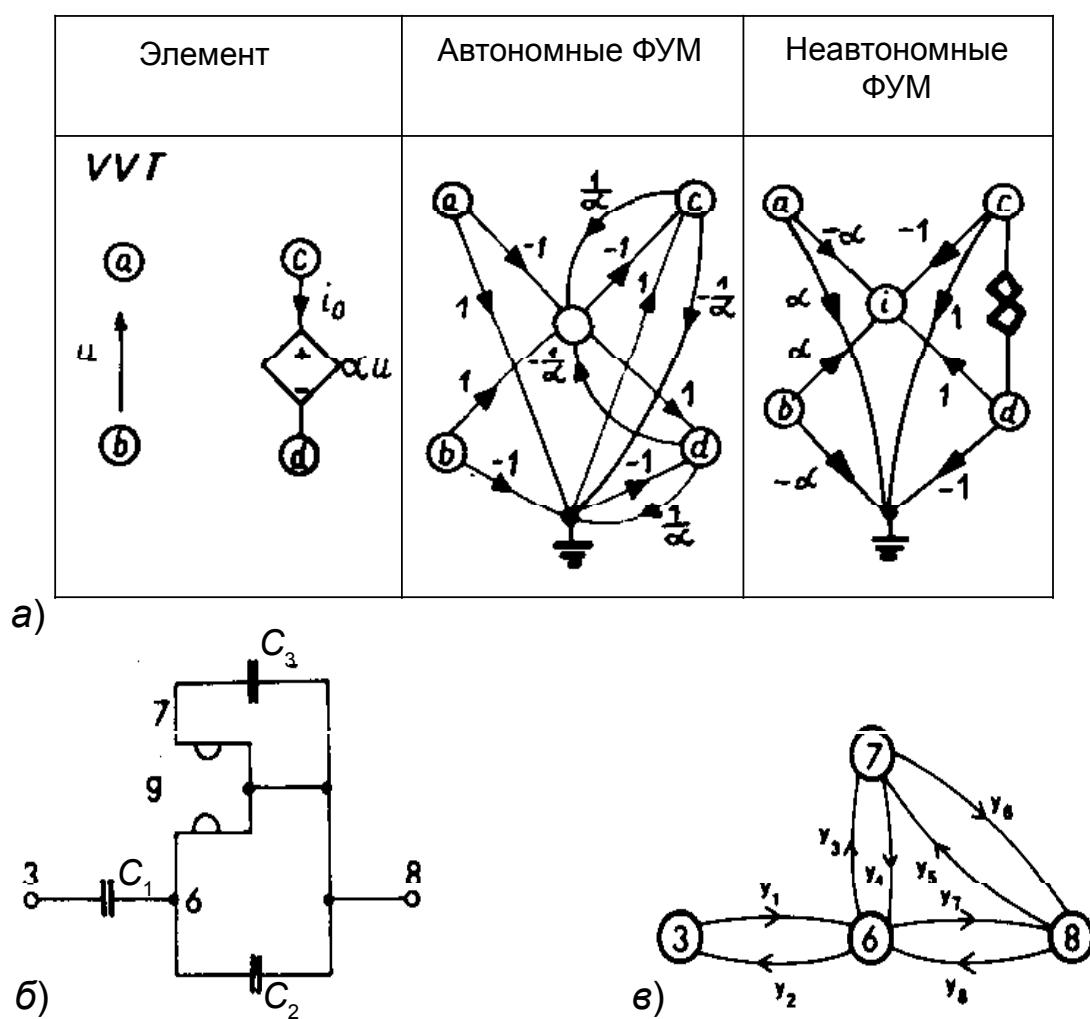
Элементы эквивалентной операторной схемы выполняют в ходе функционирования электрической цепи математические операции над протекающим в ней физическим процессом (электрическим током). Уравнения Кирхгофа, описывающие течение физического процесса, и уравнения, описывающие действие двухполюсника на этот процесс, позволяют составить необходимое количество уравнений, связывающих токи и напряжения на элементах с учетом их соединения в цепи, т. е. отображающих математические соотношения между этими элементами.

Существуют определенные правила преобразования таких схем, например правила вынесения источника напряжения за узел или внесения источника в контур, которые позволяют упростить такую схему и в конечном счете привести ее к скелетной (математической) схеме, где ветви изображаются просто линиями, а узлы — точками. Именно с помощью скелетной схемы составляются необходимые системы уравнений, решение которых позволяет рассчитать параметры цепи, и доказываются теоремы.

<sup>1</sup> Kozemchak E.B., Murray-Lasso M.A. Computer-Aided Circuit Design by Singular Imbedding // Bell System Technical Journal. 1969. Vol. 48. Is. 1, p. 284.

Так, при расчете электрических цепей с помощью теории графов элементы электрической схемы (индуктивности, емкости, сопротивления и т.д.) заменяются по определенным правилам особым идеализированным функциональным элементом — унистором, который имеет только одно функциональное свойство — пропускать электрический ток лишь в одном направлении. К полученной после такой замены однородной теоретической схеме могут быть применены топологические методы анализа электрических цепей (рис. 1.41).

### Унисторные модели элементов электрической цепи



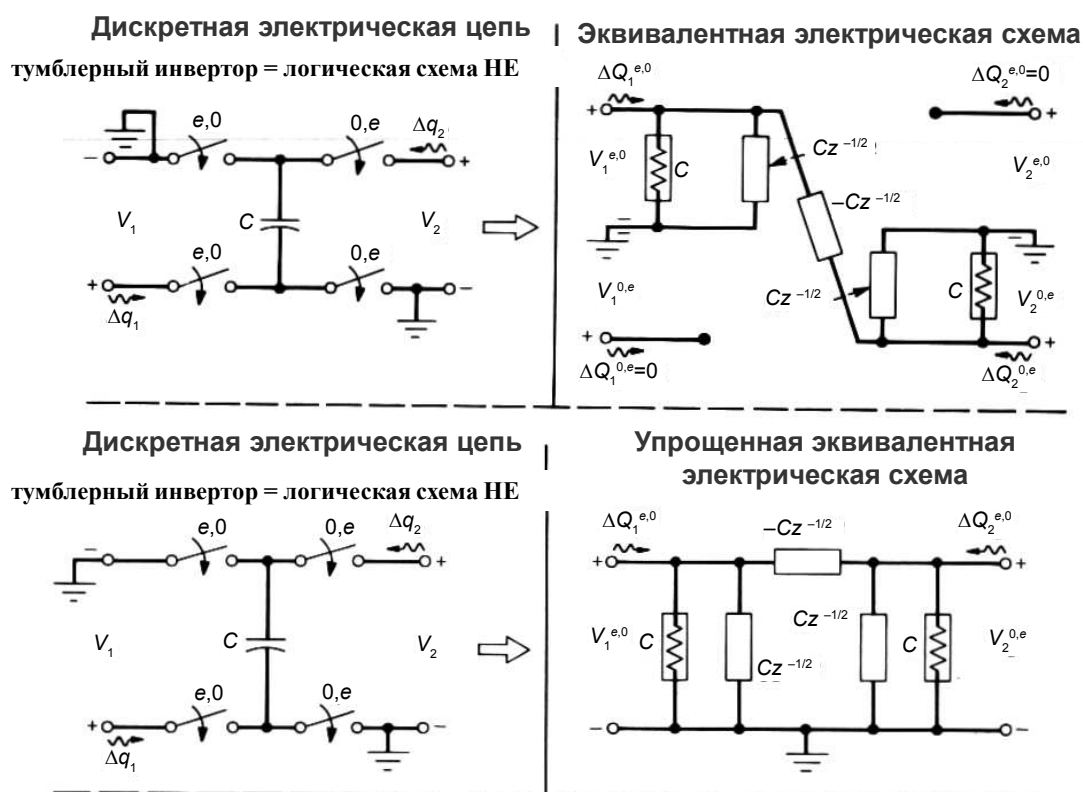
**Рис. 1.41.** Формальная унисторная модель (ФУМ) элементов электрической цепи (а); активный двухполюсник (б) и его унисторный граф (в) [69]

На основе функциональной схемы составляется система уравнений, которая решается с помощью определенных математических методов (например, матричных). Эти уравнения получаются на основе физических законов (Ома, Кирхгофа и др.), устанавли-



вающих, например, зависимость между параметрами протекающего в цепи электрического тока и ее элементов<sup>1</sup>. Известные из условия задачи их конкретные численные значения позволяют в результате решения данных уравнений вычислять неизвестные параметры тока и элементов цепи.

На функциональной схеме показано решение математической задачи с помощью стандартной методики на основе применения ранее доказанных теорем. Для этого функциональная схема по определенным правилам преобразования приводится к типовому виду (рис. 1.42).

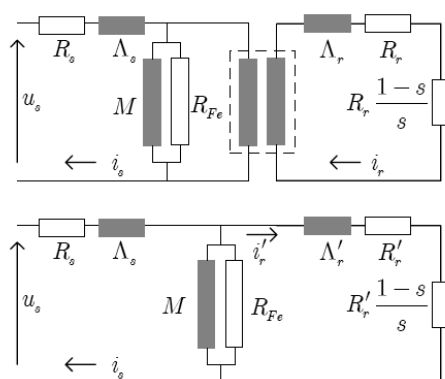


**Рис. 1.42.** Пример одного из унифицированных стандартных модулей (тумблерный инвертор, соответствующий логической схеме НЕ) из общей библиотеки таких блоков для электрических схем с управляющим конденсатором [70]

Схемы замещения различного уровня абстракции исторически вырабатывались в значительной степени порознь, индивидуально в отдельных направлениях исследований. Сюда следует отнести изучение трансформаторов, электрических машин, длинных линий в сильно-

<sup>1</sup> «Простейшей и... совершенно удовлетворительной основой для составления уравнений теории электрических цепей являются законы Кирхгофа» (см.: *Carson J.R. Electric Circuit Theory and the Operational Calculus* // *Bell System Technical Journal*. 1925. Vol. 4. Is. 4, p. 287).

точной электротехнике, а также теоретические исследования в области телеграфии и телефонии. При распространении и передаче знаний в электротехническом сообществе результаты, полученные при рассмотрении отдельных вопросов, сопоставлялись, систематизировались и получали общее обоснование. Например, исследование трансформаторов в силовоточной электротехнике, где были построены одни из первых схем замещения, происходило независимо от изучения электрических машин. Однако «аналогичный характер уравнений в комплексной форме для трансформаторов и машин позволил сформулировать идею “всеобщего трансформатора” (Ч. Штейнмец) ..., что способствовало переносу ряда физических представлений и теоретических построений, в том числе схем замещения, в теорию электрических машин» (рис. 1.43) [67, с. 125]. Именно так происходило обобщение в рамках теории электрических цепей.



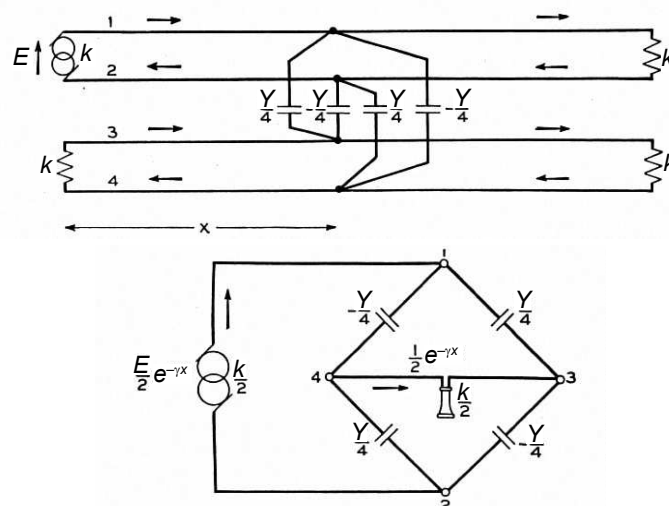
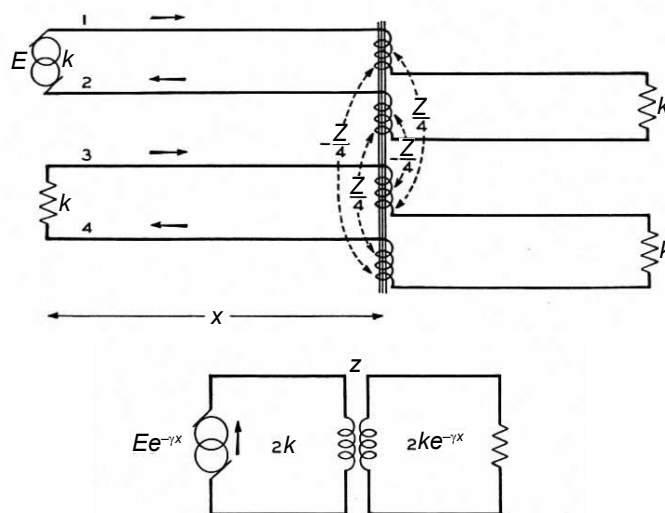
**Рис. 1.43.** Эквивалентная схема асинхронного мотора по Штейнмецу<sup>1</sup>

Концепция эквивалентных электрических схем сыграла важную роль в электротехнике и особенно в технике связи. Одним из первых в этом направлении был математик и физик Георг Кэмпбэлл, долгое время работавший в компании «Белл телефон», который, анализируя перекрестные помехи<sup>2</sup> в телефонных линиях, выяснил, что их появление зависит от емкостных связей, образующихся между длинными линиями. В своем неопубликованном меморандуме [71] он пропагандирует метод поэтапных дедуктивных аппроксимаций и ставит в соответствие исследуемым реальным электрическим цепям различные схемы замещения, например мостовую (рис. 1.44) или трансформаторную (рис. 1.45) на основе идентичности их коэффициента пропускания и импеданса (комплексного сопротивления)<sup>3</sup>, выраженного математически.

<sup>1</sup> Serbian Journal of Electric Engineering. 2006. Vol. 3. № 2.

<sup>2</sup> Взаимные искажения сигналов, «захлестывание», «перетекание» сигнала из одного канала связи в другой, электрические наводки, вызванные сигналами в соседних проводах, мешающие связи.

<sup>3</sup> Полное или комплексное сопротивление среды распространению электромагнитных волн, измеряемое в омах.

Рис. 1.44. Эквивалентная мостовая схема<sup>1</sup>Рис. 1.45. Эквивалентная трансформаторная схема<sup>2</sup>

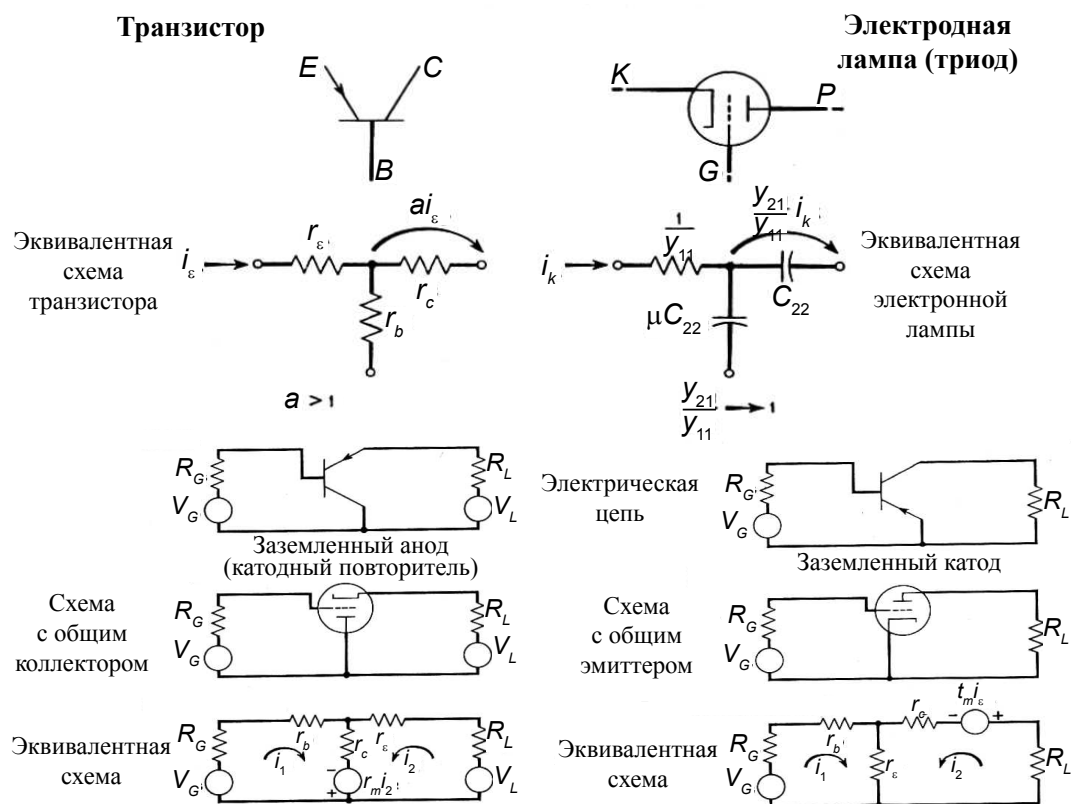
И если первоначально концепция эквивалентных электрических схем использовалась для описания пассивных электрических цепей, т.е. состоящих только из пассивных элементов — сопротивлений, емкостей и индуктивностей, то позднее была развита «общая теория активных<sup>3</sup> электрических цепей» [73, р. 593–594] и нелинейных схем, например транзисторов [74, р. 1190]. С точки зрения эквивалентных схем теории электрических цепей отдельные ключевые элементы, такие, например, как транзистор и электронная лампа, являются полностью аналогичными по своему принципу действия,

<sup>1</sup> Bell System Technical Journal. 1935. Vol. 14. Is. 4, p. 561.

<sup>2</sup> Там же, р. 563.

<sup>3</sup> Активным называется элемент, содержащий в своей структуре источник электрической энергии.

хотя и имеют совершенно различную физическую природу. Поэтому они отображаются на уровне функциональных схем аналогичными эквивалентными схемами замещения (рис. 1.46) [75, p. 375].



**Рис. 1.46.** Аналогичность транзистора и электронной лампы [76, 375]

Одной из таких функциональных схем стали *операторные схемы*, использующие для анализа электрических цепей операционное исчисление, которое возникло сначала как частный методический прием для инженерных расчетов, а затем было обобщено на любые электрические схемы. Впоследствии операторное исчисление было переработано в еще более абстрактную форму, в которой оно нашло применение в самых разнообразных областях науки и техники<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Операционное исчисление как мощный метод решения дифференциальных уравнений теории электрических цепей получило «широкое применение не только в теории электрических цепей, но и для решения дифференциальных уравнений в математической физике» (см.: *Carson J.R. Electric Circuit Theory and the Operational Calculus // Bell System Technical Journal. 1925. Vol. 4. Is. 4, p. 685*). См., например: *Лурье А.И. Операционное исчисление и его приложение к задачам механики. М.; Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951* (Первое издание этой книги, написанной в 1936 г., вышло в свет в 1938 г. (Там же. С. 12). Строгое изложение основ и аппарата операционного исчисления дано в работе: *Диткин В.А. Операционное исчисление // Успехи математических наук. 1922. Т. II, вып. 6* (Там же. С. 432). См. также: *Конторович М.И. Операционное*

Операционное исчисление было создано известным английским физиком и электротехником Оливером Хевисайдом (1850–1925). Он значительно упростил уравнения Максвелла, записав их в векторной форме вместо использовавшейся ранее кватернионной. На практике это означало, что вместо 20 уравнений с 20 переменными надо было решить четыре уравнения с двумя переменными – векторами электрического и магнитного поля. Благодаря этому векторы вошли в обиход у физиков. Впоследствии он сумел решить задачу передачи электромагнитного сигнала по проводам<sup>1</sup>.

«Между 1880 и 1887 гг. Хевисайд разработал операционное исчисление... метод решения дифференциальных уравнений с помощью преобразования их в обычные алгебраические... Ему принадлежит знаменитая фраза: “Математика – экспериментальная наука, а определения появляются не вначале, а значительно позже”. Этой фразой он ответил на критику использования операторов до того, как они ясно определены»<sup>2</sup>. Однако этот метод не был им строго обоснован с математической точки зрения.

О. Хевисайд, исследуя переходные процессы в телефонных линиях связи, разработал операционное исчисление, ставшее впоследствии «эффективным аппаратом математического исследования многих прикладных вопросов... Простота и эффективность этого метода при исследовании переходных явлений в электрических цепях были разительным очевидным фактом. Метод Хевисайда в 1920-х гг. стал предметом специальных математических исследований, и его строгое обоснование в трудах Д. Карсона, Т. Бромвича, К. Вагнера, П. Леви положило начало операционному исчислению как области математики» [67, s. 125].

Хевисайд внес «большой вклад в дальнейшее развитие теории электрических цепей. При этом он придавал огромное значение именно эффективным методам расчета. В особенности он увлекся “алгебраическими формулировками”». Но уровень развития алгебраических методов в то время был еще не достаточен, и их успех не мог быть полным.

«Операционное исчисление принесло Хевисайду бессмертную славу, но это потом, а для начала он попал под огонь бешеной критики. Он не дожил до воплощения в жизнь своих идей. Прежде всего Вагнер, Кэмпбелл и Бромвич обосновали в 1916 г. с помощью

---

исчисление и нестационарные явления в электрических цепях. М.: Гостехиздат, 1949 ([http://reslib.com/book/Operacionnoe\\_ischislenie\\_i\\_nestacionarnie\\_yavleniya\\_v\\_elektricheskikh\\_cepyah](http://reslib.com/book/Operacionnoe_ischislenie_i_nestacionarnie_yavleniya_v_elektricheskikh_cepyah)).

<sup>1</sup> См.: Семенов А. Забытый пророк // История электросвязи. Виртуальный компьютерный музей ([www.computer-museum.ru/connect/heaviside.htm](http://www.computer-museum.ru/connect/heaviside.htm)).

<sup>2</sup> Цит. по: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Хевисайд,\\_Оливер](http://ru.wikipedia.org/wiki/Хевисайд,_Оливер)

вспомогательных алгебраических средств метод Хевисайда. Позже Ван дер Пол (начиная с 1929 г.), Кэмпбелл, Вагнер, Дойч (начиная с 1937 г.) и другие пытались обосновать его метод с помощью теории функций... Но выбранный ими путь вел в прямо противоположном направлении, чем то, на которое указывал Хевисайд. Лишь Й. Микусинский (в 1950 г.) впервые показал в своих работах ..., как можно реализовать алгебраические идеи Хевисайда. Затем Йошида (1980) доработал важнейшую для теории систем и теории электрических цепей часть его идей.

Предварительный итог развитию этого направления дают работы, выполненные автором данной книги в сотрудничестве с математиком В. Мартеном на основе некоторых работ Г. Вунша... При этом стало возможным показать, что восходящий еще к Ч. Штейнмецу... символический метод может быть заменен алгебраическим исчислением ..., которое по своей алгебраической структуре аналогично доработанному исчислению Хевисайда – Йошида» [77, s. 26].

Таким образом, исследование математических моделей позволяет получать новые знания о процессах, протекающих в технических устройствах, без обращения к инженерной практике или эксперименту, а математические методы в процессе их применения и сами претерпевают определенные изменения. Они приспособляются к решению специфических научно-технических задач. Именно так и возникло операционное исчисление, развитое первоначально для решения практических инженерных задач и получившее свою совершенную логическую форму значительно позже.

В предисловии к немецкому изданию книги Д.Р. Карсона «Электрические нестационарные явления и операционное исчисление» указано на то, что Хевисайд математически не доказал своего метода. Однако это сделали его последователи. Например, «Карсону удалось показать, как при помощи его простых рассуждений можно разрешить множество весьма важных технических вопросов и тем самым открыть для инженера-исследователя и расчетчика новый путь, у истоков которого он до сих пор нерешительно останавливался». Сам же Карсон в предисловии к английскому изданию отмечает, что его книга «явится для математика полезным введением в развитие и анализ операционного исчисления с особыми приложениями к теории электрических цепей. Инженеру она, наоборот, должна дать методы для математического решения сложных задач этой теории» [65, с. 5–7].

Применение математики хотя бы для проведения инженерных расчетов уже требует определенной идеализации технических систем. Исследователь в области технической науки работает с математическими моделями, которые интерпретируются, с одной стороны, с точки зрения их физического смысла, а с другой — с позиций содержания инженерной деятельности. Его собственная деятельность заключается

в поиске научного обоснования средств идеального описания стоящих перед ним познавательных задач, которые, однако, выявляются в процессе инженерной деятельности. Данная идеализация строится так, чтобы теоретические схемы оказались согласованными друг с другом, будто слои единого целого, и так, чтобы было возможно, переходя от слоя к слою, прийти к математической модели, которую проектировщик мог бы использовать в расчетах новой техники.

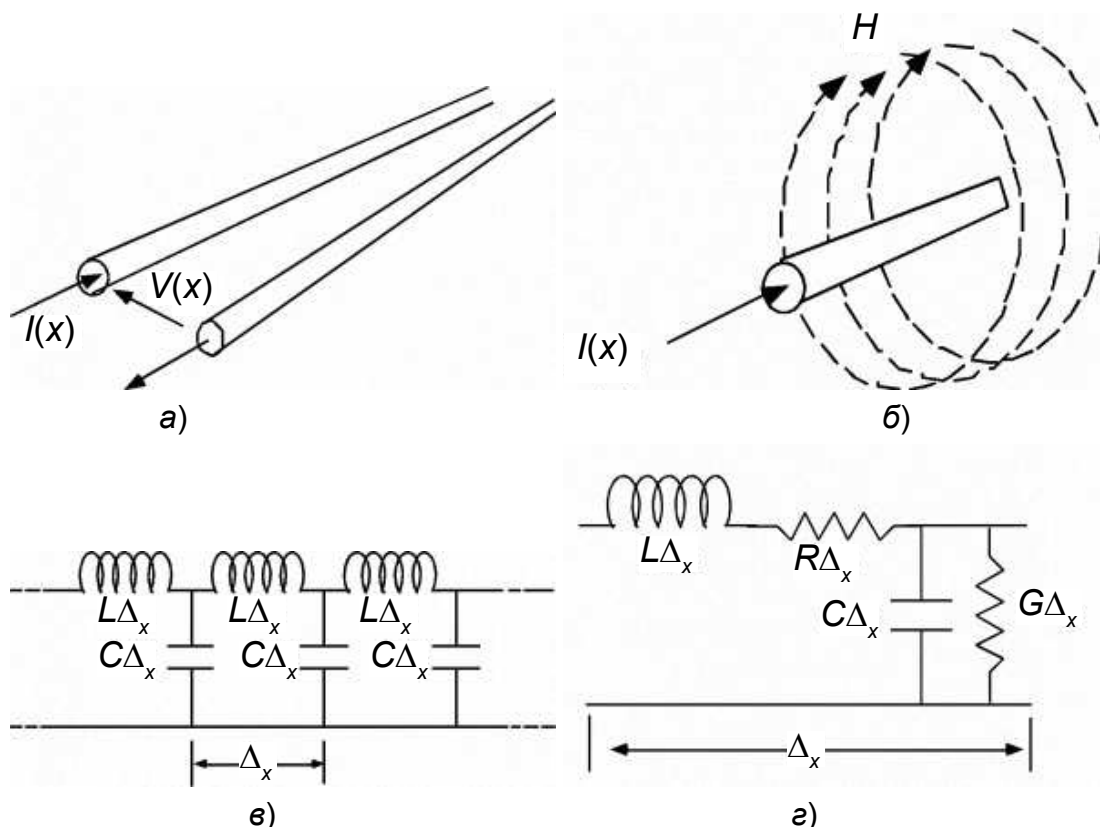
Теоретическое исследование электрических схем с включенными в них реактивными элементами (сопротивлениями, конденсаторами, катушками индуктивности, трансформаторами) позволяет устанавливать соотношения между силой тока и напряжением в какой-либо электрической цепи в соответствии с правилами, сформулированными Кирхгофом и Гельмгольцем. Распространение этих правил на случай переменного тока сделало «принципиально возможными расчеты электрических цепей, содержащих не только [омические] сопротивления, но и конденсаторы (емкости) и катушки индуктивности (индуктивности)» [78, s. 392]. Последние зачастую стали называть соответственно емкостными и индуктивными сопротивлениями.

Любой проводник (например, кусок медной проволоки или же нанотрубка) может быть представлен на эквивалентной схеме для цепи постоянного тока омическим сопротивлением. Для цепи переменного тока низкой частоты должно быть добавлено индуктивное сопротивление, а для переменного тока высокой частоты еще и емкостное сопротивление. В русском языке термин «сопротивление» (или «эквивалентное сопротивление») означает в первую очередь идеализированный элемент (абстрактный объект технической теории – физическую величину) идеализированной электрической цепи (поточной схемы) в отличие от сопротивления как конструктивного элемента (радиодетали) реальной электрической цепи (структурной, или конструктивной, схемы), называемого резистором (от англ. *resistor*).

Цепи с распределенными параметрами<sup>1</sup>, например однородные линии, часто представляются для проведения расчетов в виде цепей с сосредоточенными параметрами, эквивалентными им в конкретных условиях функционирования (например, при определенном диапазоне частот). Эти эквивалентные схемы могут анализироваться с использованием теории электрических цепей и теории электромагнитного поля (в этом случае их структурной схеме соответствует множество различных поточных схем, построенных для разных режимов функционирования) (рис. 1.47).

---

<sup>1</sup> Распределенными параметрами являются такие параметры, которые распространены по всей структуре, а не ограничиваются рамками какого-либо элемента с сосредоточенными параметрами, как, например, однослойная проволочная спираль (см.: *Wilson B. Distributed Parameters*, 2007. – <http://cnx.org/content/m1043/latest/>).



**Рис. 1.47.** «Универсальная» линия передачи, которая включает в себя большинство параметров (но не все) реальной линии передачи (а); электрический ток ( $I$ ), протекающий через проводник и создающий магнитное поле  $H$  (б); модель распределенных параметров линии передачи, состоящая из распределенных индуктивности ( $L$ ) и емкости ( $C$ ) обобщенной линии передачи (в); полная модель распределенных параметров (г)

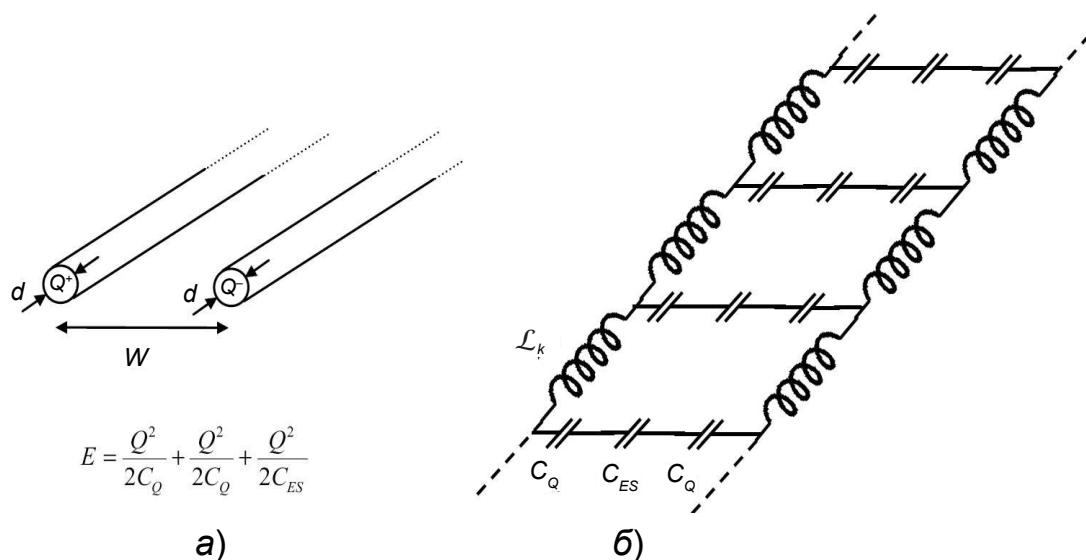
Мы можем создать более реалистичскую модель и представить себе, что все реальные проводники имеют серии связанных друг с другом сопротивлений и что все то, что мы используем, чтобы держать эти два проводника отдельно, будет иметь проводимость утечки. Чтобы принять этот факт во внимание, мы будем вводить серию электрических сопротивлений  $R$  (омы / единица длины) и серию электрических проводимостей  $G$  (омы / единица длины). Одна из секций нашей линейной модели будет выглядеть так, как показано на рис. 1.47, <sup>1</sup>

Аналогичным образом и в нанотехнологии можно описать геометрию линии передачи из двух нанотрубок с помощью модели радиочастотной цепи (рис. 1.48).

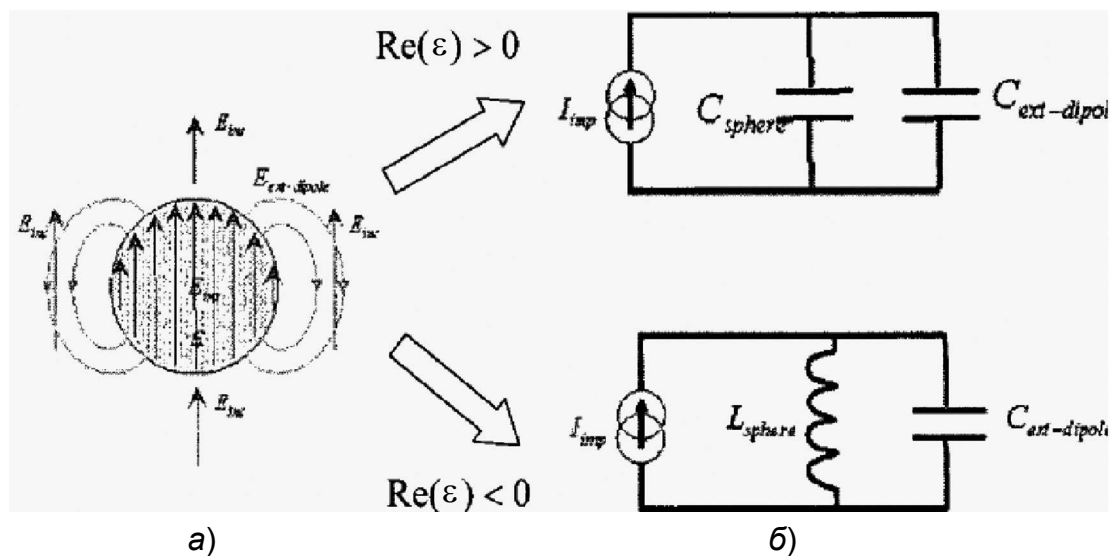
Блоки и элементы наноструктур могут быть представлены и рассчитаны на основе соответствующих эквивалентных электрических схем, содержащих стандартные электронные компоненты (рис. 1.49 и рис. 1.50).

<sup>1</sup> Там же.





**Рис. 1.48.** Геометрия линии передачи, состоящей из двух нанотрубок (а); ее модель в виде радиочастотной цепи для двух квантовых проволок с бесспиновыми электронами (б)<sup>1</sup>



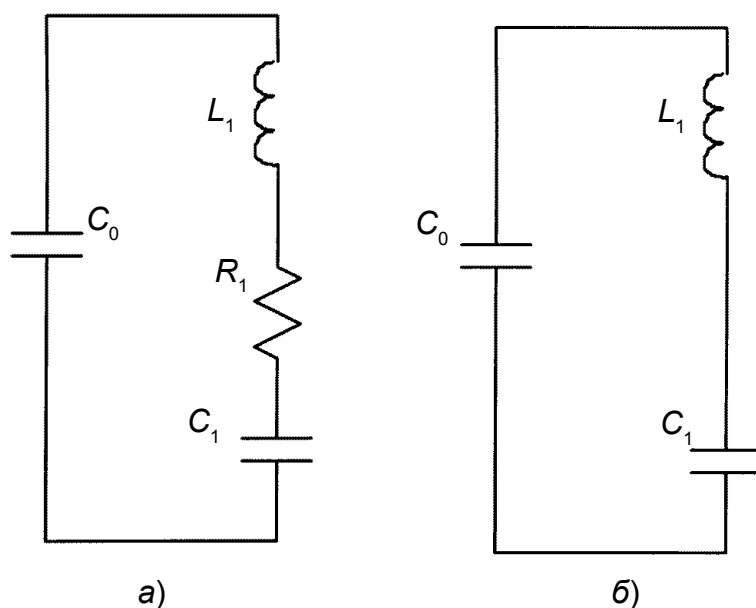
**Рис. 1.49.** Взаимодействие оптической волны с наносферой (а) и ее эквивалентные схемы: если сфера сделана из обычного диэлектрика, она может быть представлена в виде наноемкости (б), а если из плазмоника — в виде наноиндуктивности (б)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Burke P.J., Li S., Yu Z. Quantitative Theory of Nanowire and Nanotube Antenna Performance, 2004, p. 3.

<sup>2</sup> Engheta N., Alu A., Salandrino A. Nanocircuit Elements, Nano Transmission Lines and Nano Antennas Using Plasmonic Materials in the Optical Domain // IEEE International Workshop on Antenna Technology, 2005.

Наиболее отчетливо различие структурной и поточной схем электротехнического устройства обнаруживается в электромеханических системах (например, в пьезоэлектрических вибраторах<sup>1</sup>) и в цепях с распределенными параметрами (коаксиальных кабелях, длинных линиях и т.д.), которые теоретически представляются как эквивалентные им в заданном режиме функционирования цепи с сосредоточенными параметрами. На структурной схеме пьезоэлектрический вибратор изображен в виде пьезоэлектрической пластины, электродов и держателя. Хотя происходящий в нем физический процесс по своей природе является механическим (он только перключается немеханическим путем), его эквивалентная поточная схема строится как электрическая цепь, состоящая из соединенных последовательно электрического сопротивления, индуктивности и емкости, к которым параллельно присоединена емкость.

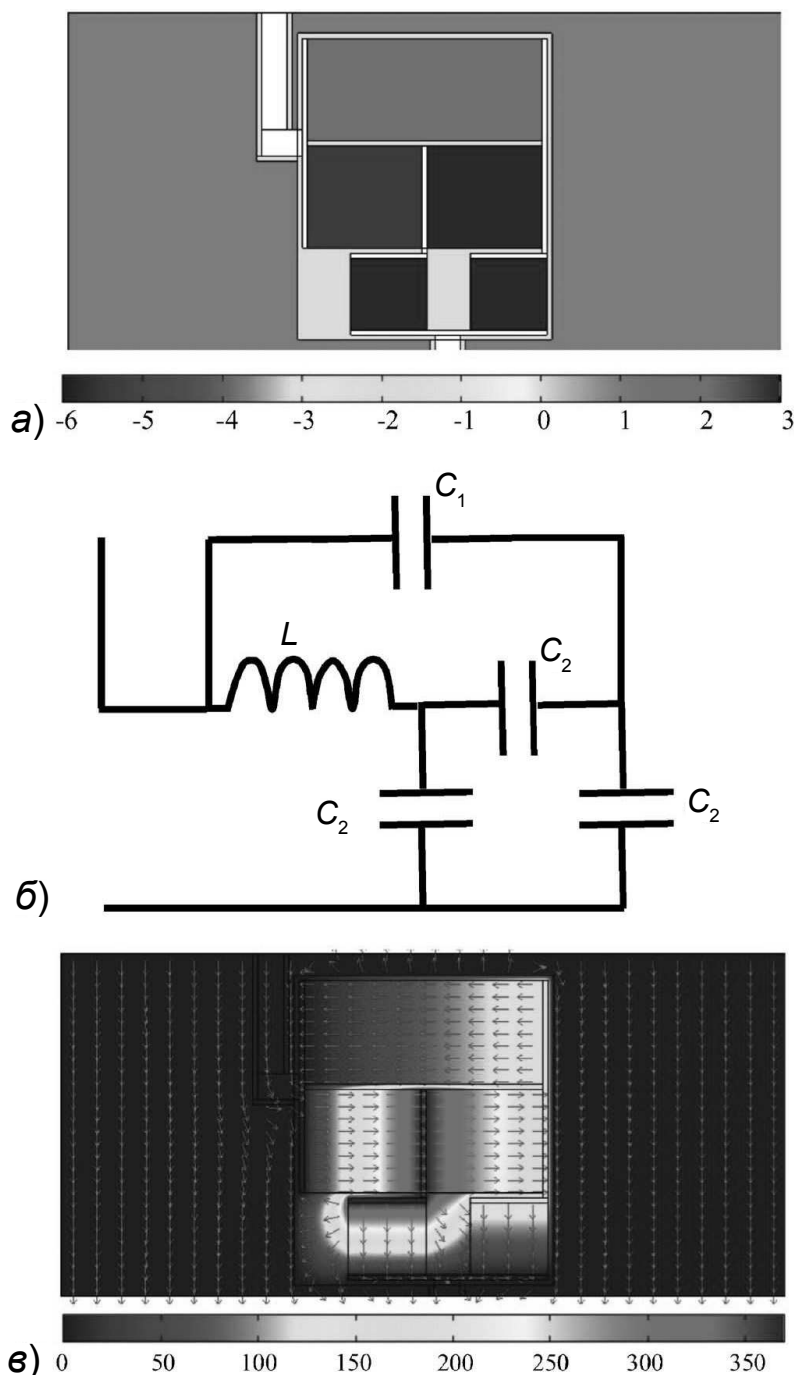
На рис. 1.50 приведена традиционная электрическая модель пьезоэлектрического вибратора Ван-Дайка, которая широко используется для представления его в виде эквивалентной электрической цепи. Эта модель состоит из трех элементов цепи:  $C_0$ ,  $C_1$  и  $L_1$ . Активным сопротивлением этой цепи можно пренебречь [79, р. 235].



**Рис. 1.50.** Модель пьезоэлектрического вибратора Ван-Дайка (а) (реальными элементами электрической цепи) и преобразованная модель сложной электрической цепи без учета активного сопротивления (б)

<sup>1</sup> Пьезоэлектрические устройства состоят из пьезоэлектрического материала, который деформируется, если вокруг него появляется электромагнитное поле. Они характеризуются тем, что производят механическое воздействие или смещение, если к ним приложено электрическое напряжение. И, наоборот, при приложении к ним механической силы они генерируют электрическое напряжение.

Аналогичным образом сегодня и в нанотехнологии нанодиэлектрики и нанопроводники для оптических наночепей могут быть представлены в виде комплексных элементов электрической цепи  $C_1$ ,  $C_2$  и  $L$  (рис. 1.51). Сложные устройства оптической наночепи, состоящей из плазмонных и неплазмонных элементов, можно представить с помощью теории электрических цепей [80, р. 21].



**Рис. 1.51.** Оптическая наночепь (а), сформированная из пяти наномодулей (четыре наноемкости и одна наноиндуктивность), копирующая функцию электрической цепи (б), и «квазистатическое» моделирование оптической цепи методом конечных двумерных элементов (в)

На рис. 1.51, *a* показана двухмерная конфигурация. Значения диэлектрической проницаемости для каждого наномодуля даны на цветовой шкале (см. рис. 1.51, *a*). Белый регион представляет материал с высокой диэлектрической проницаемостью. На рис. 1.51, *b* цветовая схема показывает распределения оптического потенциала, а стрелки — направление (но не амплитуду) тока смещения в каждом модуле. Отмечаем, насколько высоким должно стать значение оптического потенциала в каждой узловой точке этой цепи из-за *LC*-резонанса [там же, р. 20].

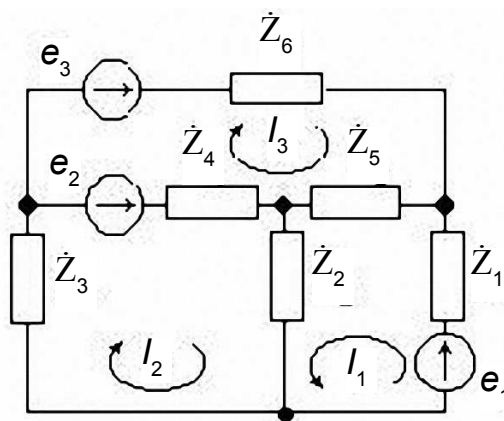
Для проведения расчетов с использованием законов Ома и Кирхгофа эта эквивалентная схема должна быть сведена к еще более простой эквивалентной (функциональной, или математической) схеме, т.е. определенным образом идеализированной электрической цепи — схеме замещения более высокого уровня абстракции [81]. Первые экспериментальные и теоретические результаты были получены Омом еще в 1824 г. Через три года он издал книгу под названием «Математически обработанные гальванические цепи», которая содержит все существенные законы электрических цепей. Однако он интересовался в первую очередь открытием физических закономерностей, а поэтому не использовал свои достижения для расчета больших электрических цепей. Гораздо больший вклад в становление теории расчета электрических цепей внес Кирхгоф. Он сформулировал в своей первой работе 1845 г. названные его именем законы в несколько более общей форме, чем у Ома.

Собственно, рождение теории электрических цепей следует, однако, отнести к 1847 г., когда Кирхгоф опубликовал свою работу под названием «О решении уравнений, с помощью которых проводится исследование линейного распределения гальванических токов». В этой работе впервые описывается методика анализа электрических цепей с применением теории графов.

В работах «О сохранении силы» (1847 г.) и «О некоторых законах распределения электрических токов в телесных проводниках с применением для опытов с животным электричеством» (1853 г.) Гельмгольц заложил основы динамической теории электрических цепей и теории двухполюсников. Окончательную форму теория приобрела благодаря Флемингу и Штейнмецу, которые перенесли на линейные *RLC*-цепи с синусоидальным возбуждением методы, развитые для линейных электрических цепей, состоящих из омических сопротивлений.

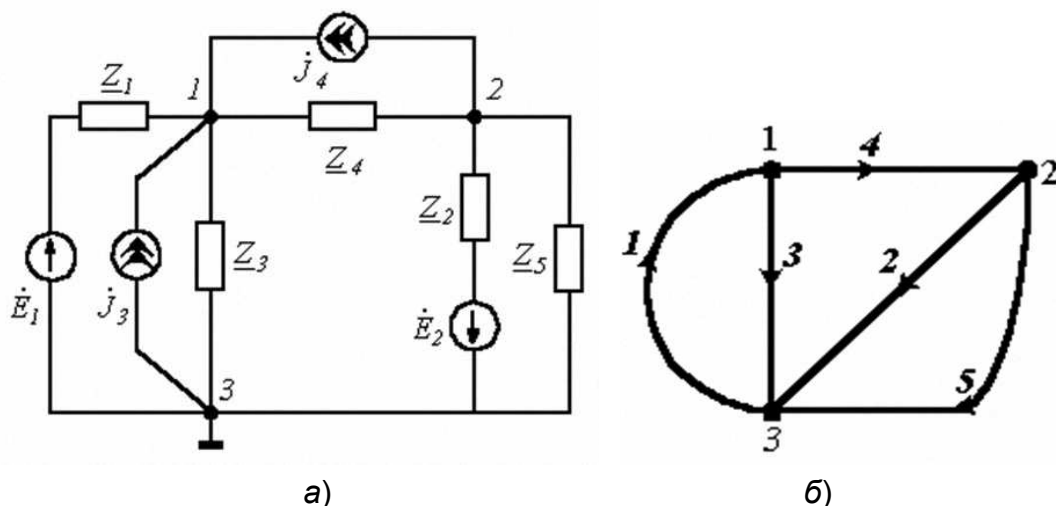
Любой реактивный двухполюсник можно представить в виде омического сопротивления, индуктивности и емкости, а можно — в виде комплексного сопротивления (*Z*). Активный двухполюсник может

быть заменен эквивалентной ЭДС с внутренним сопротивлением  $z$ . Выделяя в электрической цепи замкнутые контуры и производя соответствующие замены активных и реактивных двухполюсников, можно получить систему линейных уравнений для всех токов и напряжений в сети (рис. 1.52). Число независимых контуров определяется соотношением  $n - p - q + 1$ , где  $p$  – число ветвей в графе, представляющем сеть;  $q$  – число его узлов. В каждом контуре вводятся свои токи. Первое правило Кирхгофа требует равенства нулю суммы всех токов в каждом узле графа, второе – равенство нулю суммарного падения напряжения в каждом контуре.



**Рис. 1.52.** Электрическая цепь, состоящая из активных и пассивных двухполюсников

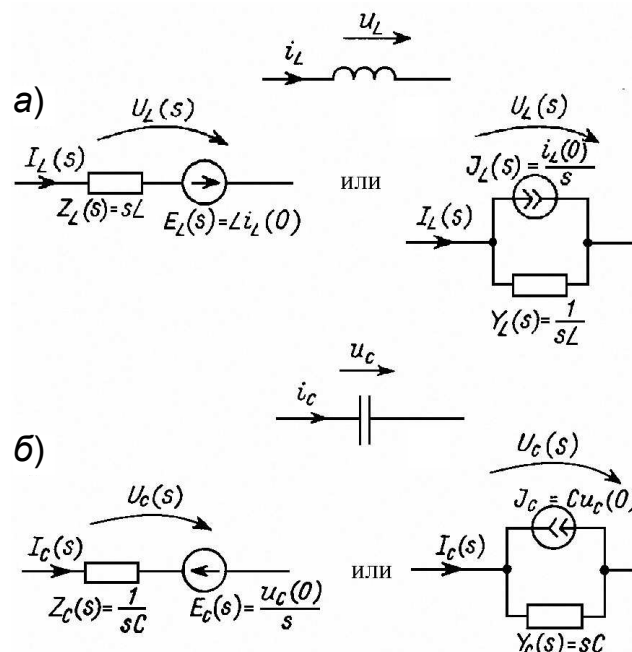
Далее упрощенная электрическая цепь (например, схема на рис. 1.53, а), может быть сведена к графу, имеющему три узла ( $q = 3$ ) и пять ветвей ( $n = 5$ ) (рис. 1.53, б). Возможное число независимых контуров  $n = p - q + 1$ , где  $p$  – число ветвей,  $q$  – число узлов. Выбираем контуры так, чтобы они охватывали все ветви. В каждом контуре вводятся свои токи. Реальные токи в общих (смежных) ветвях будут равны сумме контурных токов соседних контуров. Для выбранных контуров записывается уравнение Кирхгофа. «Каждому физическому процессу будет точно соответствовать определенная математическая операция. Электрическая цепь, состоящая из омических сопротивлений, имеет при данных ЭДС лишь одну единственную схему распределения напряжений или токов, т. е. ее линейные уравнения имеют единственное решение. Такая однозначность выводится уже из законов Кирхгофа, которые в свое время быстро приобрели права гражданства. Выведенные же из них законы наложения или суперпозиции ушли, напротив, в небытие и лишь позже были снова признаны. Составление некоторого процесса из независимых друг от друга частичных процессов в общем виде и называется суперпозицией [82, s. 150–152].



**Рис. 1.53.** Электрическая цепь (а) и ее математическое описание в виде графа с выбранной ориентацией ветвей (б)

Существуют определенные правила преобразования функциональных, например операторных, схем, которые позволяют упростить их и в конечном счете привести к скелетной (математической) схеме, где ветви изображаются просто линиями, а узлы — точками. Именно с помощью скелетной схемы составляются необходимые системы уравнений, позволяющие рассчитать параметры цепи, и доказываются теоремы. “Дифференциальные соотношения для оригиналов заменяются алгебраическими соотношениями для изображений, отражающими все исходные данные задачи, включая начальные условия. В этом и состоит суть операторного метода расчета переходных процессов: дифференциальные уравнения, описывающие переходный процесс, заменяются алгебраическими уравнениями для изображений. Полученные операторные связи допускают схемную интерпретацию” (рис. 1.54) [83].

Однако все, о чем говорилось выше, позволяет лишь анализировать электрические схемы. Техническая же теория только тогда может считаться построенной, если в ней становится возможным также синтез схем — создание нового технического устройства на основе имеющихся конструктивных элементов. Очень важно теоретически рассчитать основные параметры нового технического устройства и проимитировать его функционирование. Именно таким образом, например, были разработаны Кэмпбеллом в телефонных лабораториях “Белла” и Вагнером, работавшим на Германском почтамте, первые подходы к теории синтеза  $LC$ -фильтров, которую смогли в общих чертах завершить несколько позже Форстер и Дарлингтон (США), а также Кауер, Пилоти, Бэдер и др. (Германия)» [84, s. 26].

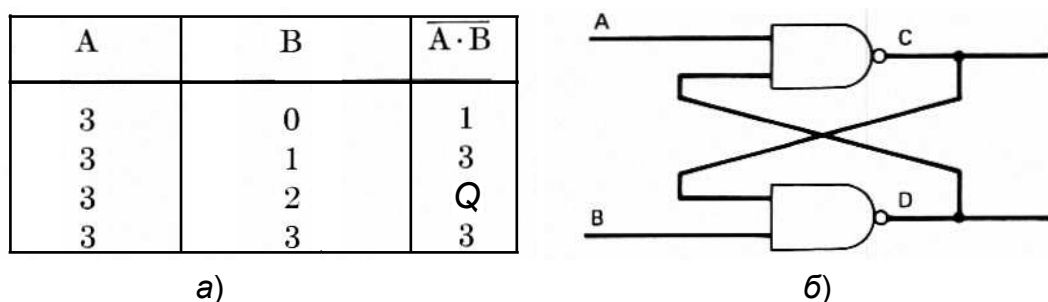


**Рис. 1.54.** Эквивалентные операторные схемы элементов электрической цепи: а – индуктивности, б – емкости<sup>1</sup>

К середине XX столетия в теории цепей формируется новый этап, связанный с междисциплинарным исследованием различных типов цепей не только электрических, но и кинематических, гидравлических и т. п. В результате теория цепей превратилась в междисциплинарную техническую теорию – теорию автоматического регулирования, которая стала следующим важным шагом в развитии взаимоотношений логики и техники. «Абстрактное представление компонентов систем привело к развитию “метаязыка”, в котором манипулирование конфигурациями электрических цепей стало естественным следствием математики... Идеи линейных систем, возникшие в технике связи, были распространены на другие области, такие как техника автоматического регулирования... Инженеры из сфер техники связи и техники автоматического регулирования развили новый способ использования этих моделей, в которых такие абстрактные понятия, как, например, полюса, ... или созвездие сигналов получили вполне осязаемую идентичность и ими стали оперировать самым конкретным образом... Было достигнуто очень важное сочетание математического моделирования систем, методов проектирования и компьютерной поддержки проектирования и анализа... Это позволило инженерам работать одновременно с эквивалентными моделями различного рода... И во все большей степени стало возможным конструировать устройства и системы, тесно связанные с математическими идеализациями» [86, р. 333–334].

<sup>1</sup> [http://eelib.narod.ru/toe/Novg\\_2.01/19/Ct19-3.htm](http://eelib.narod.ru/toe/Novg_2.01/19/Ct19-3.htm)

Это направление получило дальнейшее развитие в связи с применением для расчета электрических цепей компьютерной техники. Стали разрабатываться особые алгоритмы и моделирующие программы для логического проектирования электрических схем и их испытания с целью обнаружения неисправностей, а также логические схемы, эквивалентные различным электрическим или электронным схемам. На рис. 1.55 изображен триггер — спусковой элемент многих электронных схем, который может быть реализован на различной физической основе, например в виде транзисторной схемы.



**Рис. 1.55.** Реализация таблицы истинности в виде логической схемы: таблица истинности (а) и триггер (б)<sup>1</sup>

Энергетические сети, призванные обеспечивать электроэнергией города и деревни, целые регионы и страны, впервые пробудили очевидное ощущение собственной динамики растущих систем. В теоретической сфере это означало развитие теории сетей, необходимой в первую очередь для расчета (например, энергетических потерь при передаче) и проектирования энергетических сетей высокого напряжения и переменного тока, обеспечивающих передачу электрической энергии на большие расстояния и соединяющих в единую систему производителей (например, динамо-машины, преобразующие механическую энергию в электрическую) и потребителей (например, световые источники, преобразующие электричество в свет и тепло, или электромоторы, осуществляющие обратный переход к механической энергии) электрической энергии. Кроме того, в зависимости от типа электрического тока, способов подключения проводки и регулирования работы сети возникла проблема выбора подходящей для каждого конкретного случая системы энергоснабжения. Отдельные компоненты — динамо-машины, трансформаторы и т. д., представляющие собой четырехполюсники, соединяются с помощью электрических проводников, которые обладают омическим, индуктивным и емкостным сопротивлением (т. е. теоретически представимы в виде двухполюсников), в целостную взаимозависимую систему

<sup>1</sup> См.: Chappel G., Elmendorf C.H., Schmidt L.D. LAMP: Logic-Circuit Simulators // Bell System Technical Journal. 1457. Vol. 53. Is. 8. P. 1457, 1458.



более высокого уровня. Развитие теоретического исследования этих систем испытало сильное влияние развитой уже к этому времени электрической телеграфии, где, впрочем, использовались слабые токи и низкие напряжения по сравнению с сильноточной техникой. Это, однако, не мешало заимствованию оттуда ряда теоретических представлений в новую область теории цепей.

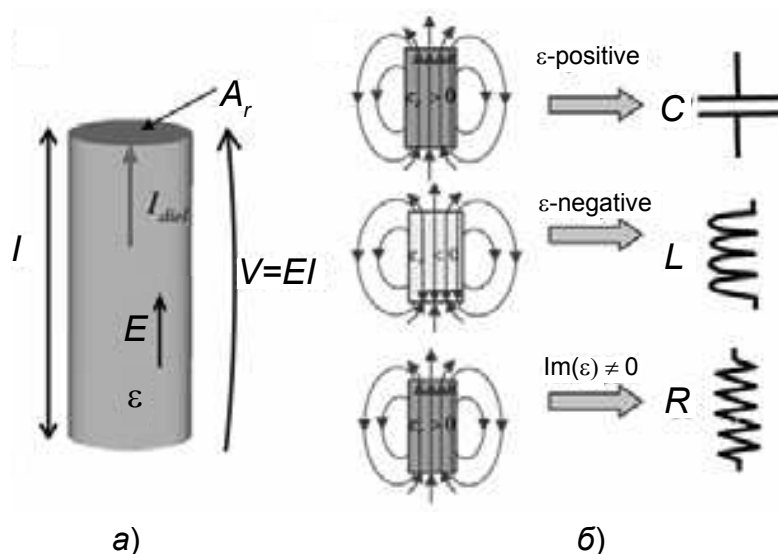
Следующий этап был связан с расширением сферы исследования за счет включения иных типов цепей (например, кинематических) выработанными для анализа электрических цепей теоретическими методами, что привело к переосмыслению и переработке самих этих методов.

В нанотехнонауке для анализа и синтеза наноцепей также используются различные модели из теории электрических цепей (эквивалентные цепи со стандартными электронными компонентами). И в них мы можем видеть те же самые традиционные электронные компоненты (электронику на молекулярном уровне), реализованные с помощью нанотехнологии. Традиционный конденсатор Фарадея сохраняет электрический заряд между параллельными заряженными пластинами, которые разделены изолирующим диэлектрическим материалом. Вместо плоских параллельных пластин конденсатор, выполненный в виде трубки, представляет собой две свернутые металлические фольги, разделенные пропитанной электролитом бумагой вроде свернутого в трубку «сэндвича». Для такого рода устройств нанотрубочные тонкие пленки могут быть выращены на поверхности токопроводящей фольги благодаря очень малым размерам нанотрубок, обычной синхронизации и высокой удельной проводимости. Нанотрубки образуют большую поверхность для аккумуляции и выделения энергии. На рис. 1.56 показано соответствие по-разному функционализированных нанотрубок стандартным элементам теории электрических цепей.

Согласно парадигме теории электрических цепей наноструктуры в разных режимах функционирования (скажем, на различных частотах) могут быть рассмотрены как сложные наноцепи, состоящие из трех основных элементов любой линейной электрической цепи –  $R$ ,  $L$ , и  $C$ . Например, полосовой оптический нанофильтр может быть описан с точки зрения резонанса параллельного  $RLC$ -контура (рис. 1.57), а полосно-заграждающий фильтр – в плане резонанса последовательного  $LC$ -контура (рис. 1.58).

«Следуя теории наноцепей, мы показываем, как можно построить такие сложные амплитудно-частотные характеристики исходя из простых правил, аналогичных правилам проектирования радиочастотных цепей. Мы проводим сравнение амплитудно-частотных характеристик таких оптических нанофильтров с классическими

фильтрами в радиочастотных электрических цепях. Эти результаты могут стать теоретической основой производства нанофильтров для оптических устройств в схемах с сосредоточенными параметрами... Важность трансляции понятий классической теории электрических цепей в оптическую сферу основана на возможности осуществить сжатие функционирования электрических цепей (например, фильтрацию, распространение, мультиплексирование...) в пространствах меньше длины волны и соответственно произвести увеличение рабочей частоты на несколько порядков.



**Рис. 1.56.** Изображение стандартных элементов электронной схемы ( $L$ ,  $C$  и  $R$ ) и их структура на наноуровне: *a* — геометрия обобщенного элемента наносхемы, размер которого меньше длины волны; *б* — модель эквивалентной схемы для нанопроволоки, зависящая от электрических свойств материала. Также показано схематическое изображение линий электрического поля внутри нанопроволоки<sup>1</sup>

Кроме того, в последнее время повысился интерес к комбинированию оптически управляемых устройств (таких, как оптронная связь) с микро- и наноэлектронными цепями..., так как все еще нет возможности выполнить все операции, производимые в классических электрических цепях, в оптической области. Введение новых парадигм и осуществимых методов с целью реализации все большего числа функций электрических цепей в оптической области могло бы позволить добиться существенного прогресса в наноэлектронных технологиях...

Мы ввели и обсудили фундаментальные понятия, необходимые для разработки новой парадигмы исследования оптических наночепей с целью расширения классической концепции электрических

<sup>1</sup> *Silveirinha M.G., Alù A., Li J., Engheta N. Nanoinsulators and nanoconnectors for optical nanocircuits, p. 7.*

цепей, обычно применяемой для исследования радиочастот и низких частот, на более высокие частоты и в особенности на оптическую область. В частности, мы обсудили... каким образом соответствующая комбинация плазмонных и неплазмонных наночастиц может конституировать сложные наноцепи на инфракрасной и оптической частотах, для которых не применимы традиционные элементы обычных схем с распределенными параметрами» [87, р. 144107-1].

Итак, классическая теория электрических цепей, используемая обычно для анализа и синтеза микроволновых и низкочастотных систем, распространяется в нанотехнонауке на системы, работающие на высоких частотах и особенно в оптическом диапазоне. Взятые из этой теории стандартные идеализированные элементы ставятся в соответствие элементам наноцепей — наноиндуктивностям и наноемкостям, — как их точные модели или эквивалентные схемы. Вводится также понятие «оптический нанодиэлектрик для тока смещения» и делается вывод, что элементы наноцепей могут быть точно описаны с помощью стандартных понятий теории электрических цепей и эквивалентным полным сопротивлением. Это позволяет рассматривать наномодули, состоящие из элементов схем с сосредоточенными параметрами, в качестве строительных блоков более сложных наносхем, работающих в области оптического диапазона волн [88, р. 64].

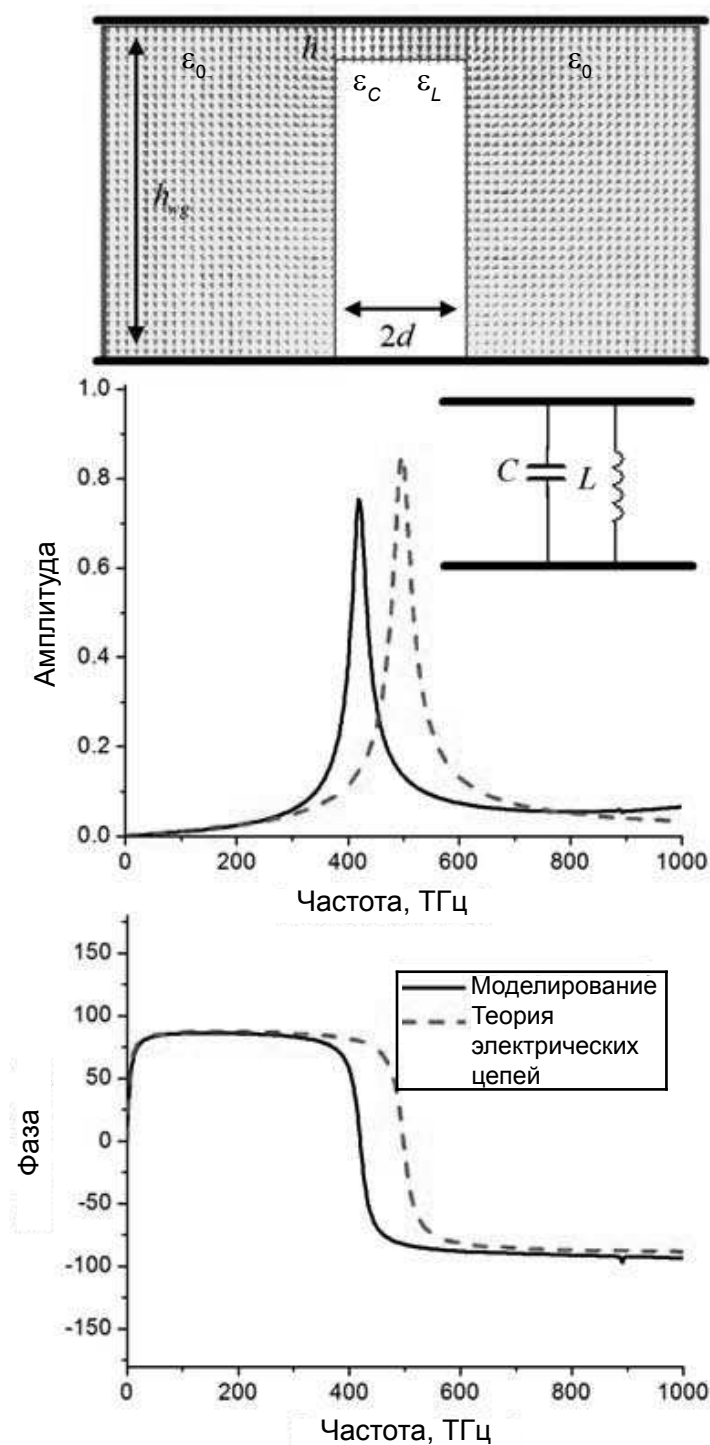
*Аналитические квазистатические модели* (смоделированные теоретически) связи наночастиц, находящихся в оптическом электрическом поле, рассмотренные в рамках теории оптических наноцепей с сосредоточенными параметрами, показаны на рис. 1.59 и 1.60. Эти модели имеют важное значение для анализа и понимания сложных оптических наносхем инфракрасного и оптического диапазонов.

Далее демонстрируется метод анализа взаимодействия и связи двух элементов сосредоточенной наноцепи.

На этой основе может быть осуществлен *синтез* наноцепей, в которых используются плазмонные и неплазмонные наночастицы, из трех базисных элементов цепи — наноиндуктивности, наноемкости и наносопротивления (рис. 1.61). «Все эти понятия являются важным шагом к возможности синтезировать монтажные схемы сложных оптических наносистем, функционально подобных классическим высокочастотным схемам (осуществляющих, например, фильтрацию, волноводную передачу, мультиплексирование<sup>1</sup>...)».

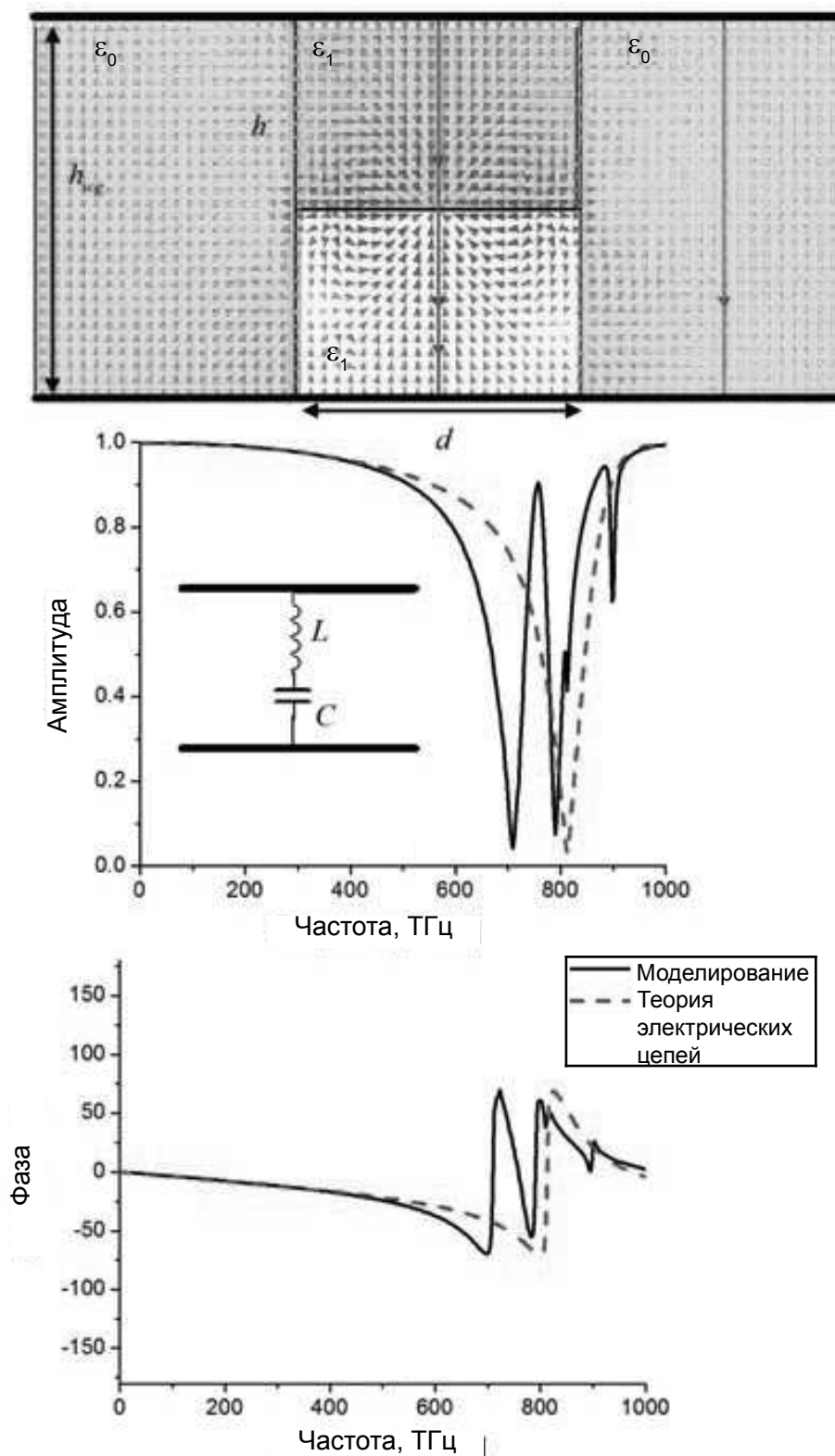
---

<sup>1</sup> Передача по одному физическому каналу данных нескольких устройств методом временного или частотного его разделения на подканалы.

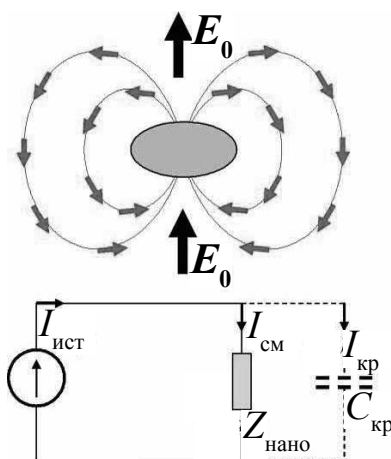


**Рис. 1.57.** Передаточная функция (амплитуда и фаза) и резонансное распределение электрического поля для оптического полосно-пропускающего нанофильтра, сформированного двумя наностержнями<sup>1</sup>, помещенными параллельно в волноводе, один из которых сделан из кремния, а другой — из серебра [87, р. 144107-4]

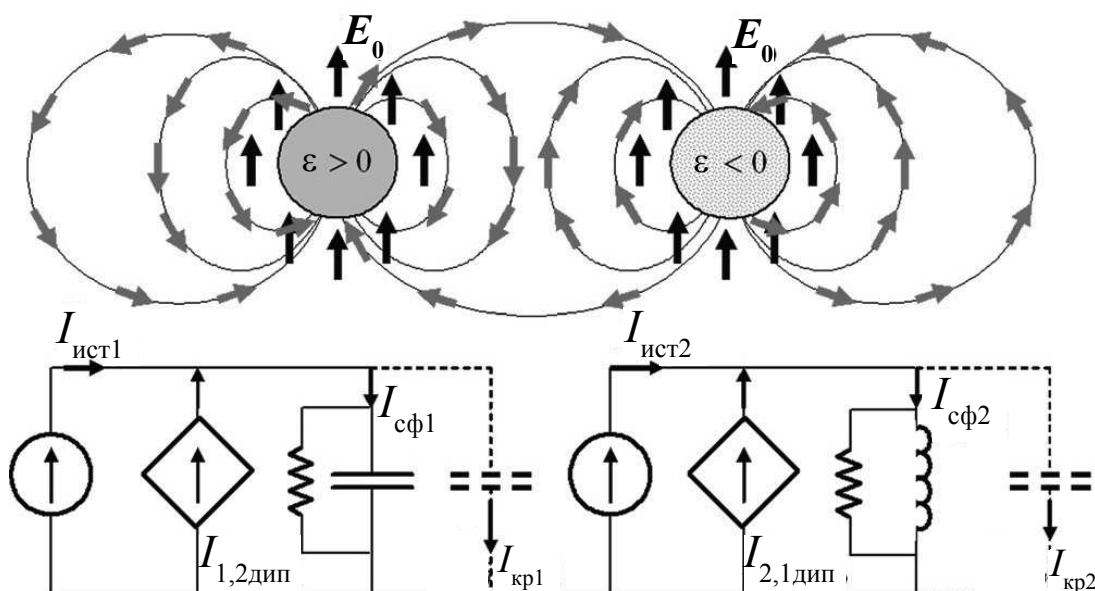
<sup>1</sup> Наностержень (от англ. *nanorod*) — нанообъект, у которого два размерных параметра находятся в диапазоне 1–100 нм, а третий (длина) — несколько больше.



**Рис. 1.58.** Резонансное распределение электрического поля и передаточная функция для полосно-заграждающего нанофильтра, сформированного двумя наностержнями, помещенными последовательно в волноводах, один из которых сделан из кремния, а другой — из серебра [87, р. 144107-4]



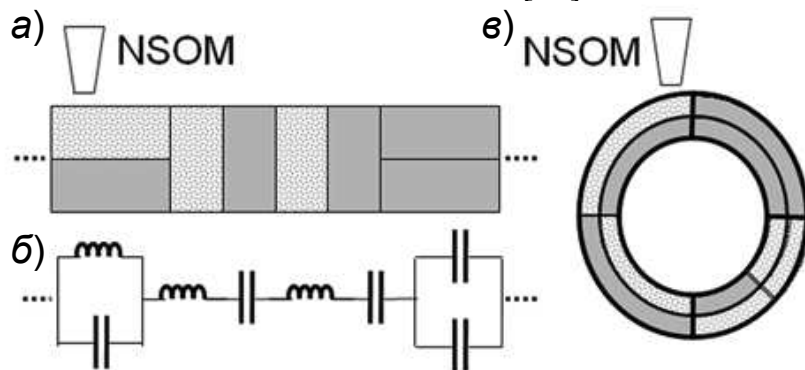
**Рис. 1.59.** Модель связки наночастиц, находящихся в однородном электрическом поле  $E_0$  (темные стрелки):  $I_{\text{ист}}$  – ток, подаваемый от источника;  $I_{\text{см}}$  – ток смещения;  $I_{\text{кр}}$  – краевой ток;  $Z_{\text{нано}}$  – полное (нано-) сопротивление;  $C_{\text{кр}}$  – краевая емкость, которая связана с ее краевыми дипольными полями (светлые стрелки)



**Рис. 1.60.** Две смежные наносферы, представленные как два взаимосвязанных наноэлемента:  $I_{\text{ист1}}$  – ток от источника;  $I_{1,2\text{дип}}$  – ток диполя первой сферы (наночастицы);  $I_{2,1\text{дип}}$  – то же, второй сферы;  $I_{\text{сф1}}$ ,  $I_{\text{сф2}}$  – ток на сферах 1 и 2 соответственно;  $I_{\text{кр1}}$ ,  $I_{\text{кр2}}$  – краевой ток на 1-й и 2-й наночастицах соответственно

Такой подход «позволил бы на основе количественного проектирования *синтезировать* желаемые наноструктуры (такие, как нано-фильтры, нанолинии передачи, параллельные и последовательные комбинации наноэлементов и т. п.), работающие в режиме оптических частот, используя соответствующим образом спроектированные наборы наночастиц, действующих как элементы наносхем с сосредоточенными параметрами. Эта концепция может открыть путь

к проектированию более сложных наноцепей и наносистем, функционирующих в оптическом диапазоне» [89].



**Рис. 1.61.** Синтез наноцепей: *а* – абстрактная наноцепь, сформированная прямоугольными блоками из плазмонных и неплазмонных сегментов; *б* – ее эквивалентная электрическая схема; *в* – замкнутый наноконтур

Таким образом, функционирование технической теории (также и в нанотехнонауке) направлено на *аппроксимацию* полученного теоретического описания технической системы, его эквивалентное преобразование в более простую и пригодную для проведения расчетов схему, сведение сложных случаев к более простым и типовым, для которых существует готовое решение. Поэтому главное внимание в технической теории уделяется разработке типовых способов решения инженерных задач, стандартных методик проведения инженерных расчетов как можно более простыми средствами. Этим определяется в значительной степени и характер технической теории, доказывающей правомерность такого рода эквивалентных преобразований и аппроксимаций.

Слово «аппроксимация» в своем первоначальном значении в математике означает замещение каких-либо математических функций или расчетных схем другими, приближенно выражающими их, эквивалентными им в определенном отношении и более простыми функциями или расчетными схемами, для которых уже существуют или могут быть получены известные решения. В технических науках это понятие получило более широкое толкование как процедура решения инженерных задач на теоретических схемах с помощью ряда их эквивалентных замен и упрощений.

Сущность метода аппроксимации заключается в компромиссе между точностью и сложностью расчетных схем. Точная аппроксимация обычно приводит к сложным математическим соотношениям и расчетам, а слишком упрощенная эквивалентная схема технической системы снижает точность расчетов. Аппроксимирующие выражения и схемы должны, по возможности, точно выражать харак-

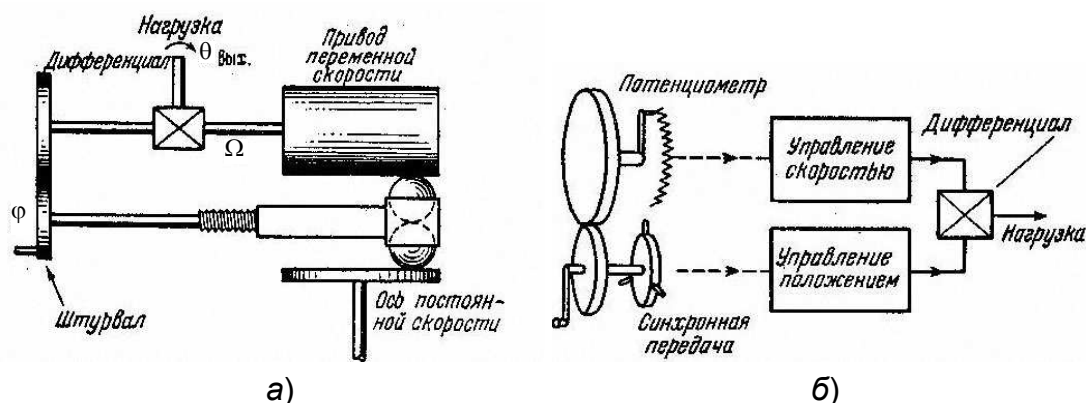
тер аппроксимирующей функции или схемы и в то же время быть как можно проще, чтобы несложными были и математические решения. Причем для одного режима функционирования технической системы может оказаться предпочтительнее один вид аппроксимации, для других режимов — другие виды. Функционирование технической теории представляет собой последовательность аппроксимаций.

#### **1.4. Теория автоматического регулирования — междисциплинарный теоретический синтез на математической основе**

Первоначально различного типа системы автоматического регулирования исследовались и рассчитывались по-разному. Однако постепенно сформировались общие методы расчета, анализа и синтеза следящих систем. Классическая теория цепей стала постепенно областью науки, специализированным разделом знания более широкой научной дисциплины — теории систем. «Отличительной чертой теории систем является ее всеобщность и абстрактность, то, что она математически рассматривает свойства систем, а не их физическую форму. Таким образом, для теории систем неважно является ли система электрической, механической или химической. Главными являются математические соотношения между переменными, описывающими поведение системы» [90, с. 878]. В период становления теории автоматического регулирования (ТАР) уже появились такие классические технические науки, как, например, теория механизмов и машин, теоретическая радиотехника и электротехника. Поэтому ее формирование осуществлялось в двух основных направлениях: во-первых, обобщения уже выработанных в этих дисциплинах теоретических средств и способов решения типовых задач и, во-вторых, развития единого математического аппарата.

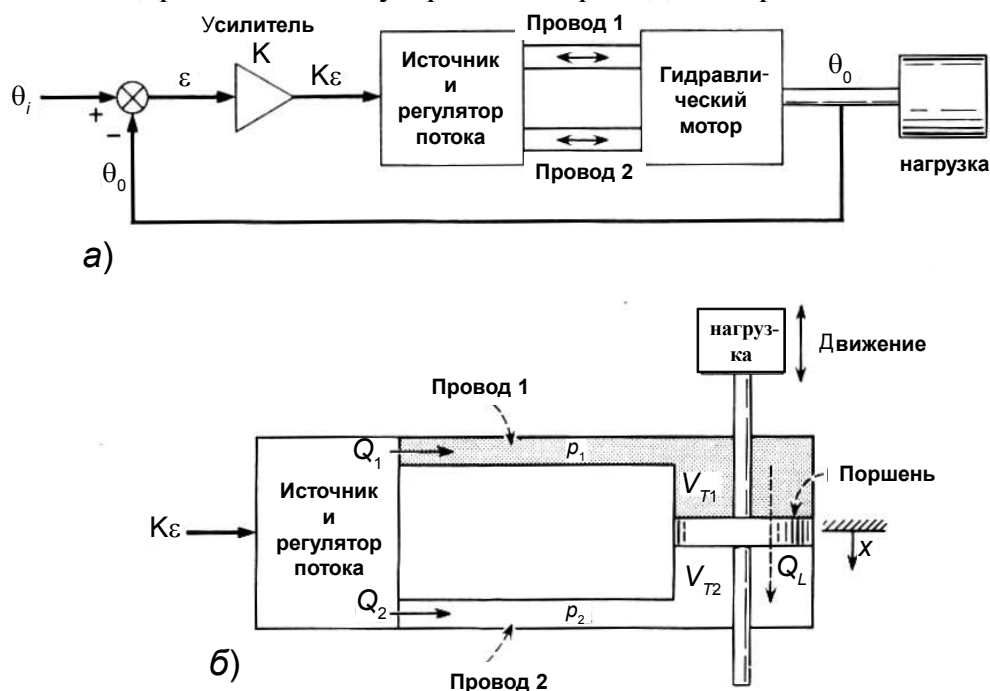
**Первое направление** развернулось примерно в 40-х—50-х гг. XX в., с одной стороны, на базе обобщения разработанных в теоретической радиотехнике способов анализа электрических цепей с помощью так называемых эквивалентных схем и соответствующих эквивалентных преобразований [91], а с другой стороны, для использования и обобщения методов классификации и структурного анализа механизмов, выработанных в теории механизмов для исследования кинематических цепей (см., например, такое кинематическое представление на рис. 1.62) [92]. При этом стали пользоваться терминами механики в более общем смысле, распространяя их и на иные динамические системы [93, с. 5].





**Рис. 1.62.** Механическая система полуавтоматического сопровождения (а) и следящая система полуавтоматического сопровождения с дистанционным управлением (б) [94, с. 446–447]

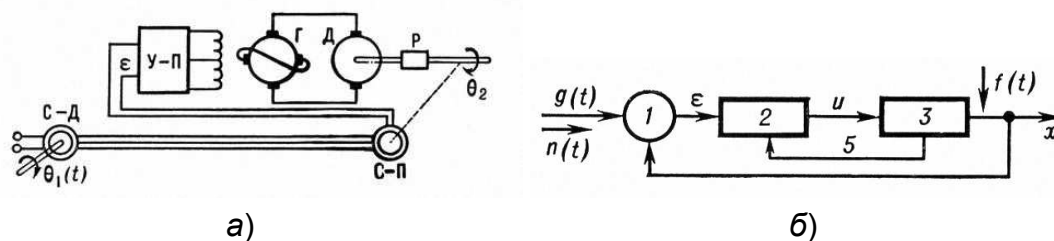
В обобщенных структурных схемах ТАР дается единообразное описание систем автоматического регулирования независимо от конкретного конструктивного воплощения и типа протекающего в них естественного процесса – гидравлического, электрического, механического или пневматического. Пример такого обобщенного описания сложного гидравлического устройства приведен на рис. 1.63.



**Рис. 1.63.** Общая структурная схема сервомеханизма (системы автоматического регулирования с обратной связью), состоящая из суммирующего устройства, усилителя, источника и регулятора потока, гидравлического исполнительного механизма (или мотора) и нагрузки, (а) и поршень, связанный с одной стороны, гидравлически с источником потока, а с другой – механически с нагрузкой, (б) т.е. комбинированная гидравлически-механическая система, описанная в обобщенном виде схемой на рисунке вверху [97, с. 1513]

Все эти системы с математической точки зрения являются подобными: «элементы регуляторов строятся на принципах использования электрической, тепловой и механической энергии... Тем не менее характер процессов, протекающих в системах автоматического регулирования в целом и в отдельных элементах цепи регулирования, во многом аналогичны. Математическое описание этих процессов оказывается одинаковым для самых разнообразных устройств независимо от их конструкции и принципа действия» [95, с. 10–11]. При создании конкретного устройства для выполнения определенной функции с заданными параметрами необходимо «перевести эти, в основном физические, данные на математический язык» и затем решать задачу «за письменным столом» так, чтобы получить нужные результаты в наилучшей системе автоматического регулирования [94, с. 14, 25, 29]. Причем критерий качества такой системы формулируется математически, а реализация может быть в виде самых разнообразных конструкций.

Одним из важнейших приложений теории автоматического регулирования, или, как ее называют в западной литературе, теории сервомеханизмов, стала радиолокация. Радиолокационные станции соединили в себе сложные электронные и электрические системы с такими же сложными механическими блоками. Для управления, например, сложным движением радиолокационной антенны стали разрабатываться сначала аналоговые автоматические следящие системы (рис. 1.64).

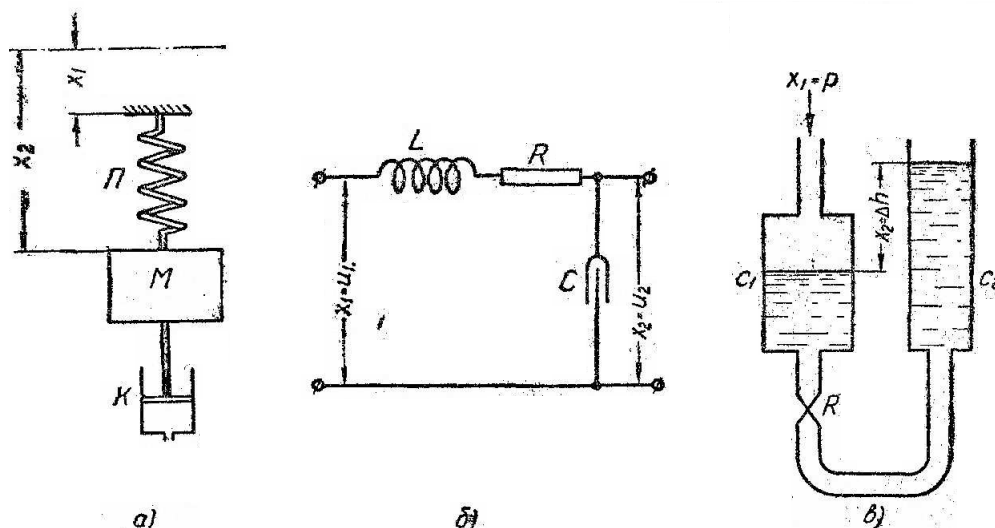


**Рис. 1.64.** Схематические изображения следящей системы радиолокационной станции: *а* – структурная схема следящей системы для отработки на выходном валу угла поворота входного вала ( $\theta_1(t)$  и  $\theta_2$  – углы поворота входного и выходного валов; С-Д – сельсин-датчик; С-П – сельсин-приемник;  $\varepsilon$  – сигнал рассогласования; У-П – усилитель-преобразователь; Г-генератор; Д – двигатель; Р – редуктор); *б* – блок-схема (функциональная схема) следящей системы ( $g(t)$  – заданная входная величина;  $n(t)$  – помехи;  $\varepsilon$  – сигнал рассогласования;  $u$  – сигнал управления;  $f(t)$  – возмущающее действие;  $x$  – выходная величина; 1 – сравнивающее устройство; 2 – усилитель-преобразователь; 3 – исполнительное устройство; 4 – цепь главной обратной связи; 5 – цепь вспомогательной (местной) обратной связи)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> См.: Попов Е.П. Следящая система // Большая Советская Энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1965–1978.

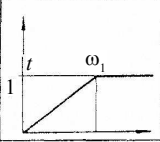
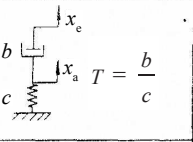
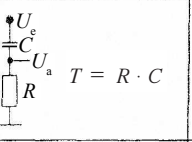
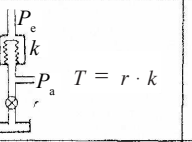
**Второе направление** начало активно разрабатываться с 50-х гг., когда задачами теории автоматического регулирования занялись математики, что способствовало быстрому развитию линейной теории управления. В результате были разработаны единые математические методы анализа и синтеза систем автоматического регулирования практически любого типа независимо от способа их инженерной реализации. «По-видимому, теория автоматического регулирования – единственная область техники, целесообразность которой обусловлена не общностью решаемых проблем или машин, с которыми приходится иметь дело, а с математическими методами» [96, с. 3].

Такие схемы часто заимствовались из соответствующих технических наук без какой-либо перестройки. Это привело к выделению особого звена – регулятора – механических, гидравлических, электрических и других устройств, к которым наиболее хорошо применимы данные методы, как к объекту исследования данной теории (рис. 1.65).



**Рис. 1.65.** Примеры различной реализации колебательного звена – функционального элемента систем автоматического регулирования [95, с. 17]

Развиваются общие методы исследования различных типов регуляторов (рис. 1.66). Понятия, принципы анализа и математический аппарат, развитые первоначально в одной из частей теории автоматического регулирования, например для исследования регуляторов в теории электрических цепей, нашли применение в других ее областях. Это стимулировало развитие особых структурных схем, обобщенных по отношению к частным теоретическим схемам теории механизмов, теоретической радиотехники и электротехники, гидравлики и т. д.

Частотная характеристика	Механическая цепь	Электрическая цепь	Гидравлическая цепь	Частотная функция
	 $T = \frac{b}{c}$	 $T = R \cdot C$	 $T = r \cdot k$	$F = \frac{j\omega T}{1 + j\omega T}$

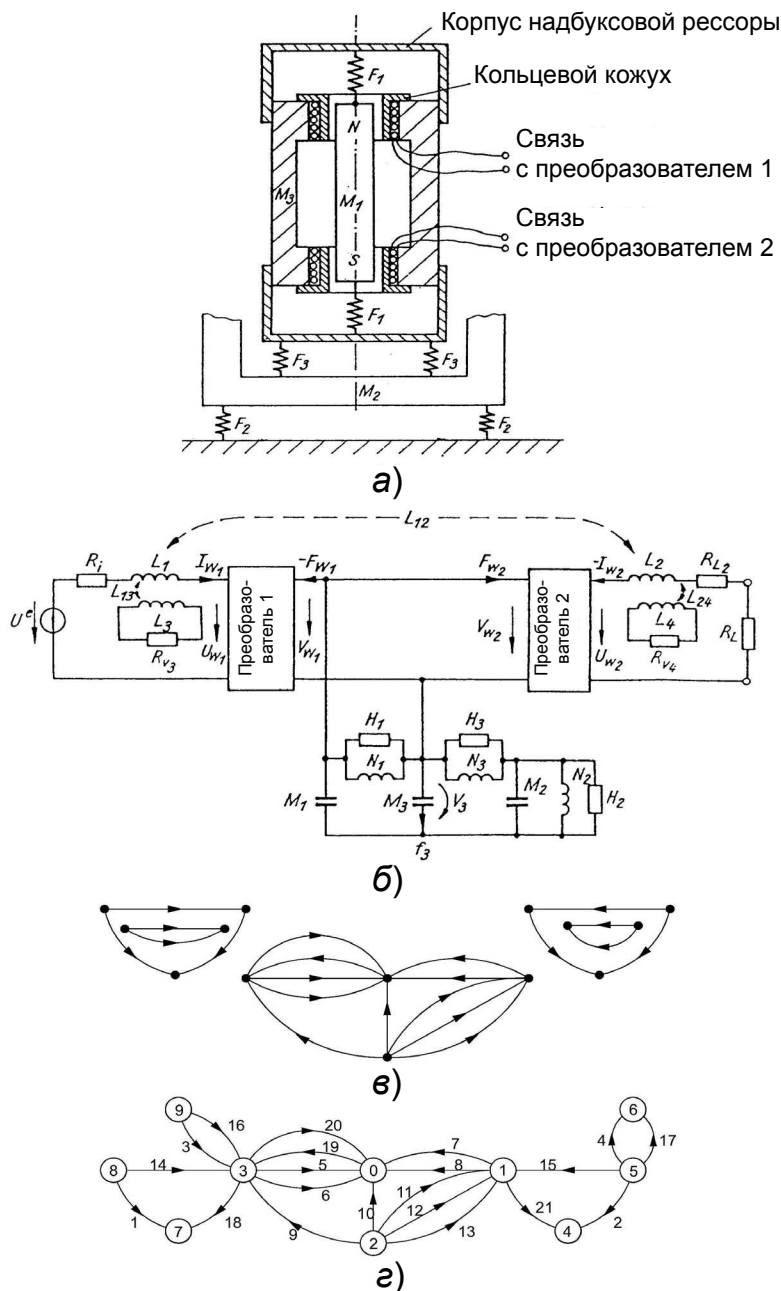
**Рис. 1.66.** Сравнительная таблица эквивалентных механических, электрических и гидравлических регуляторных схем и их частотных характеристик<sup>1</sup>

Первоначально все однородные звенья просто сводились к эквивалентным кинематическим или электрическим схемам, на которых и производились основные расчеты (см., например, рис. 1.67, где показана эквивалентная электрическая схема механического устройства и соответствующие ей математические схемы, построенные на основе теории графов).

Однако для обеспечения эффективного функционирования теории автоматической регуляции необходимо было ликвидировать разрыв между таким единым математическим описанием и разнородными поточными и структурными теоретическими схемами, к которым оно применялось. «В результате анализа структуры матрицы системы дифференциальных уравнений, описывающих поведение автоматической системы, устанавливается физический смысл отдельных элементов ее и указывается один из возможных способов построения структурной схемы системы по элементам этой матрицы» [98, с. 1146], для чего стали применяться такие математические методы, как теория графов, векторный анализ, теория матриц и т. п. (на рис. 1.68 представлена реализация матричного уравнения в виде такой блок-схемы).

«Язык и схемы, используемые для анализа систем автоматического регулирования, увели от физических систем в сторону систем, просто описываемых с помощью разработанного метаязыка... Однако блок-схемы и математические абстракции дали нечто большее, чем просто средства коммуникации... моделирование сделало системы автоматического контроля более доступными для сложной математики. Но, пожалуй, наиболее важно то, что они позволили решать теперь проблемы на бумаге, а не в лаборатории. С помощью абстрактного моделирования стало возможным исследовать новые разработки с точки зрения стабильности, оптимизации, живучести, адаптивности и других свойств систем регулирования без обращения к физическим системам».

<sup>1</sup> См.: Pestel E., Kolmann E. Grundlagen der Regeltechnik. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn, 1968, s. 256–257.

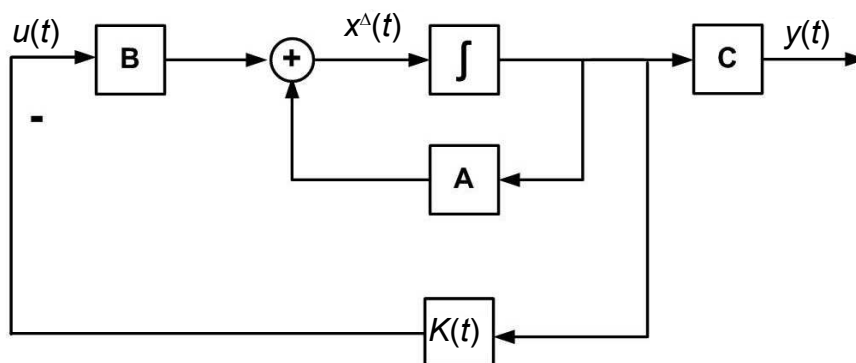


**Рис. 1.67.** Электромеханическая колебательная система (а); эквивалентная ей электрическая цепь (б); ее математическая модель в виде несвязанных графов (в) и преобразование этой модели в систему связанных графов (г)<sup>1</sup>

Математическое моделирование позволило абстрагировать решение инженерных проблем от способов их физической реализации [99, р. 33].

Такой метод структурных преобразований схем автоматических систем и адекватный им математический аппарат — алгебра структурных преобразований — был разработан академиком Б.Н. Петровым.

<sup>1</sup> См.: *Reinschke K.J.* On network models and symbolic solution of network equations // *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.* 2001. Vol. 11. №. 1, p. 269.

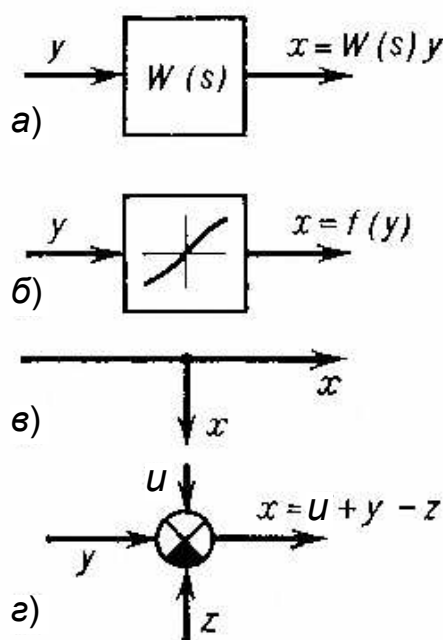


**Рис. 1.68.** Схема оптимального регулятора, построенного на основе матричного уравнения<sup>1</sup>

В своей работе «О построении и преобразовании структурных схем», выполненной под руководством академика Н.Н. Лузина, он пишет: «При анализе и синтезе различных автоматических систем (регулирования, управления, следящих, телемеханических и т. п.), в особенности когда рассматриваются сложные системы, большое значение имеет ясное представление об их структуре, динамических свойствах отдельных элементов и их взаимодействии... Однако, насколько нам известно, не существует методики построения достаточно удобных и наглядных структурных схем, которые не только фиксировали бы наличие отдельных элементов в системе и связей между ними, но отображали бы динамические свойства этих элементов и характер воздействия их друг на друга. В настоящей работе делается попытка найти способ построения подобных схем... Структурные схемы способствуют наглядному представлению о характере и структуре системы, облегчают анализ сложных систем и сравнение различных систем и вариантов их между собой, дают возможность произвести качественную оценку системы — установить наличие жестких и гибких обратных связей и других воздействий в системе, установить астатичность или наличие статизма системы и, кроме того, позволяют провести строгую и обоснованную классификацию автоматических систем» [98, с. 1146, 1162]. Такого рода обобщение в структурных схемах автоматического регулирования открыло целую серию исследований, направленных на анализ общей структуры сложных систем, независимо от способа их реализации (рис. 1.69).

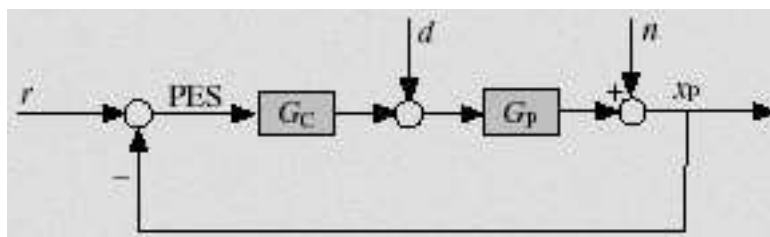
Это положило начало новому этапу развития теории систем в сфере технической науки и техники — системотехнике (см. гл. 3).

<sup>1</sup> См.: *Wintz N.J.* The Kalman filter on time scales. A Dissertation Presented to the Faculty of the Graduate School of the Missouri University of Science and Technology in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Mathematics, 2009.



**Рис. 1.69.** Простейшие соединения линейных звеньев:  
 а – последовательное; б – параллельное; в – с отрицательной обратной связью;  $W(s)$  – передаточная функция;  $y, u, z$  – входные воздействия (сигналы);  $x$  – выходная величина (сигнал)<sup>1</sup>

Сегодня такая реализация структурных схем систем автоматического регулирования возможна даже на наноуровне в рамках нового направления системотехники – наносистемотехники (рис. 1.70).



**Рис 1.70.** Структурная схема, описывающая систему автоматического регулирования нанодиска: PES – расположение сигнала ошибки;  $r$  – биение;  $d$  – нарушение выхода;  $n$  – помехи при измерении;  $G_p, G_c$  – привод движения диска и регулятор;  $x_p$  – трэк биения<sup>2</sup>

Одним из направлений системотехники были также автоматизированные системы управления предприятиями и отраслями промышленности, которые внедрялись в 70-е гг. XX в. как в нашей

<sup>1</sup> См.: Воронов А.А. Структурная схема // БСЭ.

<sup>2</sup> См.: Springer Handbook of Nanotechnology / B. Bhushan (Ed.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2004, p. 969, 974.

стране, так и за рубежом, прежде всего в отраслевых министерствах военно-промышленного комплекса, с целью оптимизации его весьма дорогостоящей и сложной многоуровневой деятельности. Здесь первоначально господствовало кибернетическое представление об управлении как реакции управляющего воздействия на отклонения регулируемой величины от запланированного результата. Это было связано с тем, что в данную отрасль пришли в основном инженеры, воспитанные на представлениях теории автоматического регулирования, показавшей свою успешную применимость в сфере проектирования чисто технических систем. Предприятия же, а в еще большей степени отрасли промышленности и их системы управления представляют собой сложные социально-экономические системы, для описания которых концептуальных структур теории автоматического регулирования и даже кибернетики оказалось недостаточно. Их невозможно и часто просто нецелесообразно полностью автоматизировать. Здесь необходимо проектировать, а точнее реорганизовывать производственную и управленческую деятельность, в частности с использованием машинных компонентов. Поэтому такие системы получили название не систем автоматического управления (САУ), а автоматизированных систем управления (АСУ).

Ранние этапы создания автоматизированных систем были связаны с решением задач управления, сравнительно легко поддающихся алгоритмизации (бухгалтерского учета, составления различного рода ведомостей и других отчетных документов), где кибернетическая модель управления вполне себя оправдывала. В дальнейшем, когда возникла проблема автоматизации творческих управленческих процессов, ее эвристическая ценность существенно уменьшалась, и потребовался поиск новых способов описания как самой управленческой деятельности, так и автоматизированных систем управления. Одной из таких интересных для нашей темы попыток алгоритмического описания сложных видов управленческой деятельности, подлежащей автоматизации, было создание формульно-операторного языка в Институте кибернетики Академии наук УССР, который позволял в унифицированном виде описать действовавшие и новые организационные процедуры [100].

В связи со свертыванием правительственной программы разработки АСУ, которая была тесно связана с плановой экономикой, исследования в этом направлении не получили дальнейшего развития. Однако это стимулировало серию исследований абстрактного уровня — так называемого структурного анализа, направленного на исследование общей структуры сложных систем. Для этого стали применяться современные математические средства, прежде всего



топологические методы, например, теория графов, векторный анализ, а также теория матриц и т.д. При структурных исследованиях систем автоматического регулирования в них не остается иного содержания, кроме связей, их числа, дифференциального порядка, знака и конфигурации, выявляются взаимные связи элементов системы, ее структура, что дает возможность единообразно исследовать различные по своей природе системы [101, с. 11–12].

В современной естественной и технической науке, а также в инженерной деятельности и сфере экономики модельные представления строятся и проигрываются с помощью компьютерного моделирования. С одной стороны, эти модели отражают интересующие данную теорию свойства реальных объектов, а с другой — являются ее оперативными средствами для идеализированного представления и математического расчета этих объектов, что затем может быть практически реализовано в эксперименте или в инженерной деятельности путем устранения побочных влияний техническим путем.

## **1.5. Алгоритмические языки имитационного моделирования**

Именно потребность моделирования сложных процессов и систем, прежде всего в сфере управления промышленными предприятиями, выдвинуло в 1970-е гг. на первый план проблему создания специальных программных средств так называемого имитационного моделирования. «Имитационной называется модель, которая воспроизводит все элементарные явления, составляющие функционирования исследуемой системы во времени с сохранением их логической структуры и последовательности» [102].

Речь шла о моделировании информационных процессов на предприятии в условиях новой ориентации экономики предприятия на применение компьютерной техники, поскольку любое предприятие стало рассматриваться не просто как бюрократическая, с точки зрения М. Вебера, структура, а как система по переработке информации [103, с. 5–6]. По мысли теоретиков этой новой ориентации, имитационное моделирование должно помочь охватить предприятие в единстве и исследовать его общие структурные и процессуальные (имеется в виду процесс производства) взаимосвязи [104, с. 4, 7, 34, 37].

В социальных науках, физических науках, инженерии и сфере бизнеса существует множество проблем, которые могут быть выражены в математической форме, но нет аналитических методов для их решения. Компьютерное моделирование все в большей мере призвано исследовать такие проблемы. Модели сложных физических,

экономических и социальных систем, с одной стороны, становятся все более приближенными к реальности, а с другой — все труднее формулируемыми в математической форме. Кроме того, с современными сложными техническими, экономическими и социальными системами часто невозможно реальное экспериментирование, поэтому становится жизненно необходимым именно компьютерный эксперимент.

Однако создание компьютерных моделей сталкивалось с большими трудностями со стороны специалистов, недостаточно владеющих средствами современного программирования [105, с. 1–3]. Это выдвинуло на первый план необходимость разработки специально для этих целей особых языков программирования, которые получили название алгоритмических языков имитационного моделирования. Они стали своего рода посредниками между структурным представлением сложных систем и их описанием на языках программирования высокого уровня. То есть фактически речь шла о развитии промежуточного слоя абстрактных теоретических схем между словесным и чисто математическим описаниями, который можно отнести к сфере особого квазилогического представления<sup>1</sup>. Компьютерная имитация часто рассматривается как символическая система — посредник между обычным языком и математикой, поэтому в ходе моделирования, программирования и модельного эксперимента выделяются следующие основные уровни абстрактного описания реальных систем: «концептуальная модель, логическая модель и компьютерная модель (программный код)» [106, с. 220]. Нас в данной главе будут интересовать именно особенности построения этого среднего звена.

Описываемые в рамках имитационной программы теории становятся более точными (эта точность задается за счет использования синтаксических структур языков программирования), чем сформулированные на обычном языке. В то же время они являются более гибкими, чем обычным путем математически формализованные теории. Во многих науках, например социальных науках, психологии, науках о поведении, где теории традиционно не могут быть настолько же формализованными и точными, как математизированные физические теории, это приводит к экспликации их теоретических положений и понятий, вскрытию разрывов в аргументации и обосновании теоретических предположений, проведению конструктивной

---

<sup>1</sup> Примером такого описания могут служить операторные схемы Янова. Первой работой, посвященной общей теории преобразования алгоритмов, явилась работа Ю.И. Янова «О логических схемах алгоритмов» (см.: <http://knigechka.blogspot.com/2009/10/32.html>).

критики этих теорий. Именно аспект необходимости экспликации имплицитных положений той или иной теории в процессе построения имитационных моделей является одним из самых важных преимуществ имитационного моделирования.

Наряду с формализацией имитационные модели играют также эвристическую роль при моделировании динамики различных исследуемых процессов. Даже в случае достаточно тривиальных моделей компьютерное моделирование позволяет представить результаты исследования яснее, проще и быстрее.

Для организации эффективного диалога проектировщика (исследователя) с компьютером и облегчения ввода информации и выдачи результатов моделирования стали создаваться специализированные алгоритмические языки моделирования. Особенность их заключается в том, что каждый такой язык имеет тщательно разработанную систему абстракций, закрепленных в соответствующей концептуальной схеме и представляющих собой основу для формализации.

В качестве примера рассмотрим один из самых удачных на то время проблемно ориентированных языков программирования — GPSS (Система общецелевого моделирования — General Purpose Systems Simulator). Проблемной областью GPSS являются системы массового обслуживания (системы с очередями). Основой имитационных алгоритмов в GPSS является дискретно-событийный подход. Целью его создания было обеспечить пользователя инструментом, который мог использоваться и не программистом. Общий метод в разработке имитационных приложений состоит в том, что нужно начинать с простейшей модели и затем добавлять все больше и больше деталей. GPSS для этого хорошо приспособлен.

Первая версия системы появилась в 1961 г. и называлась GPSS. Далее последовательно друг за другом появились GPSS II (1963 г.), GPSS III (1965 г.), GPSS/360 (1967 г.), GPSS V (1971 г.). Все эти версии были разработаны и поддерживались фирмой IBM. Наиболее удачными были две последние версии. Появление персональных ЭВМ и принципиально новых идей и подходов взаимодействия человека с ЭВМ не могло не отразиться на GPSS. Он несколько утратил свою привлекательность. Появились новые системы моделирования, использующие возможности новой техники — оперативность, интерактивность, наглядность при разработке моделей и проведении исследований. Но, пройдя нелегкий путь переосмысления и адаптации к новым условиям, GPSS выжил. Огромный потенциал, заложенный в алгоритмах дискретно-событийного подхода к моделированию, исключительно лаконичная проблемная ориентация языка и энтузиазм разработчиков позволили это сделать.

Таким образом, GPSS активно развивался и развивается. В последние годы в связи с возрождением интереса к GPSS начало появляться много новых учебно-методических материалов<sup>1</sup>.

Структура моделируемой системы описывается в GPSS в форме блок-схемы, вычерченной из заранее определенных стандартных блоков. Каждый тип блока представляет собой специфическую деятельность, т. е. характеризует некоторую базисную операцию, которая осуществляется в системе. Наиболее важный класс объектов — это транзакты, которые движутся в системе, производя ряд воздействий на ее статические элементы (системное оборудование) — установки (средства обслуживания, устройства для последовательной обработки транзактов), хранилища (память, склад — служит параллельной обработке транзактов) и логические переключатели, выполняющие функцию регуляторов потоков в модели и имеющие два состояния: включен и выключен.

«Язык GPSS представляет собой интерпретирующую языковую систему, применяющуюся для описания пространственного движения объектов. Такие динамические объекты в GPSS называются транзактами и являются элементами потока. В процессе имитации транзакты “создаются” и “уничтожаются”... Каждый транзакт имеет набор параметров» [102]. Подобно реальному объекту, перемещающемуся в моделируемой системе, транзакт совершает движение через программу, выполняя тем самым ее операторы.

Для наблюдения за функционированием модели используются статистические элементы языка, к которым относятся очереди (ведут подсчет среднего числа задержанных транзактов и средней продолжительности таких задержек) и таблицы, которые используются для исследования частоты любой случайной величины. Учет очередей составляет одну из основных функций этой системы моделирования, причем основные выходные данные, такие как очереди и статистика, получаются *автоматически* без какого-либо программирования.

Главным для GPSS является имитирование процессов функционирования системы, описываемых блок-схемой, которая фактически представляет собой поточную теоретическую схему. Блоки этой схемы, связанные со статическими элементами, характеризуют определенные состояния системы в процессе ее функциониро-

---

<sup>1</sup> См.: *Девятков В.В.* GPSS — Введение. Мировая история. — <http://www.gpss.ru/>), а также: Ингольф Сталл. GPSS — 40 лет развития. Департамент управления высшего уровня экономики Стокгольмской школы экономики: Тр. конф. WSC-2001, 9—12 дек. 2001 г. Пер. с англ. (Элина-Компьютер, г. Казань. — [http://www.gpss.ru/paper/stahl/index\\_w.html](http://www.gpss.ru/paper/stahl/index_w.html); GPSS — 40 лет: перспективы развития. — [http://www.gpss.ru/paper/wsc2001/index\\_w.html](http://www.gpss.ru/paper/wsc2001/index_w.html)

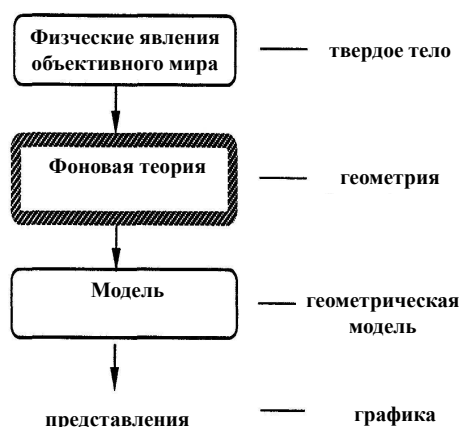
вания, а блоки, связанные с транзактами, — связи перехода между этими состояниями. Линии, соединяющие блоки, указывают пути движения транзактов в системе, т. е. описывают последовательность происходящих в ней событий. Описание модели в виде блок-схемы автоматически переводится в машинную кодовую модель, представляющую собой функциональную (математическую) теоретическую схему. В то же время каждому из элементов модели могут соответствовать различные реальные объекты: установка может означать кассу в банке или причал в порту, хранилище может быть дорогой или гаванью, логический переключатель — реле или светофором, а транзакты — автомобилями, судами или сообщениями. Отношения между ними отражаются в «очередях» и «таблицах».

На рис. 1.71 приведен пример поточной схемы для простейшей портовой системы [107, р 476], но это может быть и описание алгоритма проектирования или процесса обработки деталей на промышленном предприятии. Алгоритмический язык имитационного моделирования GPSS является инструментом, который инженер-системотехник может использовать для конструирования способной к саморазвитию модели и манипулирования ею. Он может быть использован для моделирования совершенно различных физических систем. Однако важно учитывать, что любые такие модели не в состоянии полно отражать оригинал. Моделирование — это не копирование. Имитационная (или математическая) модель располагает относительно небольшим числом свойств, которые соответствуют (правда, всегда с помощью аппроксимации) моделируемой реальности. Модель, выраженная в подобном языке, служит основой для проведения компьютерных экспериментов (т. е. варьирования параметрами модели) и сбора статистических данных для последующего их сравнительного анализа [108, р. 33–35].

Таким образом, строго определенные понятия алгоритмических языков имитационного моделирования позволяют осуществить формализацию различных аспектов модели и реализовать ее на компьютере. В понятиях алгоритмических языков имитационного моделирования задается «образ» объекта, детерминированный той или иной математической теорией, интерпретацией которой является данный язык, например теорией массового обслуживания (рис. 1.72). Поэтому концептуальный каркас такого языка в значительной степени определяет и область его применения. Для описания взаимосвязей элементов системы, а также системы и системного окружения, для ее иерархического представления используются главным образом теория множеств и исчисление предикатов.



**Рис. 1.71.** Блочное представление жизни модели (порта) как течение временных транзактов (судов), продвигающихся в модели и обслуживающихся в постоянных устройствах (портовых терминалах) [109, с. 475]: GENERATE – генерирует транзакты через  $A$  единиц времени, модифицированных  $B$  с задержкой  $C$ ,  $D$  транзактов, с приоритетом  $E$ , форматом  $FB$ ; QUEUE – обеспечивает занятие  $B$  мест в очереди  $A$ ; SEIZE – занимает устройство с номером  $A$ ; DEPART – обеспечивает освобождение  $B$  единиц в очереди  $A$ ; ADVANCE – задерживает транзакт на время  $A \pm B$ , если  $B$  – const, или  $A \times B$ , если  $B$  – функция; RELEASE – освобождает устройство с номером  $A$ ; TABULATE – табулирует значения входящих транзактов в таблице  $A$ ; TERMINATE – уничтожает  $A$  транзактов



**Рис. 1.72.** Теория, модели и (компьютерные визуализированные) представления в системах автоматизации проектирования [110]

«Модели и репрезентации (компьютерные визуализированные представления) являются различными. Может существовать множество моделей, как и множество теорий одной и той же сущности. А модель в свою очередь может иметь несколько репрезентаций... Возьмем, например, механическую систему. Геометрическая модель является моделью этой системы, сконцентрированной на таких геометрических свойствах, как поверхности, линии, кривые и точки. Теория, которая лежит за геометрической моделью («фоновая теория»), — алгебраическая геометрия, поскольку ее геометрические сущности представлены как алгебраические уравнения. В то же самое время мы можем сконструировать кинематическую модель, основанную на кинематике, ... или же структурную модель на основе классической теории автоматического регулирования. Две модели могут быть преобразованы одна в другую, только если лежащие в их основе фоновые теории совместимы» [110, р. 432].

Особое значение имитационное моделирование на ЭВМ приобретает в рамках системотехники. Разработка автоматизированных систем управления и необходимых для их моделирования специализированных алгоритмических языков привела к формированию нового неклассического этапа в развитии технических наук и изменило структуру и характер теоретических исследований в современных научно-технических дисциплинах. Создание так называемых диалоговых систем позволяет инженеру-системотехнику значительно расширить свои аналитические средства, повысить качество и обоснованность проектных решений и существенно сократить время их выработки. Диалоговые системы называются так именно потому, что между исследователем (проектировщиком) и компьютером осуществляется своего рода диалог: человек не только вводит данные в машину и получает готовое решение, но может изменять условия в ходе моделирования, корректировать этот процесс.

В системотехнике очень важно осуществить стыковку подсистем проектируемой системы и различных специалистов, участвующих в их создании, уже на ранних стадиях проектирования. Диалоговые системы позволяют работать с единой моделью (вводить в нее новые данные, вносить коррективы и т.д.) как различным узким специалистам, так и универсалистам. Причем в компьютере эти данные варьируются, и выдаются варианты решения, из которых можно выбрать наиболее подходящие для данного случая (принятие решения остается, конечно, за человеком). Можно, кроме того, вызвать из памяти компьютера нужные данные, поскольку целостная модель проектируемой или исследуемой системы постоянно хранится там в течение всего процесса проектирования (исследования).

*Моделирование функционирования системы* позволяет уже на ранних этапах проектирования представить систему как целостный объект. Анализируя такую модель, инженер-системотехник может принимать научно обоснованные решения по выбору наиболее подходящей реализации отдельных компонентов с точки зрения их взаимосвязи и взаимного функционирования, учесть заранее различные факторы, влияющие на систему в целом, и условия ее функционирования, выбрать наиболее оптимальную структуру и наиболее эффективный режим ее работы. Однако для сложных человеко-машинных систем такой анализ невыполним средствами традиционного моделирования, ему обязательно требуется компьютерная поддержка. Без использования современной вычислительной техники просто невозможно учесть те многочисленные данные о сложной системе, которые необходимы исследователю и проектировщику, особенно если иметь в виду их разнородность, связанную с использованием знаний самых различных дисциплин и участием в создании таких систем разнообразных специалистов.

Кроме того, становится возможным моделировать на компьютере сложные связи между компонентами системы и зависимости между процессами их функционирования. Такая *автоматизация имитационного моделирования* и направлена как раз на расширение возможностей исследователя и проектировщика при исследовании стоящих перед ними задач в плане прогнозирования поведения системы в различных меняющихся условиях и выбора адекватных этим условиям проектных решений. Применение алгоритмических языков имитационного моделирования в плане математизации и формализации системных представлений не только важно для развития теоретической системотехники — эти языки являются средством математизации как современных научно-технических знаний вообще, так и многих других наук, ранее не поддававшихся математизации.



## Литература

1. *Герон*. Механика. Архимед. Сочинения. М.: ГИФМЛ, 1962.
2. *Левина И.С., Рожанская М.М.* У истоков механики машин // Исследования по истории механики. М.: Наука, 1983.
3. *Галилео Галилей*. Пробирных дел мастер. М.: Наука, 1987.
4. *Галилео Галилей*. Избр. труды: в 2 т. М.: Наука, 1964. Т. 1.
5. *Григорьян А.Т.* Механика от античности до наших дней. М.: Наука, 1971.
6. *Архимед*. Сочинения. М.: ГИФМЛ, 1962.
7. *Hürter T.* Das Urwerk // Die Zeit, 30. November 2006 (mit Bildergalerie).
8. *Evans J., Carman Ch.C. and Thorndike A.S.* Solar Anomaly and Planetary Displays in the Antikythera Mechanism // Journal for the History of Astronomy. 2010. Vol. 41. № 142.
9. *Lippe W.* Das Räderwerk von Antikythera. Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Buchskript: Geschichte der Rechenautomaten, 2011.
10. *Гюйгенс Х.* Три мемуара по механике. М.: АН СССР, 1951.
11. *Huygens Ch.* Die Pendeluhr. Horologium oscillatorum. Leipzig, 1913.
12. *Берман Г.Н.* Циклоида. М.: Наука, 1980.
13. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии // Крылов А.И. Сочинения. Т. VII. М.; Л.: АН СССР, 1936.
14. *Beck Th.* Beitrage zur Geschichte des Maschinenbaues. Berlin, 1899.
15. *Weigel Ch.* Die Bauleute. München: Verlag Georg D.W. Callwty, 1963.
16. *Feldhaus F.M.* Geschichte des technischen Zeichnens. Wilhelmshafen, 1953.
17. *Гофф Ж. Ле.* Цивилизация средневекового Запада. Сретенск: МЦИФИ, 2000.
18. *Veranzio F.* Erfindungen von einst. Dortmund: Harnberg, 1982.
19. Эстетика Ренессанса. Т. I. М.: Искусство, 1981.
20. *Григорьян А.Т., Зубов В.П.* Очерки развития основных понятий механики. М., 1962.
21. *Гуковский М.А.* Механика Леонардо да Винчи. М.; Л.: АН СССР, 1947.
22. *Pedretti C.* Leonardo. The machines. Florence: Giunti, 1999.
23. *Veltmann K.H.* Visualisation and Perspective // Leonardo e l'Eta della Ragione a cura di Eurico Bellone e Paolo Rossi. Milano: Scienza, 1982.
24. *Капра Ф.* Наука Леонардо. Мир глазами великого гения. М.: София, 2009.
25. *Lewinter R.* Diderot und die Enzyklopädie // Diderots Enzyklopädie. Die Bildtafeln. 1762–1767. Erster Band. Augsburg: Weltbild Verlag GmbH, 1995.
26. *Боголюбов А.Н.* Гаспар Монж (1746–1818). М.: Наука, 1978.
27. *Diderots Enzyklopädie. Die Bildtafeln 1762–1777. Zweiter Band. Horlogerie, Differens Echappemens.* Augsburg: Weltbild Verlag, 1995.

28. *Harnest J.* Albrecht Dürer und Perspektive // Stridel P. Dührer. Augsburg: Bechtermünz Verlag, 1996.
29. *Scriba Ch.J., Maurer B.* Technik und Mathematik // Technik und Wissenschaft. Technik und Kultur. Bd. 3. Düsseldorf, 1991.
30. *Гайденок П.П.* Эволюция понятия науки (XVII–XVIII вв.). М.: Наука, 1987.
31. *Декарт Р.* Первоначала философии. Соч.: в 2 т. М.: Мысль, 1989. Т. 1.
32. *Энгельмейер П.К.* Технический итог XIX века. М.: Типография К.А. Казначеева, 1898.
33. *Боголюбов А.Н.* Теория механизмов и машин в историческом развитии ее идей. М.: Наука, 1976.
34. *Redtenbacher F.* Principien der Mechanik und des Maschinenbaues. Mannheim, 1852.
35. *Banse G., Wollgast S.* Biographien bedeutender Techniker. Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag, 1987.
36. *Монж Г.* Начертательная геометрия. М.: АН СССР, 1947.
37. *Клейн Ф.* Лекции по истории математики. М.; Л.: ОНТИ, 1937.
38. *Lanz I., Bethankourt A.* Essai sur la Composition des Machines. Paris, 1808.
39. *Lanz I., Bethankourt A.* Analitical Essay of the Construction of Machines. London, 1920.
40. *Borgnis G.A.* Traite complet de mechanique appliquee aux arts, 1898.
41. *Флаша С.* Основания промышленной механики. М.: Русский книжник, 1843.
42. *Willis R.* Principles of mechanism. London, 1870.
43. *Reuleux F.* Theoretische Kinematik. Braunschweig, 1875. Bd. 1.
44. *Редтенбахер Ф.* Теоретические и практические данные для проектирования и постройки машин. СПб., 1862.
45. *Booker P.J.* A History of Engineering Drawing. London: Chatto & Windus, 1963.
46. *Willis R.* A System of Apparatus for the Use of Lecturers and Experimenters in Mechanical Philosophy: Especially in those branches which are connected with mechanism. London, 1851.
47. *Weihe C.* Franz Reuleaux und die Grundlagen seiner Kinematik. In: Deutsches Museum Abhandlungen und Berichte, Heft 4. Berlin: VDI-Verlag GmbH, 1942.
48. *Scriba Ch.J., Maurer B.* Technik und Mathematik // Technik und Wissenschaft. Technik und Kultur. Bd. 2. Düsseldorf, 1991.
49. *Reuleaux F.* Lehrbuch der Kinematik, V. 2. Die praktischen Beziehungen Kinematik zu Geometrie und Mechanik: Grundzüge einer Theorie des Maschinenwesens. Mit einem Atlas und Zahlreichen in den Text Eingedruckten Holzstichen. Braunschweig : F. Vieweg und Sohn, 1875.
50. *Григорьян А.Т., Фрадлин Б.Н.* История механики твердого тела. М.: Наука, 1982.

51. *Euler L.* Vollständigere Theorie der Maschinen, die durch Wassers in Bewegung versetzt werden. Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann, 1911.
52. *Артоболевский И.И., Боголюбов А.Н.* Леонид Владимирович Ассур. 1878–1920. М.: Наука, 1971.
53. Составление кинематических схем и структурный анализ плоских механизмов: Методические указания к выполнению лабораторной работы № 2 по дисциплине «Теория механизмов и машин» для студентов механических специальностей всех форм обучения / Сост. Н.И. Флусов, А.Ю. Дерипас – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2008.
54. *Smith R.H.* A New Graphic Analysis of the Kinematics of Mechanisms // Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1882–1885. Vol. 32.
55. *Ferguson E.S.* Kinematics of Mechanisms from the Time of Watt. Washington, D.C.: Smithsonian Institution, 1962.
56. *Lipson H.* How to Draw a Straight Line Using a GP: Benchmarking Evolutionary Design Against 19th Century Kinematic Synthesis // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, Late Breaking Paper, GECCO, 2004.
57. *Боголюбов А.Н.* Жан Виктор. 1788–1867. М.: Наука, 1988.
58. *Боголюбов А.Н.* Иван Иванович Артоболевский (1905–1977). М.: Наука, 1982.
59. *Simoni R., Carboni A.P., Martins D.* Enumeration of kinematic chains and mechanisms, 2008.
60. *Добровольский В.В., Артоболевский И.И.* Структура и классификация механизмов. М.-Л.: Мысль, 1939.
61. *Bensaude-Vincent B., Guchet X.* Nanomachine: One Word for Three Different Paradigms // Technè. 2007. Vol. 11. № 1.
62. *Sibley F.H.* Pure Mechanism. A Textbook of Pure Mechanism. N.-Y.: Henry Holt and Company, 1914.
63. *Lipson H.* A Relaxation Method for Simulating the Kinematics of Compound Nonlinear Mechanisms // Journal of Mechanical Design. 2006. Vol. 128.
64. *Drexler K.E.* Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
65. *Reuleaux F.* The Constructor: A hand-book of machine design. Philadelphia: H.H. Suplee, 1894.
66. *Shaw M.C., Jackson M.J.* The size effect of micromachining // Microfabrication and Nanomanufacturing, CRC Press, Taylor and Francis Publishers, Florida, USA, 2005.
67. *Berger M.* Speeding up catalytic nanomotors with carbon nanotubes, May 1, 2008. – <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=5553.php>
68. *Berger M.* Biohybrid nanocontainers with controlled permeability. & Understanding the interactions of nanostructures with biological systems. Nanowerk LLC, 2008. – <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=4972.php>
69. *Энгельмейер П.К.* Что такое: принцип, система, конструкция в машинах // Бюл. политехн. о-ва, 1901. № 7.

70. Börsch M., Wrachtrup J. The Electro-Mechanical Coupling Within a Single Molecular Motor // Nanotechnology – Physics, Chemistry, and Biology of Functional Nanostructures. Results of the first research programme Kompetenznetz «Funktionelle Nanostrukturen» (Competence Network on Functional Nanostructures). Th. Schimmel et al. Stuttgart: Landesstiftung Baden-Württemberg, 2008.
71. Noji H., Yoshida M. The Rotary Machine in the Cell, ATP Synthase // J. Biol. Chem., 2001. Vol. 276. Is. 3.
72. Brandon R. Concepts and Methods in Evolutionary Biology. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
73. Tepe R. Elektrodynamik im 19. Jahrhundert // Heinrich Hertz: Festschr. Anlässl. D. Forschung d. elektromagnet. Wellen vor 100 Jahren. Berlin: Henrich-Hertz-Inst., 1988.
74. Максвелл Д.К. Атом // Дж. К. Максвелл. Статьи и речи. М.: Наука, 1968.
75. Белевич В. Краткая история развития теории цепей // Труды института радиоинженеров, 1962. Т. 50. Ч. 1. № 5.
76. Симоненко О.Д. Электротехническая наука в первой половине XX века. М.: Наука, 1988.
77. Mathis W. Theorie nichtlinearer Netzwerke. Berlin, Heidelberg u. a.: Springer-Verlag, 1987.
78. Хоффер А., Герхард Г. Графические методы в управлении. М.: Экономика, 1971.
79. Staehler R.E. An Application of Boolean Algebra to Switching Circuit Design // Bell System Technical Journal. 1952. Vol. 31. Is. 2.
80. Карсон Д.Р. Электрические нестационарные явления и операционное исчисление. Харьков: Гос. науч.-техн. изд-во Украины, 1934.
81. Фостер Р. Чисто теоретическое и прикладное значение теории цепей // Труды института радиоинженеров, 1962. Т. 50. Ч. 1. № 5.
82. Shannon C. Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits // Trans. of the Amer. Institute of Electr. Engineers. 1938. Vol. 57.
83. Starzyk J.A., Sliwa E. Upward Topological Analysis of Large Circuits Using Directed Graph Representation // IEEE transactions on circuits and systems. 1984. Vol. CAS-31. № 4.
84. Laker K.R. Equivalent Circuits for the Analysis and Synthesis of Switched Capacitor Networks // Bell System Technical Journal. 1979. Vol. 58. Is. 3.
85. George A. Campbell, 1870–1954 // Bell System Technical Journal. 1995. Vol. 34. Is. 1.
86. Campbell G.A. Dr. Campbell's Memoranda of 1907 and 1912 // Bell System Technical Journal. 1935. Vol. 14. Is. 4.
87. Peterson L.C. Equivalent Circuits of Linear Active Four-Terminal Networks // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. Is. 4.
88. Cermak I.A., Kirby Mrs. D.B. Statistical Circuit Design: Nonlinear Circuits and Statistical Design // Bell System Technical Journal. 1971. Vol. 50. Is. 4.

89. *Ryder R.M., Kircher R.J.* Some Circuit Aspects of the Transistor // Bell System Technical Journal. 1949. Vol. 28. Is. 3.
90. Geschichte der Technikwissenschaften / Hrsg. von G. Buchheim, R. Sonnemann. Basel; Boston; Berlin: Birkhauser, 1990.
91. *Sherrity S., Wiedericky H.D., Mukherjeey B.K., Sayerz M.* An accurate equivalent circuit for the unloaded piezoelectric vibrator in the thickness mode // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. Vol. 30.
92. *Silveirinha M.G., Alù A., Li J., Engheta N.* Nanoinsulators and nanoconnectors for optical nanocircuits // Journal of applied physics. 2008. Vol. 103.
93. *Herzog J., Feldmann C.* Die Berechnung Elektrischer Leitungsnetze in Theorie und Praxis. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1921.
94. *Новгородцев А.Б.* 30 лекций по теории электрических цепей: электронный учебник. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002.
95. *Rausch R.G.* The Analysis of Valve-Controlled Hydraulic Servomechanisms // Bell System Technical Journal. 1953. Vol. 38. Is. 6.
96. *Bissell Ch.* Models and «black boxes»: mathematics as an enabling technology in the history of communications and control engineering // Revue d'Histoire des Sciences. 2004. Vol. 57. № 2.
97. *Alù A., Engheta N.* A Hertzian Plasmonic Nanodimer as an Efficient Optical Nanoantenna // Physical Review B. 2008. Vol. 78. Is.19.
98. *Alù A., Salandrino A., Engheta N.* Coupling of Optical Lumped Nanocircuit Elements and Effects // Optics Express. 2007. Vol. 15. Is. 21.
99. *Alù A., Youngy M.E., Engheta N.* Design of nanofilters for optical nanocircuits // Physical Review Letters B. 2008. Vol. 77.
100. *Заде Л.* От теории цепей к теории систем // Труды института радиоинженеров. 1962. Т. 50. Ч. 1. № 5.
101. *Михайлов А.* Метод гармонического баланса в теории автоматического регулирования // Автоматика и телемеханика. 1938. № 3.
102. *Гальперин И.И.* Структурное исследование регулируемых систем // Известия ВТИ. 1941. № 4.
103. *Воронов А.А.* Элементы теории автоматического регулирования. М.: Военное изд-во, 1950.
104. Теория следящих систем / под ред. Х. Джеймса, Н. Никольса, Р. Филлипса. М.: ИЛ, 1953.
105. *Лернер А.Я.* Расчленение систем автоматического регулирования на элементы. М.: Машгиз, 1949.
106. *Ауслендер Д.М.* Развитие науки об автоматическом управлении. // Динамические системы управления. Труды американского общества инженеров-механиков, 1972. Т. 94. № 1.
107. *Петров Б.Н.* О построении и преобразовании структурных схем // Известия АН СССР. ОТИ, 1945.
108. *Bergbreiter S.* Moving from Practice to Theory: Automatic Control after World War II HIS 285S: History of Science, University of California, Berkeley, 2005.

109. *Шкурба В.В.* Формульно-операторный язык // Автоматизированные системы управления предприятием. Киев, 1969.
110. *Нечипоренко В.И.* Структурный анализ и методы построения сложных систем. М.: Сов. радио, 1977.
111. Имитационное моделирование на языке GPSS / сост. А.А. Алтаев. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2001.
112. *Müller W.* Die Simulation betriebswirtschaftlicher Informationssysteme. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, 1969.
113. *Ludewig J.* Simulationsmodelle ganzer Unternehmungen. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, 1969.
114. *Wyman F.P.* Simulation modeling: a guide to using SIMSCRIPT. N.Y., London etc.: John Wiley & Sons, Inc., 1970.
115. *Liebl Fr.* Simulation: problemorientierte Einführung. München; Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1995.
116. *Naylor T.H.* Computer Simulation Experiments with Models of Economic Systems. N.Y.: John Wiley & Sons, 1971.
117. *Smith Jr. E.C.* Simulation in systems engineering // IBM Systems Journal. 1963.
118. *Нейлор Т.* Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем. М.: Мир, 1975.
119. *Kiriyama T., Yamamoto F., Tomiyama T., Yoshikawa H.* Metamodel: An Integrated Modeling Framework for Intelligent CAD. In: Artificial Intelligence in Design / Ed. by J.S. Gero. Berlin, Heidelberg, N.Y., L. etc.: Springer-Verlag, 1989.

## **Глава 2**

# **ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ И ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ**

### **2.1. Классические технические науки**

Классические технические науки, как хорошо известно, генетически тесно связаны с естественными науками. Они испытывают их влияние и в процессе своего функционирования, получая от них исходные теоретические представления, а именно: идеальные объекты и понятия, способы математических описаний, а также сами идеалы научности. В то же время в технических науках все эти взаимосвязанные в новую техническую теорию элементы существенно трансформируются и в результате формируется новый тип организации теоретических знаний. Можно по полному праву сказать, что и технические науки в свою очередь стимулируют развитие естествознания, ставя перед ним новые проблемы и темы для исследования.

Особенность научно-технических дисциплин состоит в том, что в них инженерная деятельность часто не только дополняет экспериментальную деятельность, но и выполняет функцию эксперимента, заменяя его. Именно в ней проверяется адекватность теоретических выводов и выявляется новый эмпирический материал для исследования. Поэтому научно-технические дисциплины должны доводить теоретические знания до уровня практических инженерных рекомендаций. Специфика технической теории выражается не столько в использовании ее выводов для объяснения природных процессов, протекающих в технических устройствах, или даже не столько в необходимости доказательства применимости ее результатов на практике, сколько в их регулярном практическом использовании для создания этих технических устройств.

В технических науках проводятся специальные теоретические (иначе говоря, специфические фундаментальные) исследования. Анализ этих исследований становится одной из важных задач современной методологии науки. Таким образом, современные научно-технические дисциплины больше невозможно рассматривать лишь как прикладные области соответствующих естественных наук, так как в них построены собственные технические теории.

## **2.2. Становление радиотехнической теории: от электродинамики Фарадея и Максвелла через технические следствия из опытов Герца**

Рассмотрим, каким образом из электродинамики в результате модификации ее исходной теоретической схемы [1], которая была развита в первую очередь в работах Г. Герца, формируется подобная ей, но отличающаяся от нее структура радиотехнической теории<sup>1</sup>. К моменту появления теоретических основ радиотехники еще не было соответствующей ей развитой отрасли промышленности, которая формировалась параллельно с разработкой теоретических схем радиотехники. Поэтому в этом случае теоретическая радиотехника может служить своего рода идеализированным объектом (идеальным типом) историко-научного и методологического анализа генезиса теоретических схем технических наук в процессе модификации теоретических схем соответствующей базовой физической теории (электродинамики).

### **2.2.1. Структура электродинамической теории Фарадея — Максвелла — Герца**

Формирование естественнонаучной теории электромагнитных взаимодействий было первоначально связано с выдвижением двух альтернативных теорий, одна из которых была основана на принципе дальнего действия ньютоновской механики, а другая — на принципе ближнего действия картезианской физики. Первая теория электродинамики исходила из методологических принципов ньютоновской физики, допуская мгновенную передачу электрической силы на расстояние, вторая, напротив, предполагала наличие промежуточной среды (электромагнитного поля) для передачи электрических

---

<sup>1</sup> Мы рассматриваем радиотехнику (высокочастотную технику) как особую научно-техническую дисциплину. Техника высокого напряжения как научно-техническая дисциплина, развивавшаяся в высших технических школах и в лабораториях, а также на испытательных полигонах предприятий электротехнической промышленности, до сих пор была темой лишь немногих изданий различных фирм, но не собственно историко-научных исследований (См.: *Maier H.* Erwin Marx (1893—1980); *Ingenieurwissenschaftler in Braunschweig, und die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der elektrischen Energieübertragung auf weite Entfernungen zwischen 1918 und 1950.* Stuttgart: Verlag für Geschichte der Naturwissenschaft und der Technik, 1993, s. 10).



и магнитных действий. Этой теории придерживались, например, Андре-Мари Ампер, Вильгельм Вебер, Карл и Франц Нейманы и др. Согласно этой теории «две электрические частицы непосредственно действуют одна на другую на расстоянии с силой, которая, по Веберу, зависит от их относительной скорости, а по теории, намеченной Гауссом и разработанной Риманом, Лоренцем и Нейманом, действует не мгновенно, а после известного промежутка времени, зависящего от расстояния» [2, с. 15]. Это представление электромагнитных взаимодействий выводится из принципов ньютоновской физики, согласно которой в «абсолютном пространстве», не заполненном материей, — пустоте — действие сил передается от тела к телу (или, другими словами, от материальной точки к точке) мгновенно на любые расстояния.

Таким образом, в центре физической концепции стоит вопрос о том, как происходит передача силы: «Зависит ли это взаимодействие от существования некоторой третьей вещи, некоторой среды, приводящей одно тело в сообщение с другим и занимающей пространство между обоими телами, или же тела действуют друг на друга непосредственно, без участия чего-либо иного?» [3, с. 48]. Сторонники действия на расстоянии, продолжает Максвелл, утверждают, что даже там, где «действие и представляется давлением непрерывных частей вещества, эта непрерывность только кажущаяся», поскольку, по их мнению, «между телами, действующими друг на друга, *всегда* находится промежуточное пространство». Они апеллируют к ньютоновому закону тяготения, подтвержденному чуть ли не каждым астрономическим наблюдением, который «не только утверждает, что небесные тела действуют друг на друга через неизмеримые пространства, но что две части вещества, одна, лежащая на тысячу миль под землей, другая, погребенная на сотни тысяч миль в недрах Солнца, действуют друг на друга с точно такой же силой, как будто бы этих слоев, под которыми каждая из них скрыта, вовсе не существовало». Сторонники этой точки зрения, таким образом, отрицают наличие передающей силу от тела к телу среды и считают такой способ действия единственным [3, с. 53].

Сам Максвелл не считает продуктивным использование принципа дальнего действия для объяснения электромагнитных взаимодействий. Многие влиятельные физики того времени исходили, однако, именно из этого принципа, строя свои теории электродинамики.

Французский физик и математик Андре-Мари Ампер, который впервые ввел в употребление сам термин «электродинамика», открыл взаимодействие токов на расстоянии. Закрепив один проводник и оставив подвижным другой, параллельный ему, он пропустил

через эти проводники ток и наблюдал их взаимодействие. При одинаковых направлениях токов они притягивались, а при противоположных — отталкивались. Он обнаружил также резкое различие статического электричества и действия электростатических сил от действия проводников с током. Область явлений с покоящимися электрическими зарядами он назвал *электростатикой*, а с движущимися зарядами — *электродинамикой*.

Ампер показал также опытным путем, что статическое электричество не действует на магнитную стрелку, а движущееся электричество действует на нее, таким образом сведя все магнитные явления к электрическим. Будучи математиком, Ампер нашел математический закон взаимодействия токов, носящий его имя. Но его формула была много сложнее, чем закон тяготения, выведенный Ньютоном, и было множество попыток упростить ее. Этот закон составил основание всех последующих теорий дального действия в области электродинамики, которые строились по образцу ньютоновской теории действия на расстоянии. Именно поэтому Максвелл назвал Ампера «Ньютоном электричества». Однако одновременно закон вошел в качестве основополагающей составной части в современную электродинамику. Хотя закон Ампера описывал лишь квазистационарные процессы, Максвелл расширил его действие на быстро изменяющиеся электродинамические процессы [4, с. 24].

Электродинамика, базирующаяся на принципе дального действия, достигла наиболее систематического развития в работах Вебера. Его программа основывалась на принципе дального действия и мгновенной передаче силы от одной электрической корpusкулы к другой, причем эти корpusкулы рассматриваются как элементарные частицы, которые могут быть положительными и отрицательными и из которых построены эфир и весома́я материя. «В проводинке они образуют своеобразный “электронный газ”, а в непроводящих веществах и мировом пространстве... — световой эфир». Процесс распространения света, по Веберу, состоит в передаче колебаний от одной частицы к другой. Молекулы весома́й материи образуются из равного количества невесома́ых электрических корpusкул обеих знаков. Вебер признает конечность скорости распространения электрического действия, в то же время передача этой силы от молекулы к молекуле происходит бесконечно быстро [5, с. 76–83].

В истории науки программы Вебера и Максвелла обычно рассматриваются как взаимоисключающие. Однако идея дального действия также может дать непротиворечивое истолкование тех же фактов, что и электродинамика, основанная на принципе близкого действия, что отмечает и сам Максвелл. «Обе эти теории объясняют не только

те явления, с помощью которых они были первоначально построены, но и другие явления, о которых в то время не думали и которых, может быть, тогда не знали; обе теории самостоятельно привели к одним и тем же численным результатам, выражающим абсолютную скорость света в электрических единицах.

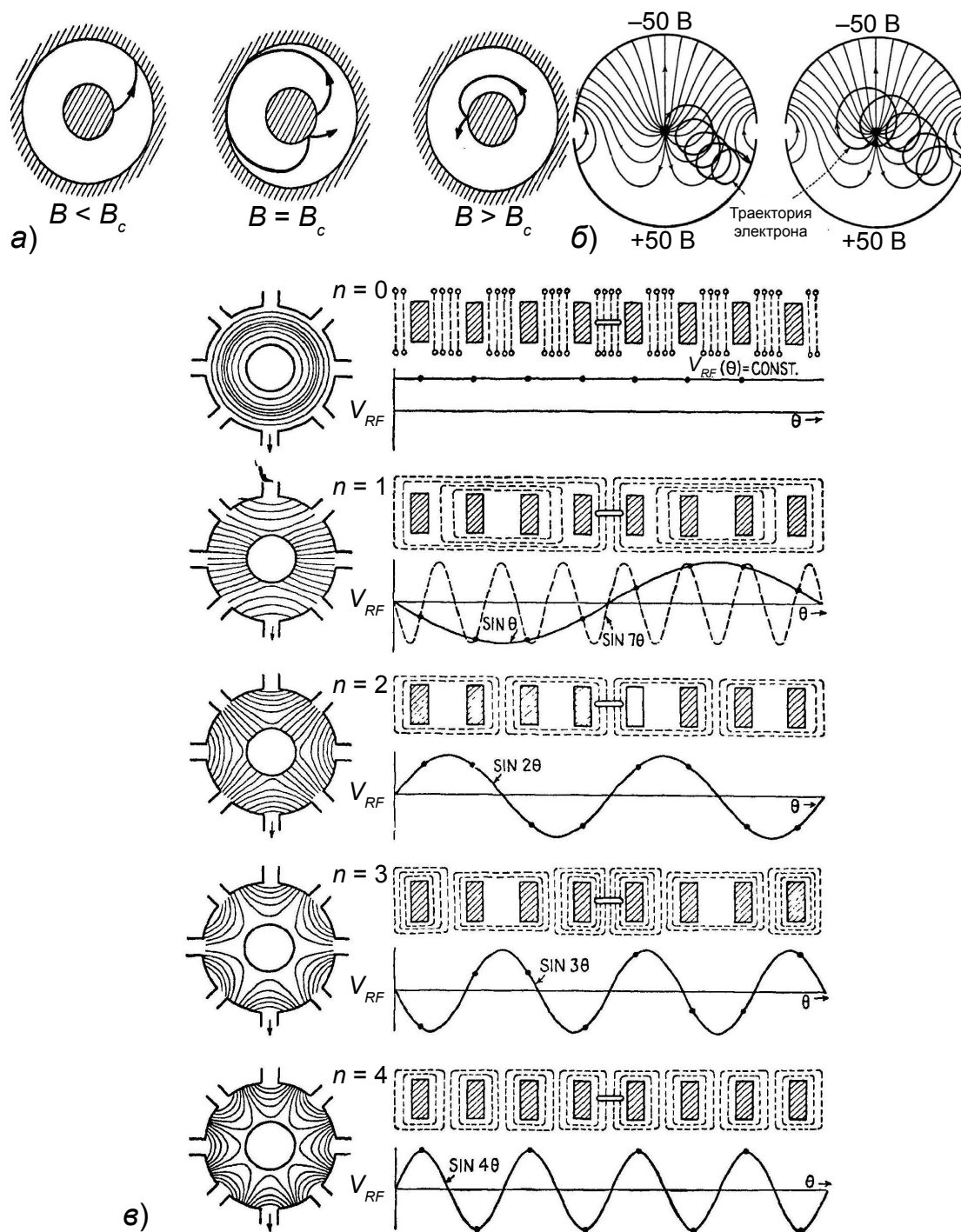
Тот факт, что две теории, по-видимому, столь существенно противоположные, верны в очень широкой области, общей для них обеих, действительно имеет философское значение, которое мы сможем полностью оценить только тогда, когда достигнем такой высоты научного понимания, с которой нами может быть усмотрена действительная связь между столь различными гипотезами» [3, с. 18–19].

Интересно, что в технических науках обе эти теории находят применение, иногда даже при решении одной и той же научно-технической задачи. Например, для описания работы магнетрона в радиолокации на одной схеме используются магнитные силовые линии и отображение движения единичного электрона (рис. 2.1).

Согласно программе Максвелла, основанной на принципе близкодействия и теории вихрей, развитых Декартом, скорость распространения электрического действия конечна и зависит от свойств промежуточной среды. «Теория вихрей-атомов не имеет в себе ничего произвольного, не оперирует никакими центральными силами или скрытыми свойствами какого-либо другого рода. Здесь мы имеем дело только с материей и движением, и раз вихрь образовался, то все его свойства определяются первоначальным импульсом и никакие другие допущения уже больше невозможны».

Максвелл строит свою теорию на основе теории В. Томсона, согласно которой молекулы имеют свойства кольцеобразных вихрей в однородной, лишенной трения и несжимаемой жидкости. Томсон показал, что среда, находящаяся под воздействием магнитной силы, должна находиться в состоянии вращения. Молекулярные вихри (малые участки среды) вращаются вокруг своей оси, направление которой совпадает с направлением магнитной силы. А Гельмгольц доказал, что «в идеальной жидкости вихревое кольцо, раз оно уже образовалось, будет двигаться вечно и всегда будет составлять ту же порцию жидкости, которая была приведена в вихревое движение; это кольцо никогда не может быть разделено надвое какой-либо естественной причиной» [2, с. 12].

Отсюда становится ясным, откуда у Максвелла возникла идея сравнить магнитные силовые линии с трубками, заполненными идеальной несжимаемой жидкостью. Эта идея также весьма похожа на картезианское представление эфирных вихрей и механизма природы, состоящего из различных тончайших трубок и пружин.

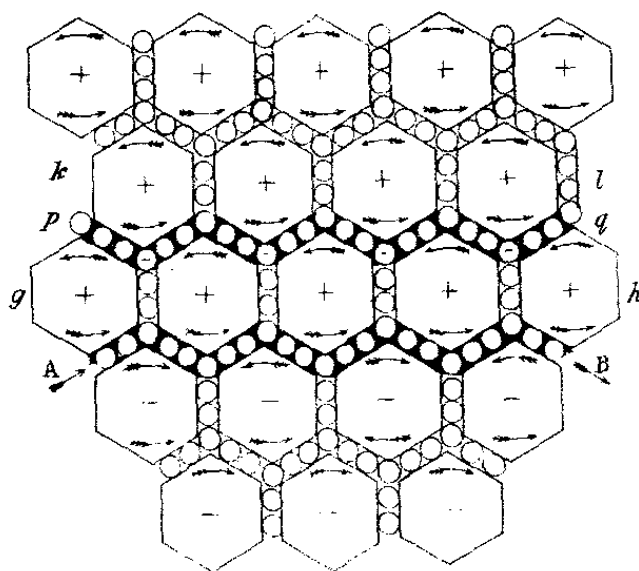


**Рис. 2.1.** Траектория движения единичного электрона:

*a* – в магнетроне при нескольких различных значениях силы магнитного поля; *б* – в магнетроне с разрезным анодом при различных потенциалах, приложенных к двум сегментам анода; *в* – распределение электрического и магнитного полей в резонаторе магнетрона в зависимости от различных режимов работы<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Bronwell A.B., Beam R.E. Theory & Application of Microwaves. New York – London: McGraw Hill Book Co, p. 122, 123, 135. – <http://www.archive.org/stream/theoryandapplica030889mbp#page/n17/mode/2up>*

Максвелл по этому поводу пишет: «Крайняя форма учения о непрерывности выдвинута Декартом, который утверждает, что вся Вселенная одинаково наполнена материей, что вся эта материя одного рода и что единственное существенное свойство — свойство протяженности. Все свойства, наблюдаемые нами в материи, он сводит к подвижности ее частей между другими и, таким образом, к возможности все изменения, которые мы можем наблюдать, выводить из движения ее частей... Потребовалось больше столетия для изобретения методов исследования условий движения систем тел, подобных тем, какие воображал себе Декарт. Но гидродинамическое открытие Гельмгольца, что вихрь в совершенной жидкости обладает некоторыми неразрушимыми свойствами, приложено было сэром В. Томсоном к созданию теории вихревых атомов в однородной несжимаемой и лишенной трения жидкости...» [6, с. 127.]. Именно эту модель использует Максвелл для математического описания электромагнитных линий силы (рис. 2.2).



а)

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{G} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{aligned} \right| \begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned}$$

б)

**Рис. 2.2.** Модель электрических частиц и вихрей, с помощью которой Максвелл объяснял свойства электромагнитных полей (а), и система связанных дифференциальных уравнений, которые сегодня называют уравнениями Максвелла (б)

Теория Максвелла, основанная на работах Фарадея, который не был математиком, не содержащих тех дифференциальных и интегральных уравнений, которые многим кажутся подлинной сущностью точной науки. Однако его заслуга заключается прежде всего в том, что он описал замеченную до него связь магнитных и электрических частных теоретических схем, введя обобщенную теоретическую схему электромагнитных взаимодействий. «Установив...

единство природы всех электрических явлений, он поставил себе... задачу — создать такую концепцию процесса электризации, электрического действия, которая охватывала все эти явления» [7, с. 69].

Таким образом, он начинает с построения обобщенной онтологической схемы электромагнитных взаимодействий, обобщающей все разработанные до этого частные теоретические схемы. «Фарадей является и навсегда останется творцом того общего учения об электромагнетизме, которое рассматривает с единой точки все явления, изучавшиеся прежде в отдельности, не говоря уже о тех явлениях, которые открыл сам Фарадей, следуя своему убеждению о единстве всей науки» [3, с. 68].

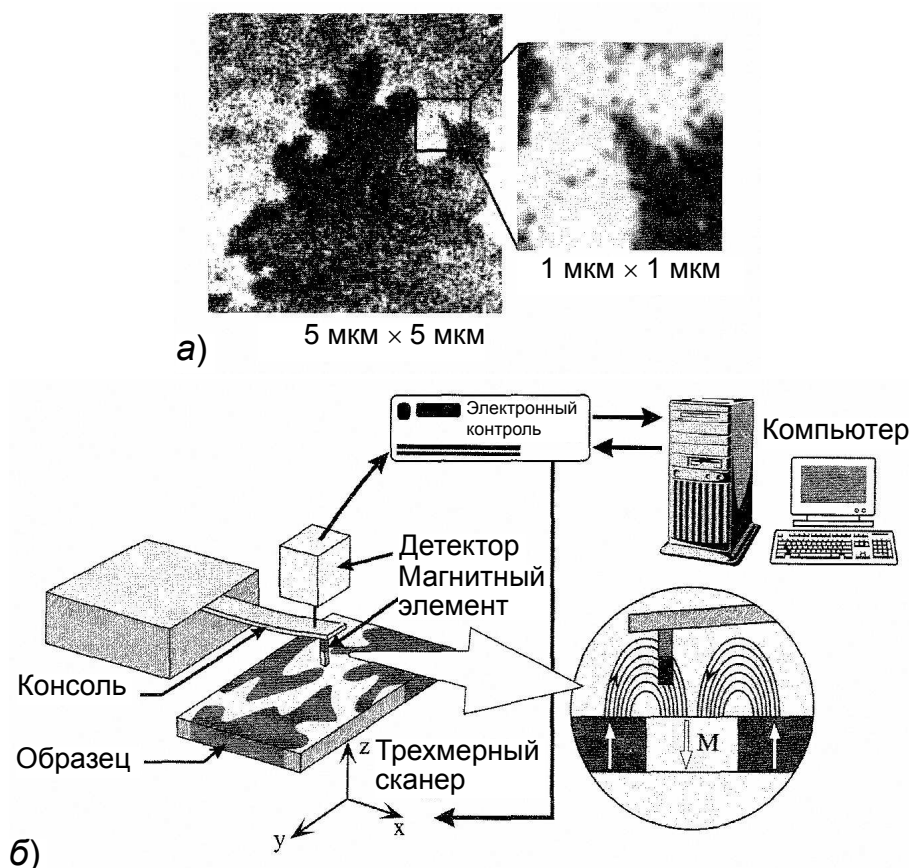
Фарадей разработал также концептуальный аппарат, приспособленный для обсуждения электромагнитных явлений в свете идей новой электродинамической теории. Он ввел в научный обиход такие понятия, как «диэлектрический», «силовое поле», «силовые линии», «индукция», «электролиз» и т.д. Проводя опыты, например, в области электролиза, он осуществляет важную для развития электродинамической теории концептуальную работу: полюсы он назвал электродами (положительный электрод получил у него название *анода*, а отрицательный — *катода*), вещество, которое разлагается электрическим током, — *электролитом*, а сам процесс разложения — *электролизом*; составные части, на которые разлагается электролит, — это ионы, причем идущие к аноду ионы — это анионы, а к катоду — катионы.

С помощью известного опыта, регистрирующего изменения магнитной индукции и появление электрического тока в проводниках при изменении их магнитного поля, Фарадей экспериментально обосновал реальное существование электрических и магнитных силовых линий и, следовательно, доказал объективность введенной им теоретической (онтологической) схемы [8]. Максвелл неоднократно подчеркивает, что эти линии не следует рассматривать как чисто математические абстракции. Иллюстрацией их реального существования послужил опыт Фарадея с намагниченными железными опилками. «В этом опыте каждый кусочек опилок представляет собой небольшой магнит. Разноименные полюсы, принадлежащие различным зернышкам, притягивают друг друга и сцепляются один с другим, и множество опилок прилипает к полюсам магнита, т.е. к концам ряда опилок. Этим путем опилки, вместо того чтобы образовывать на бумаге спутанную систему точек, располагаются рядами — зернышко к зернышку, пока не составятся из них длинные волокна, показывающие своим направлением расположение силовых линий в каждой части поля» [8].

Математики считали, что это лишь удобный способ наглядного представления, удобный для последующего математического описания, не придавая этим линиям онтологического статуса. Сам Фарадей следующим образом описывает достоинства такого наглядного представления: «Экспериментатор, желающий изучать магнитную силу посредством проявления ее магнитными силовыми линиями, поступил бы произвольно и опрометчиво, отказавшись от самого ценного средства, от употребления железных опилок. Пользуясь ими, он может многие свойства этой силы даже в сложных случаях, тотчас показать наглядно, может проследить глазом различные направления силовых линий и определить относительную полярность, может наблюдать, в каком направлении сила эта возрастает, в каком убывает, а в сложных системах может определить нейтральные точки, или места, где нет ни полярности, ни силы, даже если они встретятся внутри сильных магнитов. При их употреблении вероятные результаты видны сразу и могут быть получены ценные указания для будущих ведущих опытов» [3, с. 57, 58]. Однако не только наглядность этих силовых линий важна для Фарадея. Он придает им вполне определенный онтологический статус, соотнося изображения, полученные в ходе физического эксперимента, с картиной физической реальности, рассматривая эти линии не как чисто математические абстракции (геометрические силовые линии), а как физические силовые линии, реально существующие в природе. Такой же онтологический статус электромагнитное поле получило и в рамках нанотехнологии, где были развиты принципы микроскопии магнитных сил (рис. 2.3).

Согласно Фарадею, всякое действие означает взаимодействие соседних близлежащих частиц, т. е. является процессом в промежуточной среде. Фарадей был тогда чуть ли не единственным защитником теории электромагнитных явлений, построенной на принципе близкодействия. Молодой Максвелл напишет потом Фарадею: «Вы — первый человек, которому пришла в голову идея о действии тел на расстоянии через посредство окружающей среды». Дж.Дж. Томсон замечает: «Фарадей был глубоко убежден в аксиоме или, если хотите, в догме, что материя не может действовать там, где ее нет». Поэтому существование эфира — упругой, непроводящей среды — он принимал. Через нее-то (быстро, но не мгновенно) и распространяется электрическое действие — последовательно от точки к точке — так что имеет место *близкодействие*. Пространство, участвующее в передаче электрического действия, Фарадей назвал электрическим полем; оно пронизано потоками электрических и магнитных сил — силовых линий. Силовые линии окружают электрические заряды и магнитные полюсы. «Фарадей, — писал Максвелл, — своим умным глазом

увидел силовые линии, пересекающие пространство... Они сделали это пространство чем-то живым и реальным. Фарадей считал, что понятие о силовых линиях должно раскрыть загадку природы взаимодействия магнетизма и электричества» [9, с. 352].



**Рис. 2.3.** Изображение фарадеева поля (а), полученное с помощью сканирующего оптического микроскопа (б)<sup>1</sup>

Для придания объективного статуса принятой им картине электромагнитных взаимодействий в виде электрических и магнитных силовых линий Фарадей прибегает к помощи эксперимента. На ряде опытов он показывает, что электростатическая индукция действительно зависит от среды. Проводящая электрический ток жидкость в электролитической ванне была заменена им на непроводящую жидкость. В ходе экспериментов с различными такого рода жидкостями выяснилось, что емкость конденсатора, образуемого опущенными в эту жидкость металлическими пластинами, меняется в зависимости от рода такой непроводящей жидкости в ванне. Причем перемещения заряженных частиц в непроводящей жидкости при этом не происходит. Электрические заряды действуют друг на друга

<sup>1</sup> См.: Schmid G. et al. Nanotechnology. Assessment and Perspectives. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, p. 178.



через среду, и их взаимодействие определяется не только расстоянием между ними, но и характером среды. Таким образом, деформация среды при передаче электромагнитного действия является реальным природным процессом.

К аналогичным выводам приводят Фарадея и результаты его экспериментов в области электромагнитной индукции. Он объяснил возникновение электродинамической силы в проводнике всякий раз при увеличении или уменьшении магнитного поля вокруг него тем, что физическая среда в пространстве вокруг магнита претерпевает деформацию. Она возвращается в первоначальное состояние при прекращении изменения магнитного поля. Фарадей назвал это состояние *электротоническим*. Этим доказывается реальность физического существования силовых линий.

При этом Фарадей вполне сознательно ставит вопрос о физическом существовании таких линий и подтверждает положительное решение этого вопроса целой серией спланированных им экспериментов, делая однозначный вывод: «они действительно имеют явно отличимое физическое существование» [10, с. 60]. Таким образом, он не только разработал поточные (физические) схемы электродинамической теории, но поставил их в соответствие структурным схемам эксперимента.

Кроме того, именно разработанные Фарадеем поточные схемы позволили Максвеллу развить соответствующий им математический аппарат (т.е. функциональные схемы). По мнению Максвелла, в физических воззрениях Фарадея заключена особая математическая схема, выявив которую Максвелл смог установить возможность использования в электродинамике математического аппарата механики сплошных сред. Фарадей, по свидетельству самого Максвелла, «сообщил этой концепции силовых линий ясность и точность, далеко оставляющие за собой ясность и точность, каковые математикам удалось сообщить своим формулам» [3, с. 58]. Однако разработку математического аппарата новой естественной науки — электродинамики и строгое соотнесение математических (функциональных) и физических (поточных) теоретических схем осуществил сам Максвелл.

Одно из главных направлений работы Максвелла заключалось в построении адекватного математического аппарата для единого описания и объяснения электрических и магнитных явлений. При этом он двигался преимущественно в двух слоях: функциональных и поточных схем. Принятая им в качестве исходной теоретическая схема электромагнитных взаимодействий Фарадея — электрические и магнитные линии силы — позволила

ему использовать математический аппарат гидродинамики, представив силовые линии в виде незамкнутых трубок с идеальной несжимаемой жидкостью.

Максвелл ввел также целый ряд таких понятий, как «ток смещения», «ток проводимости», имеющих точно определенный математический смысл.

Поскольку «Фарадей с математической точностью развил целую теорию электромагнетизма языком, свободным от математических вычислений» [3, с. 59], перед Максвеллом со всей очевидностью возникла задача разработки для этих фарадеевых представлений адекватного математического аппарата, построения развернутого слоя функциональных (математических) схем электродинамической теории, основанной на принципе близкодействия. «По характеру мышления Максвелл был геометром, поэтому ему была близка геометрическая модель Фарадея, который оперировал с электрическими и магнитными силовыми линиями. В работах Томсона и Гельмгольца получила завершение гидродинамическая модель трубок. Между этими двумя моделями Максвелл усматривал аналогию. Следуя, с другой стороны, по пути Ома, использующего гидродинамические образы при установлении законов тока, Максвелл перенес эти образы в свое учение об электромагнетизме» [9, с. 354].

Рассуждая о соотношении математики и физики, Максвелл позднее обосновывал возможность и необходимость использования такого рода аналогий для трансляции идей и методов из одной отрасли науки в другую. Именно фарадеевы силовые линии натолкнули Максвелла на мысль использовать гидродинамические аналогии и в электродинамике с тем, чтобы транслировать математический аппарат, развитый в механике сплошных сред, для решения электродинамических задач.

Рассматривая силовые линии не просто как геометрические линии, а как трубки переменного сечения, заполненные несжимаемой жидкостью, причем положительный заряд представлял собой источник, а отрицательный — сток этой жидкости, Максвелл рассуждал следующим образом: «При внимательном изучении законов упругих тел и движении вязких жидкостей я надеюсь найти метод построения механической концепции этого электротонического состояния ...» [11, с. 59]. Модель трубчатых вихрей позволяет ему интерпретировать электрический ток как поступательное движение частиц, расположенных между соседними вихрями. «В этой модели движение вихрей с постоянной скоростью сопоставлялось с постоянным магнитным полем, движение вихрей с ускорением — с переменным магнитным полем; телесный элемент — с дифференциаль-

но малой порцией электричества (заряда), перемещение телесного элемента — с током проводимости; тангенциальная сила, действующая на телесный элемент, соответствовала вектору электрической напряженности» [12, с. 165].

Максвелл заимствовал эту модель у Г.Гельмгольца и В.Томсона. «На долю Гельмгольца выпало указать весьма замечательные свойства вихревого движения в однородной несжимаемой жидкости, лишенной всякой вязкости». Эта жидкость имеет, по определению, следующие свойства. «Во-первых, это — материальная субстанция. Ее движение непрерывно в пространстве и во времени, и если мы будем следить за движением некоторой ее части, то оказывается, что масса этой части остается неизменной. Эти свойства она разделяет со всякой материальной субстанцией. Во-вторых, она несжимаема. Форма данной части жидкости может изменяться, но ее объем остается неизменным; другими словами, плотность жидкости во время движения остается неизменной. Кроме того, жидкость однородна, т. е. плотность всех ее частей одинакова. Она также непрерывна, так что масса жидкости, содержащаяся внутри некоторой замкнутой поверхности, всегда в точности пропорционально объему, содержащемуся внутри этой поверхности. Это тождественно утверждению, что жидкость не состоит из молекул ... Наконец, это совершенная жидкость, или, другими словами, напряжение между какой-либо частью и смежной ей частью всегда нормально к отделяющей их поверхности, независимо от того, находится ли жидкость в покое или в движении» [6, с. 146].

Здесь дается типичное для любой естественнонаучной теории описание идеального (идеализированного), или абстрактного, объекта, который не существует в реальности, а является абстрагированием и идеализацией некоторых ее сторон, который может быть, однако, поставлен в четкое соответствие реальным объектам природы. «Существует ли в действительности субстанция с такими свойствами, — рассуждает далее Максвелл, — это вопрос, который приходится рассматривать только тогда, когда мы хотим сделать практические приложения результатов математической теории. Свойства нашей совершенной жидкости ясно определены и согласуются друг с другом, и из математической теории мы можем вывести замечательные результаты, причем некоторые из них можно грубо проиллюстрировать при помощи жидкостей, которые отнюдь не совершенны в смысле отсутствия вязкости, как, например, воздух и вода» [6, с. 147].

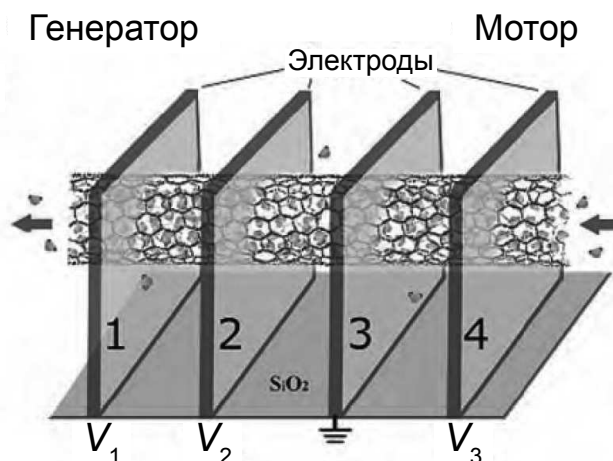
Таким образом, трубки с идеальной жидкостью или вихревые линии представляют собой поточные (физические) теоретические схемы гидродинамики, с одной стороны, описываемые математически-

ми формализмами (функциональными теоретическими схемами), а с другой — отображающие в идеализированной форме реальные гидродинамические процессы. «Вихревая линия не есть просто математический символ, но имеет физическое существование, непрерывное во времени и в пространстве... Эти вихревые линии образуют трубчатую поверхность, называемую вихревой трубкой или вихревой нитью. Так как воображаемая жидкость течет по вихревым линиям без изменения плотности, то количество, протекающее в единицу времени через какое угодно сечение одной и той же вихревой трубки, должно быть одинаково. Следовательно, для всякого сечения вихревой трубки произведение площади сечения на среднюю скорость вращения одно и то же. Это количество называется *напряжением* вихревой трубки» [6, с. 145]. Отсюда всего один шаг до отождествления этих вихревых трубок с электрическими и магнитными силовыми линиями, позволившего Максвеллу перебросить математический аппарат (с соответствующей его модификацией и адаптацией под новый эмпирический материал) из одной области научного исследования гидродинамических процессов в другую, используя его для исследования электродинамических процессов в природе. «Движение в некоторый момент каждой части жидкости, заключающей вихревые кольца, можно точным образом представить себе, вообразив, что некоторый электрический ток занимает место каждого вихревого кольца, причем сила тока пропорциональна напряжению кольца. Магнитная сила в некоторой точке пространства будет, следовательно, представлять, по направлению и величине, скорость жидкости в соответствующей точке жидкости» [6, с. 146–150]. Это означает, что одной и той же функциональной (математической) теоретической схеме Максвелл поставил в соответствие две различные, но аналогичные поточные схемы (физических процессов).

Точно так же сегодня рассуждают в нанотехнонауке: «возможным использованием нанотрубок является хранение в них водорода, что может быть использовано при конструировании топливных элементов как источников электрической энергии в будущих автомобилях» [13, с. 121].

Углеродную нанотрубку можно представить как лист графита, свернутый в цилиндр, который приобретает различную структуру в зависимости от способа изготовления. В этом случае нанотрубка рассматривается наподобие максвелловских «вихревых трубок», через которые протекает идеальная жидкость (рис. 2.4): вода, протекающая внутри нанотрубки, действующей как «мотор», в котором электрическая энергия частично превращается в энергию потока, а текущая вода, в свою очередь, генерирует электродвижущую силу

в другой части нанотрубки, подобно «генератору»... Одностенные нанотрубки являются идеальными моделями для этих исследований, представляющих интерес в области физики, биологии и материаловедения [14, р. 45].



**Рис. 2.4.** Нанотрубка, через которую протекает жидкость, как модель «электромотора» и «генератора» электрической энергии [14, р. 45]

В то же самое время нанотрубки являются проводниками электрического тока (тоже идеализация, так как «ток» представляется как поток электронов). В «металлическом состоянии» нанотрубки служат прекрасными проводниками, поскольку их проводимость очень высока и они «могут пропускать миллиард ампер на квадратный сантиметр», а также поскольку у них мало дефектов, вызывающих рассеяние электронов, и поэтому низкое сопротивление и большая теплопроводность (вдвое выше, чем у алмаза). Большой ток не нагревает трубку так сильно, как, например, медный провод, который расплавляется уже при миллионе ампер на квадратный сантиметр [13, р. 112–117].

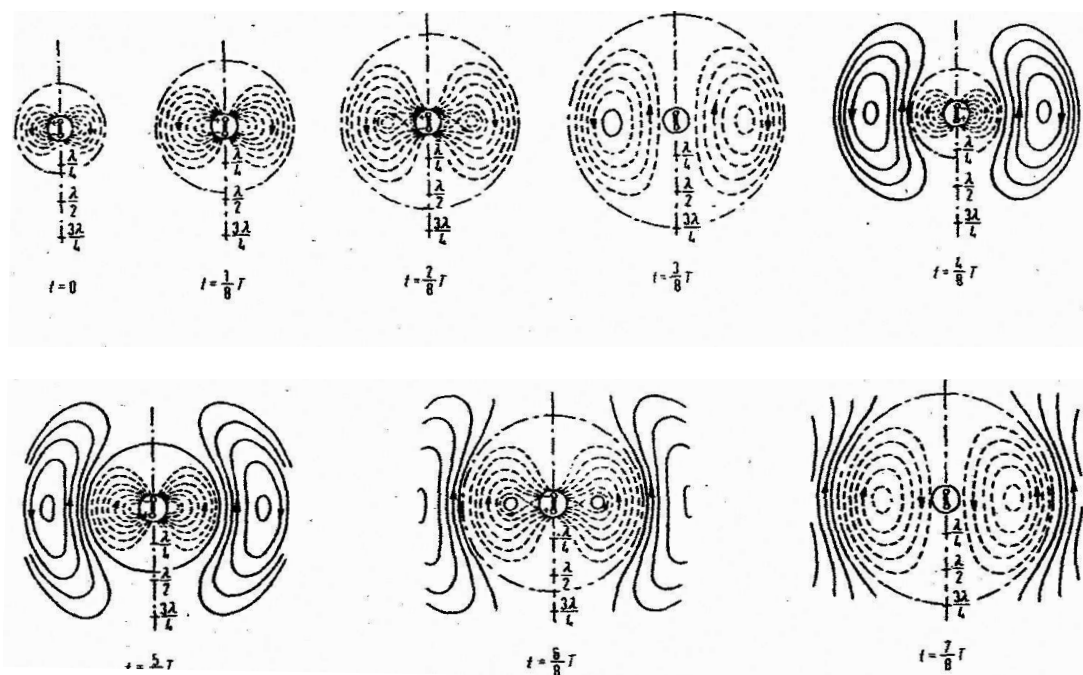
Таким образом, Максвелл, поставив в четкое соответствие гидродинамические и электродинамические процессы, задал правила соответствия между функциональными (математическими) и поточными (физическими) теоретическими схемами электродинамической теории. Введя ряд новых представлений и обобщений (например, понятие тока смещения), Максвелл освободил математические результаты от исходной механической модели и завершил построение динамической теории электромагнитного поля, сформулировав систему своих знаменитых уравнений электромагнитного поля (см. рис. 2.2). По характеристике Эйнштейна, Максвелл «показал, что все известное тогда о свете и электромагнитных явлениях может быть изложено с помощью его, ныне широко известной, двойной системы дифференциальных уравнений в частных производных, куда электрическое и магнитное поля входили как зависи-

мые переменные... до Максвелла физическая реальность, поскольку она выражает явления в природе, мыслилась как материальные точки, изменения которых состоят только в движениях, регулируемых дифференциальными уравнениями в частных производных. После Максвелла физическая реальность мыслится выраженной необъяснимыми, с механической точки зрения, континуальными полями, подчиняющимися дифференциальным уравнениям в частных производных. Это изменение представления о реальности является наиболее глубоким и плодотворным из всех, которые знала физика после Ньютона» [15, с. 245].

### **2.2.2. Экспериментальное доказательство теории Максвелла Герцем и его технические следствия**

Герц так же, как и Максвелл, использовал фарадеево представление об электрических и магнитных силовых линиях, детализировав его. Например, он приводит изображения так называемого процесса «отшнуровывания» силовых линий от вибратора, ставшего затем очень важным для радиотехники элементом радиопередающего устройства, анализируя распределение сил для различных моментов времени. Эта, по сути дела, поточная схема составлена Г. Герцем на основе теории Максвелла (рис. 2.5) [16]. Он называет такое изображение «наглядной картиной распределения силовых линий», подчеркивая, что «основой образования волны являются не только процессы в месте ее возникновения, но также состояния окружающего пространства, поскольку последнее с точки зрения нашей теории и является носителем энергии».

«Именно силовые линии, которые более всего удалены от источника, при своем исчезновении проявляют тенденцию сжиматься и испытывают искривление, в результате которого от каждой из внешних силовых линий “отшнуровывается” замкнутая на себя силовая линия, которая начинает самостоятельно двигаться в пространстве, в то время как остаток силовой линии возвращается в вибратор. Таким образом, число линий, возвращающихся в вибратор, равно числу вышедших из него линий, но их энергия уменьшается на энергию, соответствующую энергии отшнуровавшихся частей. Эта потеря энергии соответствует излучению в пространство... Эти силовые линии все более и более переходят в чисто поперечную волну и в виде таковой теряются в пространстве» [17, с. 96–105].



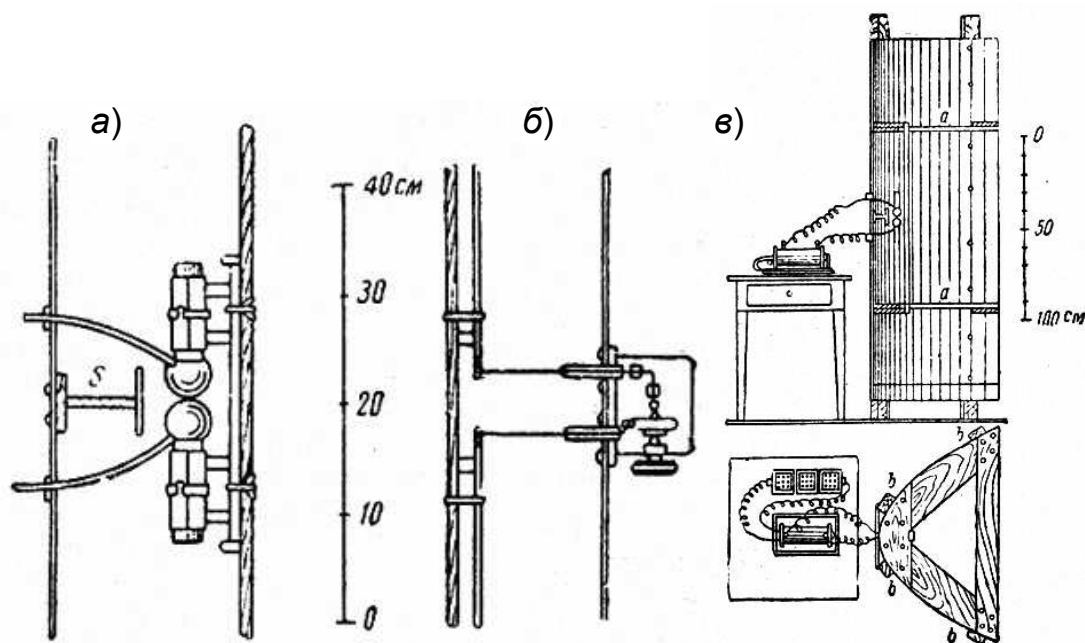
**Рис. 2.5.** Распространение электромагнитных волн в пространстве: на схеме показано изменение электромагнитного поля, исходящего в свободное пространство от передающего диполя в различные моменты времени<sup>1</sup>

Герц строит особые структурные теоретические схемы и соответствующий им концептуальный аппарат (такие понятия, например, как понятия вибратора и резонатора). Скрупулезное описание конструкции опытного оборудования (например, материала, из которого изготовлены зеркала, их формы и размеров и т.д.) сочетается у него с обобщенным теоретическим описанием экспериментально-измерительных ситуаций в виде структурных схем, которые являются прообразом будущих электрических схем радиоприемного и радиопередающего устройств и входят в состав физической теории (рис. 2.6).

В поисках для регистрации искры позиции микрометра, сначала соединенного проводом с вибратором, а затем без него, Герц пришел к открытию беспроводной передачи электромагнитных волн и отображает этот поиск на структурных схемах (рис. 2.7).

При исследовании процесса резонанса Герц последовательно изменял разные параметры первичной и вторичной цепей, включающих индукционную катушку, разрядник, конденсатор и т.д. При этом измерялись длина искры и расстояние между цепями, а затем на основе полученных данных вычерчивались резонансные кривые, проводились соответствующие расчеты.

<sup>1</sup> См.: *Rothe H. Heinrich Hertz, der Entdecker der elektromagnetischen Wellen // Elektrotechnische Zeitschrift. Ausgabe A. ETZ-A. 1957. № 7, s. 249.*



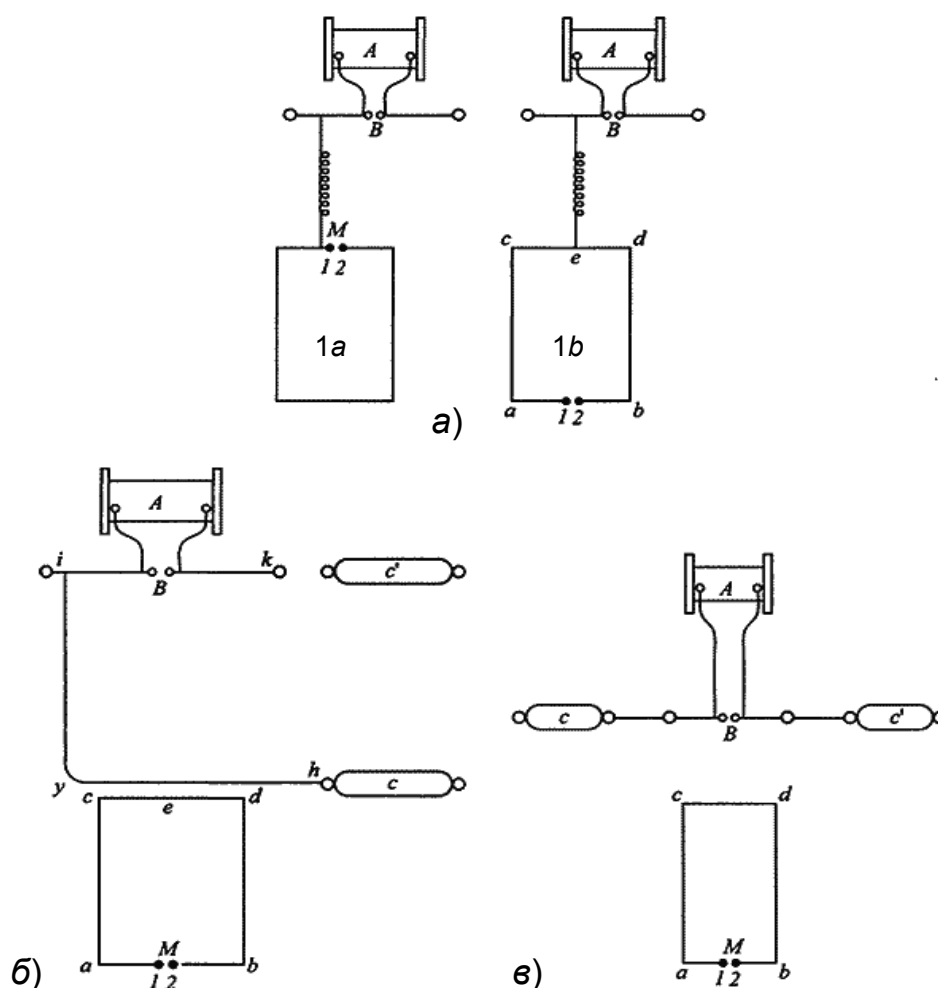
**Рис. 2.6.** Вибратор с первичным искровым промежутком (а), резонатор с вторичным искровым промежутком (б) и параболическое зеркало с вибратором, который связан проводами с индуктором и батареей на столике (в)<sup>1</sup>

Разрабатывая новое экспериментальное оборудование, Герц действует, по сути дела, как инженер, однако не имеет в виду какое-либо техническое применение своих экспериментальных устройств. И математический аппарат, и опыты служат для него лишь средством предсказания и объяснения физического процесса — распространения электромагнитных волн в пространстве. Однако именно благодаря его работам электродинамика получила как раз тот вид, который позволил отпочковаться от нее новой сфере инженерной деятельности и соответствующей ей технической теории.

Г. Герц унаследовал свою достаточно хорошо оснащенную лабораторию в университете г. Карлсруэ от Фердинанда Брауна, профессора электротехники в 1883—1885 гг., который занимался там модернизацией курсов по электричеству и электротехнике. «Уже в его ранних исследованиях, которые он проводил задолго до возникновения беспроводной телеграфии, можно обнаружить зародыши важнейших разработок в этой области. Следует отметить, что он обладал огромным даром и необыкновенным искусством создания вспомогательных средств для эксперимента. Именно благодаря этому появилась измерительная аппаратура, которая имеет большое самостоятельное значение и действительно нашла применение в качестве физической исследовательской и измерительной техники» [18].

<sup>1</sup> См.: *Hertz H. Über Strahlen elektrischer Kraft // Annalen der Physik und Chemie. Neue Folge. B. XXXVI. № 4, s. 784.*





**Рис. 2.7.** Структурные схемы экспериментального оборудования (зарисовки Герца)<sup>1</sup>: *а* – с индуктором (*A*), разрядным устройством (*B*) и микрометром для регистрации искры (*M*); *б* – с индуктором (*A*), разрядным устройством (*B*), съемными емкостями (*C* и *C'*), проволочным прямоугольником (*abcd*) и промежутком (резонатор); *в* – то же, но с прямым проводом первичного контура (вибратор) и вторичным контуром с искровым промежутком (*M*)

Герц вводит в лекционный курс теоретические аспекты электротехники и разрабатывает лабораторный курс в этой области. Необходимо также отметить, что университет Карлсруэ, основанный в качестве одной из первых технических школ в Германии, был в значительной степени ориентирован на развитие практической электротехники [19, р. 26, 27].

<sup>1</sup> *Gerhard-Mulhaupt R. Die experimentelle Bestätigung der Maxwell'schen Theorie durch Hertz in den Jahren 1886 bis 1889 // Heinrich Hertz: Festschrift anlässlich die Erforschung der elektromagnetischen Wellen vor 100 Jahre. Berlin: Heinrich-Hertz-Institut, 1988, s. 44, 46.*

Свою основную задачу Герц видел в развитии физической теории для объяснения электромагнитных явлений. В это время, как уже отмечалось выше, конкурировали две исследовательские программы в данной области — Ампера, Неймана и Вебера, с одной стороны, и Фарадея — Максвелла, с другой стороны, основанные соответственно на принципах дальнего действия и ближнего действия. К моменту проведения своих знаменитых опытов в Карлсруэ Герц был хорошо знаком с обеими теориями, однако не ставил первоначально перед собой задачи подтвердить теорию Фарадея — Максвелла экспериментом, не отдавая первоначально предпочтения ни той ни другой теории. Причем в Германии до публикации в 1870 г. знаменитой статьи Гельмгольца — учителя Герца — «О теории электродинамики», в которой он пытался построить свою компромиссную версию максвелловской теории, господствовали теории Вебера и Неймана, основывающиеся на принципе дальнего действия. Эту особенность отмечает Макс Планк: «Значение опытов Герца для теории Максвелла окажется еще более важным, если учесть, что тот с самого начала исходил вовсе не из того, чтобы утвердить теорию Максвелла.

Насколько Герц был свободен от влияния теории Максвелла, яснее всего подтверждается тем фактом, что он долгое время, в противоположность теории Максвелла, полагал, что установил в своих опытах разницу в скорости распространения электрических волн в воздухе и по проводам. Лишь потом Герц выяснил, что эта разница была обусловлена помехами из-за находившихся поблизости проводников» [20, с. 241]. Однако уже в 1884 г. в одной из своих работ, посвященных сравнительному анализу максвелловских основных уравнений электродинамики и основных уравнений конкурирующей электродинамической теории, Герц пишет: «Если необходим выбор между обычной системой электродинамики и максвелловской, то последняя безусловно имеет приоритет» [21, s. 38].

Гельмгольц еще в 1879 г. формулирует Герцу задачу работы на премию Прусской академии наук — дать экспериментальное доказательство за или против существования электромагнитного действия возникающей или исчезающей диэлектрической поляризации, предсказанной Максвеллом, или, другими словами, какой-либо связи между электромагнитными силами и диэлектрической поляризацией изоляторов. Однако его первые опыты с применением колебаний от лейденской банки или открытого индукционного аппарата не принесли желаемых результатов.

Позже он находит иной путь для решения поставленной Гельмгольцем задачи. На это его натолкнули опыты, проведенные им в 1886—1889 гг. в техническом университете Карлсруэ с помощью имеющегося экспериментального оборудования. Сам Герц оценивает

это как счастливый случай, поскольку он сам был удивлен результатами его опытов с имевшимися в университете Карлсруэ спиралями, и отмечает позже: «Я не верю, впрочем, что с помощью только одной теории было бы возможно продвинуться к этим явлениям» [22, s. 2]. Однако, как и в случае телескопа Галилея, он сделал теоретический прорыв, поставив свои, ставшие очень быстро классическими эксперименты по распространению электромагнитных волн, которые, с одной стороны, подтвердили теорию Фарадея — Максвелла, с другой — открыли путь к ее техническому применению.

Это техническое применение никак не планировалось и вообще не предполагалось Герцем, но с очевидностью вытекало из его экспериментов и теоретических выводов, потому что естественнонаучную теорию Герца можно одновременно считать теорией естественного (физического — электромагнитного) процесса и исходным пунктом теории нового вида техники — техники передачи электромагнитных волн на расстояние без проводов.

Менее десятилетия разделяет опыты Герца и первые успешные результаты их практического использования для передачи сообщений на расстояние без проводов Поповым и Маркони. Именно в этой двойственности экспериментального естествознания и заложена потенциальная возможность возникновения технической науки.

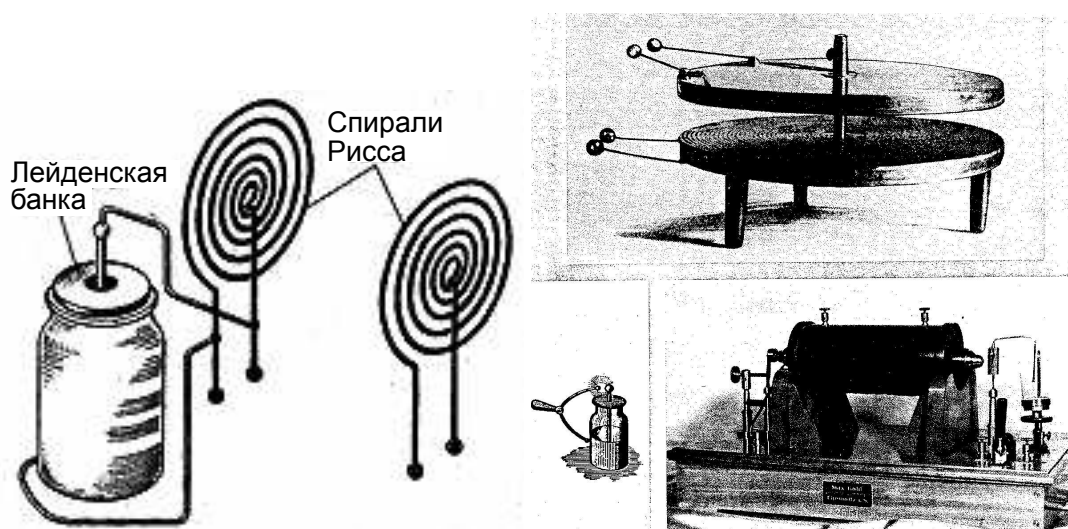
Впрочем, потребовалось еще почти столетия, пока вызванная открытием Герца и изобретением телеграфии без проводов (радио) новая отрасль техники и промышленности породила новую техническую науку — теоретическую радиотехнику. Первые шаги этой науки развивались в лоне естественнонаучной дисциплины — физики электромагнитных колебаний — и были связаны с совершенствованием экспериментального оборудования, т. е. техники науки, постепенно переросшей в технику повседневной жизни.

В Карлсруэ перед Герцем «среди прочих была поставлена задача читать лекции по физическому эксперименту для студентов инженерных специальностей. При этом у него в распоряжении было все необходимое физическое оборудование, которое он мог также использовать для исследовательских целей» [23, s. 9]. Позже Герц писал: «В физическом арсенале высшей технической школы г. Карлсруэ, где я проводил эти опыты, я нашел и использовал для лекционных целей пару так называемых спиралей Рисса<sup>1</sup>. У меня вызвал удивление

---

<sup>1</sup> Спирали представляли собой катушки индуктивности, витки которых располагались в одной плоскости, а плоскости обеих катушек были параллельны (опыты Г. Герца — основополагающая предпосылка к изобретению радиосвязи. Проект: От электрической искры до мировой компьютерной сети. — <http://radiomuseum.ur.ru/index4.html>).

тот факт, что не было необходимости разряжать большую батарею через эту спираль, чтобы сохранить искру в другой спирали, что было вполне достаточно использовать для этого, напротив, маленькие лейденские банки, ведь искрение небольшого индуктора происходило сразу же после разряда искрового промежутка (рис. 2.8). Меняя расстояние (между спиралями), мне бросилось в глаза появление сопутствующей искры, из чего и исходит мое последующее исследование. Сначала я считал эти электрические движения слишком стремительными и нерегулярными для дальнейшего использования; но когда я обнаружил появление узлов<sup>1</sup> в середине рядом расположенного провода и тем самым ясное и чистое явление, я убедился, что теперь задача, поставленная Берлинской академией, может быть решена, а далее этого мое честолюбие тогда и не распространялось. Мое убеждение естественно усилилось после того, как я понял, что я имею дело с регулярными колебаниями...» [24, с. 2].



**Рис. 2.8.** Спиральи Рисса с подключенной к ним лейденской банкой (конденсатором)<sup>2</sup>

В письме швейцарскому физическому профессору Саразину<sup>3</sup> Герц пишет в 1889 г. уже из Бонна: «Аппараты, с которыми я работал (рис. 2.9), были сделаны не каким-то искусным механиком элегантно способом по хорошо вычерченным эскизам, а частично мной самим, отчасти же механиком физического кабинета в Карлсруэ были грубо и временно склеены из кусков дерева, проволоки, сургуча, а потом

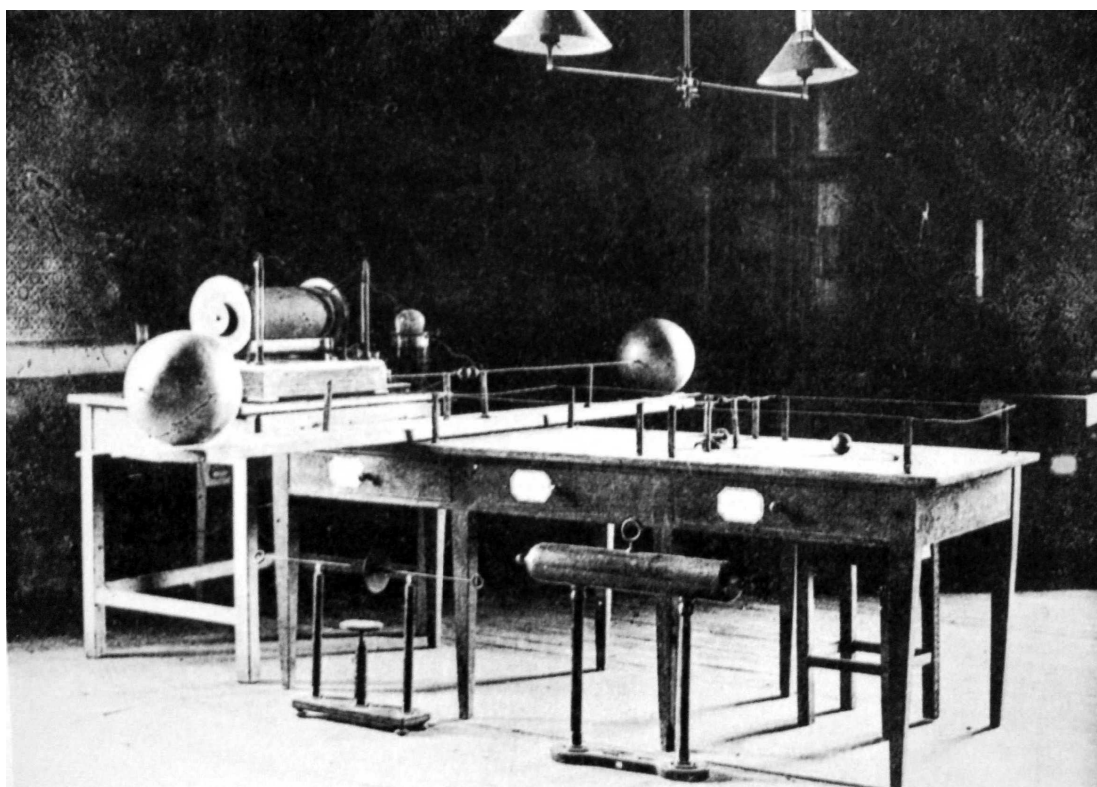
<sup>1</sup> То есть определил по наличию и интенсивности искрения положения пучностей и узлов генерируемых электромагнитных волн.

<sup>2</sup> Опыты Г. Герца — основополагающая предпосылка к изобретению радиосвязи. Проект: От электрической искры до мировой компьютерной сети — <http://radiomuseum.ur.ru/index4.html>

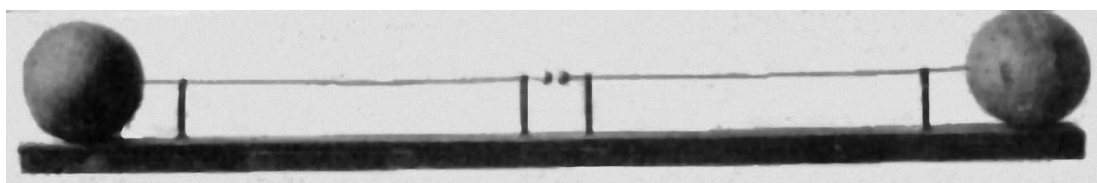
<sup>3</sup> Emile Édouard Sarasin (1843–1917).

много раз изменялись. Шаровые полюса, например, были взяты от другого аппарата и после того, как я уехал из Карлсруэ, были снова возвращены на этот аппарат; некоторые части, которые можно было легко транспортировать, я прихватил с собой сюда, но по большей части все осталось в Карлсруэ».

Механик из Карлсруэ, считает Герц, мог бы в принципе создать копию этого аппарата, но «он также скорее всего не будет знать, как это ему сделать. Поскольку точно такими, как аппараты тогда были, он их не может создать»<sup>1</sup>.



а)



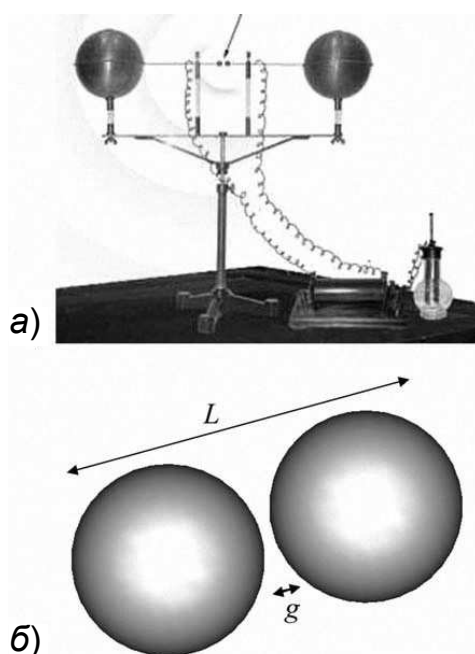
б)

**Рис. 2.9.** Передатчик электромагнитных волн Г. Герца:  
оригинальное фото Герца (а) и первая антенна — излучатель  
электромагнитных волн (осциллятор, диполь) Герца (б)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Brief HS 03154 . Здесь и далее письма Герца цит. по: Briefe von Heinrich Hertz // Deutsches Museum, Archiv.

<sup>2</sup> См.: *Friedburg H.* Die Karlsruher Experimente von Heinrich Hertz // *Friderziana. Zeitschrift der Universität Karlsruhe*, 1988, № 1, s. 47.

Вибратор Герца фактически являлся первой антенной, генерирующей электромагнитные колебания. «Пионерская работа Герца в конце девятнадцатого столетия является основой современной антенной науки и техники и, следовательно, важной частью современной радиотехники. Его интуиция о возбуждающих колебания электрических зарядах, распределенных по двум пространственно тесно связанным сферическим конденсаторам, ... оказалась успешной для рождения первого класса рабочих излучателей и указала путь для многочисленных приложений в современной технике» [25, р. 195111-1]. Аналогично первой антенне, созданной Г. Герцем (см. на рис. 2.9 два разнесенных по бокам экспериментальной установки шара), функционирует в микроволновом диапазоне и антенна-нанодимер (рис. 2.10)<sup>1</sup>.



**Рис. 2.10.** Аналогия антенны, состоящей из двух димеров<sup>2</sup>, в наносфере: *а* — первая антенна Герца, работающая на микроволновых частотах; *б* — плазмонная нанодимерная антенна в форме двух пространственно тесно связанных сферических наночастиц

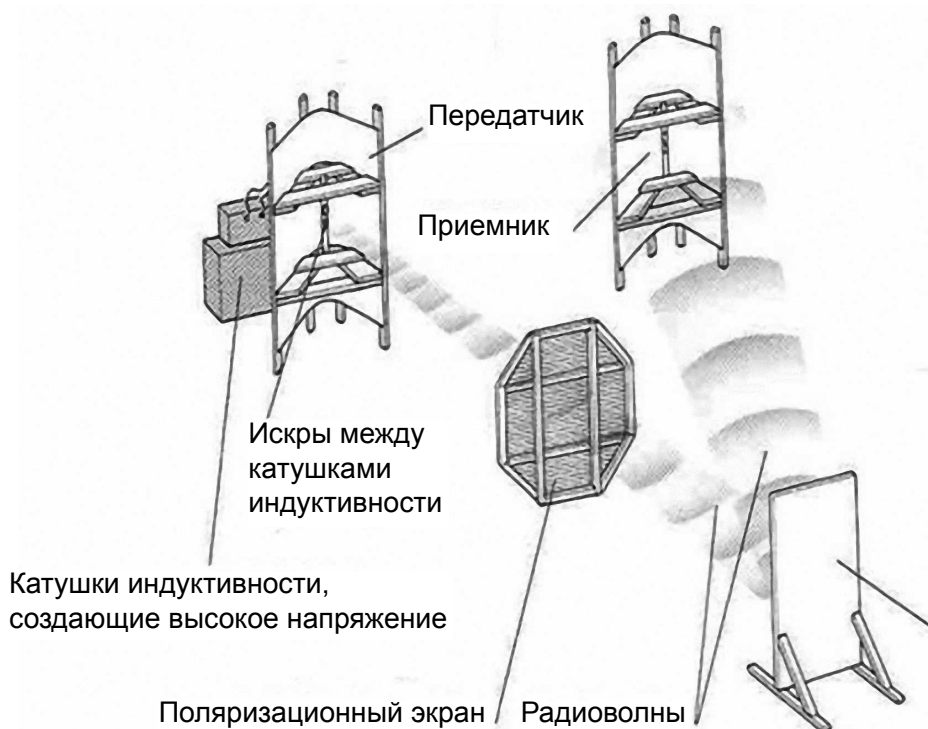
Итак, исследованиями Герца было доказано следующее: электромагнитные волны могут распространяться (подобно световым) в непроводящей среде (эфире); они имеют ту же физическую природу, что и оптические явления; так же, как и свет, они распространяются с конечной скоростью; интенсивность их в свободном пространстве убывает обратно пропорционально первой степени расстояния от

<sup>1</sup> Там же.

<sup>2</sup> Димер — молекула, составленная из двух одинаковых более простых молекул — мономеров.

вибратора (а не третьей, как это происходит вблизи него); при подходящей частоте колебаний электрическая цепь может излучать в пространство электромагнитные волны (путем «отшнуровывания» от вибратора электрических силовых линий). Этих основных теоретических положений было вполне достаточно, чтобы прийти к их сознательному использованию для изобретения практических технических устройств.

«С 1886 по 1888 г. Герцу удалось с искровым промежутком в качестве элемента, создающего колебания, и с настроенными колебательными контурами создать свободные (не зависящие от проводника) электромагнитные волны и доказать распространение этих волн в пространстве (рис. 2.11). Заимствованные из оптики опыты по преломлению, дифракции и отражению электромагнитных волн придали электромагнитной теории Максвелла уже определенное эмпирическое значение» [26, s. 97].



**Рис. 2.11.** Реконструкция схемы эксперимента Герца по поляризации электромагнитных волн<sup>1</sup>

Приравнивание и использование для описания электродинамических процессов обобщенной онтологической (теоретической) схемы оптики, достаточно полно разработанной к этому времени в трудах Юнга и Френеля, и акустики позволило Герцу не только применить

<sup>1</sup> См.: *Wolfschmidt G.* Heinrich Herz und die Entwicklung der Telekommunikation // *G. Wolfschmidt. Physik mit Her(t)z.* Hamburg: Landesinstitut für Lehrerbildung und Schulentwicklung. 2007, s. 26.

ряд таких понятий, как «угол падения», «показатель преломления», «фокальная линия» и т. д., но и осуществить над электромагнитными колебаниями ряд классических оптических опытов, например по регистрации прямолинейного распространения, интерференции и преломления электромагнитных волн. Эти эксперименты подтвердили адекватность выбранной Герцем теоретической схемы и доказали ее универсальность для разных типов физических явлений. Например, после очередного экспериментального исследования стоячей волны Герц пишет, что вопреки ожиданию узловые точки существуют на самом деле. Они уже не рассматриваются им просто как математические абстракции. Герц объективирует относительно электродинамических процессов изображение стоячей волны, распространенное в оптике и акустике. При этом он сознательно использует эту аналогию.

Герц по этому поводу пишет: «В оптике аналогией нашему опыту является опыт Ллойда с зеркалами Френеля. В оптике и акустике эти опыты используются как доказательства волновой природы света и звука, поэтому описанные здесь явления следует рассматривать как доказательство волнового распространения индуктивного действия электромагнитных колебаний» [16, s. 145]. Герц проделал свои опыты, чтобы доказать связь между светом и электричеством. Он пишет в письме Гельмгольцу от 30 ноября 1888 г. из Карлсруэ<sup>1</sup>, что ему посчастливилось доказать регулярное отражение излучения. Герц установил рядом два зеркала таким образом, «чтобы не было влияния *A* на *B*, а напротив этих зеркал поставил металлическую стенку так, чтобы искры сразу же проявлялись в *B*, которые еще были распознаваемы, если стенка отстояла от зеркал на 10 м. Точно так же я смог получить отражение под углом в  $45^\circ$ , — пишет он, — причем я использовал две соседние комнаты, как показано на чертеже. Деревянные двери ничуть не мешали появлению искр» (рис. 2.12)<sup>2</sup>.

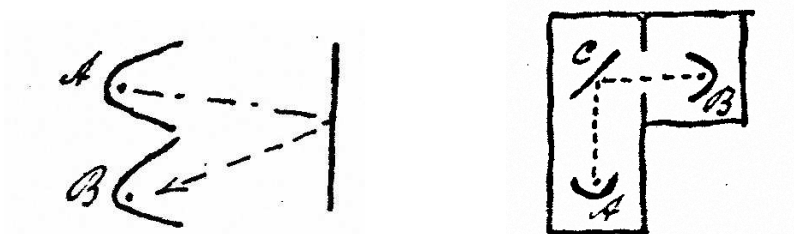


Рис. 2.12. Доказательство отражения электромагнитных волн в одном из опытов Герца<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Brief HS 03122.

<sup>2</sup> Из письма Генриха Герца Герману Гельмгольцу от 30 ноября 1888 г. из Карлсруэ (Brief HS 03122).

<sup>3</sup> Brief HS 03122.



Используя математический аппарат, Герц сводил общие случаи к частным, но экспериментально доказуемым, отвлекаясь от практически несущественных ограничений. «В общем случае, — пишет он, — получаются очень сложные формулы, которые не позволяют составить наглядного представления о распространении сил. Но для отдельных частных случаев результаты относительно просты». И Герц отдает предпочтение этим простым и практически применимым случаям и не рассматривает случаи, которые не имеют никакого практического значения [17, с. 98, 117]. Это позволяет ему сделать важные выводы, в частности о разных законах изменения электрической силы вблизи и вдали от вибратора, и решить конкретные задачи (функционирование теории), например произвести расчет простейшего излучателя электромагнитных волн — диполя.

Такой подход станет затем весьма важным средством решения инженерных задач в радиотехнической теории. Задача анализа радиотехнических устройств заключается в том, чтобы подробно описать их не во всех возможных аспектах, а лишь в определенных, значимых для решения данной инженерной задачи. «Радиотехнику... в особенности необходимо научиться правильно пользоваться теорией, не усложняя дело излишней точностью и не упуская из вида ничего существенного» [27, с. 10].

Применяемые Герцем теоретические понятия имеют четкое математическое выражение (поляризация, смещение, количество электричества, сила тока, период, амплитуда, длина волны и т. д.). Однако он постоянно имеет в виду и соотнесенность математического описания с опытом. Так, в основных уравнениях электродинамики он перешел от использования потенциалов, служащих для теоретического описания, к напряженностям, которые являются экспериментально измеримыми [28, с. 221]. Производя же опыты, он постоянно обращается к математическим расчетам, например периода колебаний по формуле Томсона. Взятая из оптики и акустики теоретическая схема естественного процесса распространения электромагнитных волн (Герц называет ее «картиной поля», «картиной электрических волн») позволила ему транслировать и соответствующую математическую схему — геометрическое изображение стоячей волны, которое дает возможность четко определять узловые точки, пучности, период, фазу и длину волны. В соответствии с этой схемой Герц и производит необходимые экспериментальные измерения, например, фазы и амплитуды электромагнитных колебаний при отражении, показателя преломления асфальтовой призмы и т. д.

Таким образом, работы Герца завершили построение естественно-научной теории — электродинамики. Заимствованные Максвеллом из гидродинамики представления об идеальной несжимаемой жид-

кости и перенесенный из нее математический аппарат были приспособлены к физическим задачам и представлениям электродинамики. В качестве эмпирического базиса новой научной теории выступили многочисленные экспериментально полученные закономерности и построенные на их основе частные теоретические схемы различных теорий электричества и магнетизма, обобщенные Фарадеем. К ним следует отнести законы Кулона и Ома.

Важным шагом в ее развитии было также изобретение в самом начале XIX в. непрерывно действующего гальванического источника электрического тока, названного в честь его изобретателя итальянского физика А. Вольта «вольтов столб». Г. Кавендиш, Ш. Кулон и С.-Д. Пуассон определили закон силы, согласно которому наэлектризованные и намагниченные тела взаимно притягивались и отталкивались. В 1820 г. Г.Х. Эрстед открыл действие электрического тока на магнитную стрелку. Эти и другие результаты стали основой для создания Фарадеем проектов новых экспериментальных ситуаций и развития учения о магнитных силовых линиях, ставших переходным мостом между математическим описанием электродинамических процессов и их физическим представлением. Уравнения Максвелла позволили получать новые знания в рамках электродинамики дедуктивным путем. Г. Герц своими блестяще проведенными опытами не только доказал истинность новой научной теории, но и достроил ее здание, поставив в четкое соответствие математическим и поточным (физическим) теоретическим схемам структурные схемы физических экспериментов (рис. 2.13). Последние открыли новый этап в развитии электродинамической теории — этап тиражирования многочисленных новых экспериментальных ситуаций и совершенствования экспериментального обрудования, чем занялись многие физики сразу же после публикации результатов, полученных Герцем.

«Волны Герца были приняты не только физиками как доказательство теории Максвелла. С волнами Герца само ядро теории Максвелла, а именно токи смещения и их электродинамическое влияние, несомненно, привлекло внимание электротехников, которые уже почти в течение двадцати лет фиксировали его на сильноточной электротехнике» [26, с. 97]. Однако для практического применения герцевых колебаний аппаратура была еще недостаточно совершенной.

В этом смысле весьма интересным является сравнение работ Г. Герца и О. Лоджа, которые работали в одном направлении и преследовали идентичные научные цели.

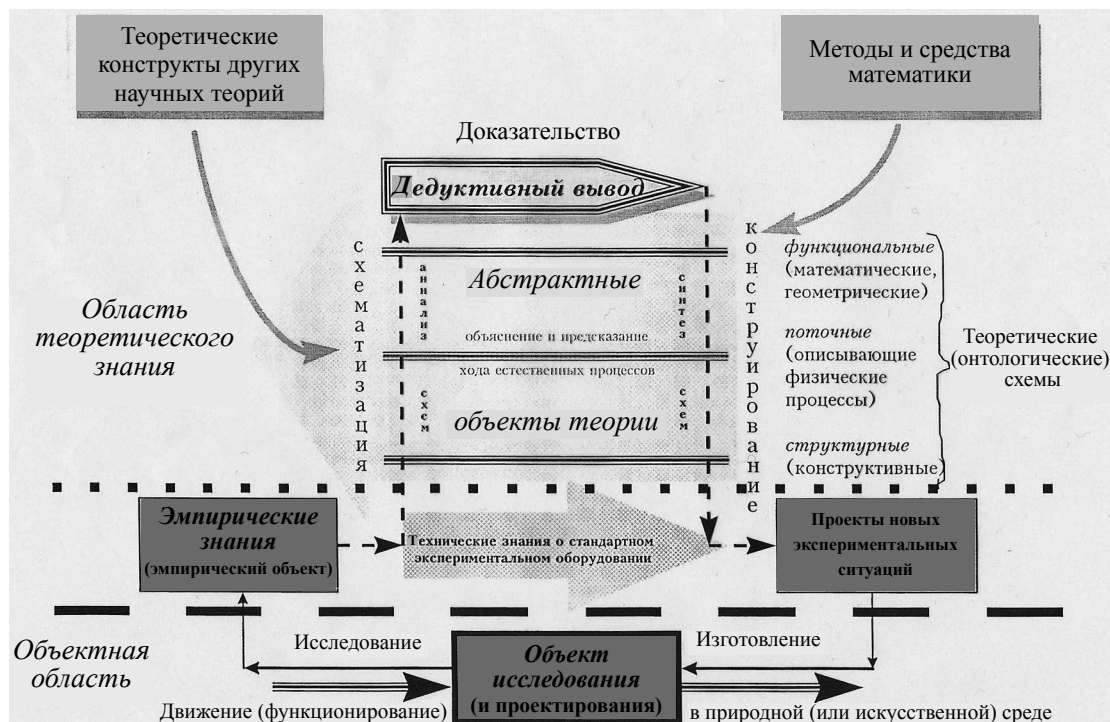


Рис. 2.13. Строеение естественнонаучной теории

Но у них наблюдаются и серьезные различия в используемой экспериментальной технике. Как было уже указано выше, Герц унаследовал свою достаточно хорошо оснащенную лабораторию в университете г. Карлсруэ от Ф. Брауна. Лодж, напротив, получив в 1881 г. место профессора экспериментальной физики в университетском колледже Ливерпуля, вынужден был оснащать свою лабораторию сам, поскольку вообще отсутствовало какое-либо лабораторное оборудование. При этом он стремится создать учебную лабораторию, в которой студенты должны были учиться сами выполнять эксперименты.

Герц, отказавшись от экспериментирования с длинными проводниками, обратился к исследованию непосредственного излучения электромагнитных волн от антенны. Лодж экспериментирует преимущественно с длинными проводниками для исследования генерируемых ими электромагнитных волн. Он работал, таким образом, с закрытой цепью, изучая в них электрические колебания, что способствовало выявлению и изучению феномена электрического резонанса. Герц же работал с открытой цепью, в которой колебания быстро затухают, поскольку они теряются в пространстве. Поэтому феномен резонанса, который играет в исследованиях Лоджа центральную роль, для Герца имеет лишь случайное значение.

В результате Герц изобрел техническую базу для искровой телеграфии, а Лодж открыл технику регулирования. Оба они сделали это в качестве побочного продукта их основной научной деятельности.

Герцем была создана система лабораторного оборудования, используемого для генерации, излучения и обнаружения радиоволн, хотя он преследовал цель экспериментальной проверки электродинамической теории Максвелла. Впрочем, данная проверка была проведена и Лоджем, почти одновременно с Герцем. Более утонченное и чувствительное экспериментальное оборудование, разработанное Лоджем, уже могло быть использовано в качестве средства передачи сообщений на расстояние, но он занимался главным образом демонстрацией экспериментов на своих публичных лекциях, где это оборудование рассматривалось более как курьез, интригуя публику.

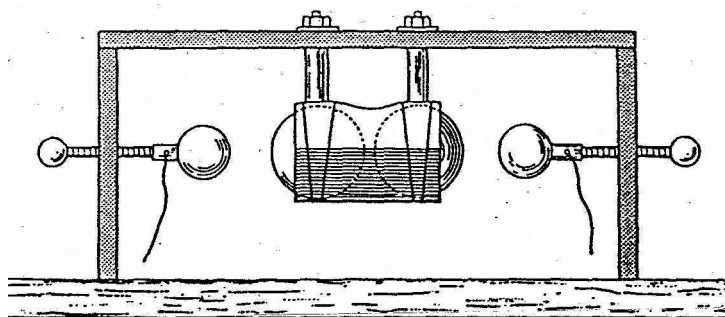
В 1894 г., когда Лодж продемонстрировал радиосвязь, у него не возникало даже мысли о коммерческой разработке своих научных и технических идей, хотя в отношении разработки более утонченного экспериментального оборудования он в гораздо большей степени, чем Герц, стремившийся лишь доказать волновой характер электромагнитного излучения, работает как инженер, стремясь, чтобы с помощью этого оборудования «некоторые догадки гения могли бы быть проверены и сделаны очевидными для рядового человека» [29].

### **2.2.3. Совершенствование экспериментального оборудования**

После публикации результатов Герца развернулись исследования с целью усовершенствования экспериментального оборудования и разработки новых схем экспериментально-измерительных ситуаций, позволяющих найти более простые и надежные способы получения и регистрации электромагнитных волн. «Не только профессиональные физики, преподаватели и изучающие физику, но также электротехники, получившие научное образование, пытались познакомиться с основными положениями этой теории» [30, s. VI]. Эти работы фактически еще не выходили за пределы экспериментальной деятельности в естественной науке, но вели к техническому использованию электродинамики. П.Н. Лебедев в своей работе 1895 г. «О двойном преломлении лучей электрической силы» писал: «После того, как Герц дал нам методы экспериментально проверить следствия электромагнитной теории света... естественно появилась потребность делать его опыты в небольшом масштабе, более удобном для научных изысканий» [31, с. 398]. Именно эта деятельность и сделала возможным появление первых радиопередающего

и радиоприемного устройств, хотя она и не выходила за пределы детальной разработки и конкретизации теоретической схемы электродинамики.

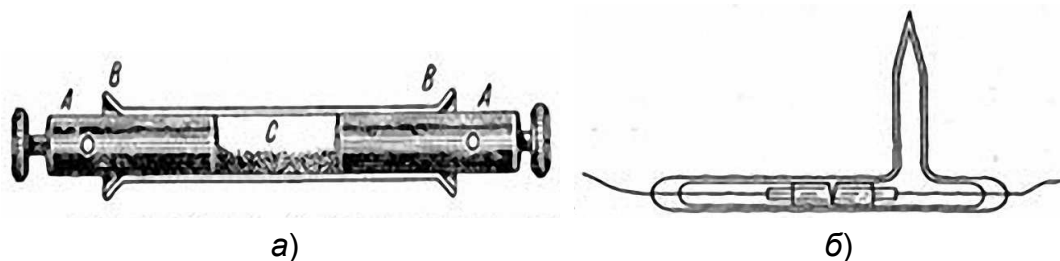
Недостатками вибратора Герца были быстрые затухание колебаний и обгорание контактов. Первый недостаток был устранен за счет введения вместо одного трех искровых промежутков, второй — после помещения осциллятора в жидкость. Идея поместить центральные сферы, соединяемые с внешними сферами разрядом, в масляную жидкость позволила увеличить длину искры без необходимости каждый раз полировать шарики и легко изменить период колебаний путем сближения или удаления обкладок конденсатора, включенного в первичный контур, или самих шаров вибратора. А. Риги, например, чтобы увеличить потенциал разряда, использовал для этого вазелин (рис. 2.14).



**Рис. 2.14.** Осциллятор (искровой промежуток) Риги [29, р. 185]

Одновременное включение в первичный контур конденсатора устранило вредные электростатические помехи, нежелательные при некоторых опытах. В результате, чтобы получилось первое радиопередающее устройство, достаточно было включить в первичную цепь индукционной катушки ключ Морзе, что и было осуществлено Маркони.

Недостатком вибратора Герца была также малая величина получаемой искры, что затрудняло ее регистрацию. Поиски более надежного способа наблюдения искр производились сразу многими исследователями. В качестве регистратора ими использовались газоразрядная трубка, электроскоп, термоэлемент и др. Однако наиболее перспективным оказался когерер — прибор для обнаружения электрических колебаний, действие которого основывалось на изменении сопротивления «плохого контакта» под действием электрических колебаний в цепи, частью которой он являлся. Когерер (или фриттер) был разработан французским физиком католического парижского университета Эдуардом Бранли и состоял из стеклянной трубки, наполненной прессованными металлическими опилками (рис. 2.15).



**Рис. 2.15.** Когерер: *а* – Бранли; *б* – Маркони (*А* – клеммы; *В* – стеклянная трубочка; *С* – металлические опилки<sup>1</sup> или никелевый порошок)<sup>2</sup>

Бранли показал, что сопротивление когерера, которое обычно высокое, становится нулевым, если вблизи появляется искра. Сам Бранли, однако, сначала не заметил связи этого факта с электромагнитными волнами, но этот аппарат был сразу же многими использован для беспроволочной телеграфии. Когерер со своей способностью внезапно изменять состояние изолятора на состояние проводника был «полностью неопределенным конструктивным элементом» радиоприемника, который «не давал никакой возможности дать ему теоретическое описание» [32, 151].

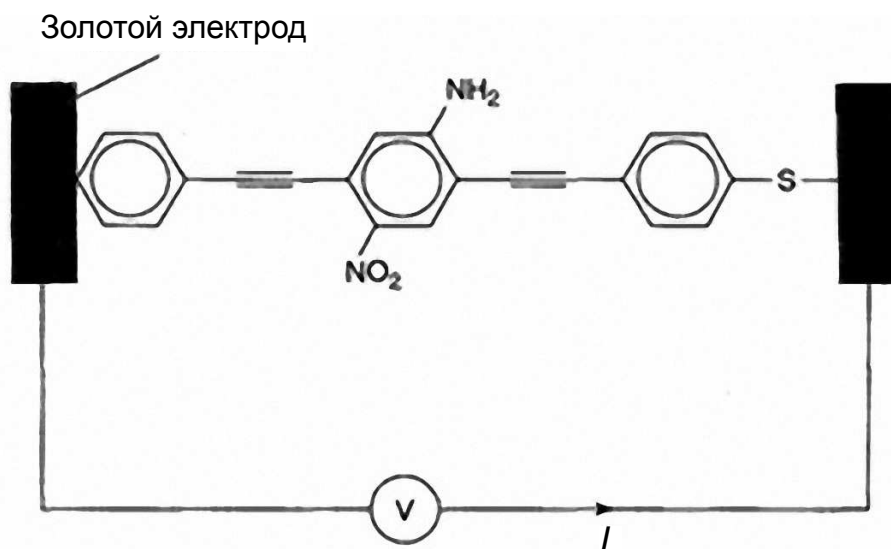
При помощи когерера английский ученый и инженер О. Лодж продемонстрировал отражение, преломление и поляризацию электромагнитных волн. Как сообщает сам Герц: «Профессор Оливер Лодж в Ливерпуле в те же годы, когда была сделана мной описанная работа, рассматривая теорию грозового разрядника, провел ряд опытов по разряду весьма малых конденсаторов, которые привели его к наблюдению колебаний и волн в проводах. Поскольку он действовал полностью на основе максвелловских представлений и весьма усердно стремился доказать эти представления, несомненно, если бы я не опередил его, он также пришел бы к наблюдению волн в воздушной среде и таким образом получил бы доказательство распространения электрической силы во времени» [22, s. 3]. Для восстановления когерера автоматический встряхиватель опилок, которыми он был начинен, сначала включался в цепь когерера, а затем во вторичную цепь с более мощным источником энергии (воздействие электрического заряда в значительной степени уменьшает большое сопротивление опилок). Так появилось первое радиоприемное устройство.

Пришедшая электромагнитная волна делает металлические опилки или никелевый порошок проводником и таким образом активирует вспомогательный вторичный контур. Интересно, что в современ-

<sup>1</sup> Опыты Г. Герца – основополагающая предпосылка к изобретению радиосвязи. Проект: От электрической искры до мировой компьютерной сети – <http://radiomuseum.ur.ru/index4.html>

<sup>2</sup> Aitken H.G.J. Syntony and spark – the origin of radio. N.Y.: John Willey & Sons, 1976, p. 143.

ной нанотехнонауке используется тот же принцип, что и в когерере. На рис. 2.16 показан «электронный ключ», в котором связанные вместе проводящие молекулы в конце концов замыкают золотые электроды. В исходном положении ключ является непроводящим; однако, если напряжение достаточно, чтобы переместить один электрон с золотого электрода в молекулу, он становится проводящим. Дальнейшее возрастание делает его снова непроводящим после добавления следующего электрона» [33, р. 351].



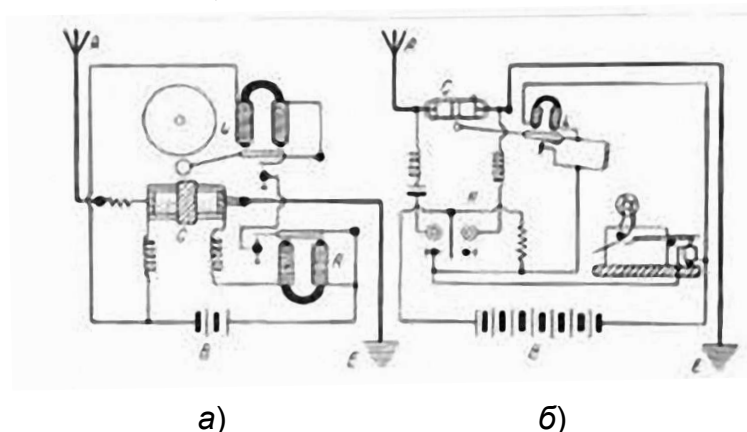
**Рис. 2.16.** Электронный ключ, в котором связанные вместе проводящие молекулы замыкают электроды [33, р. 351]

В сущности, принцип действия этого электронного ключа ничем не отличается от когерера первого радиоприемника, в котором металлические опилки (в приемнике Попова — когерер Бранли) или никелевый порошок (как у Маркони) становились токопроводящими при появлении электромагнитной волны и снова непроводящими при встряхивании когерера. «Оливер Лодж уже в начале 90-х гг. смог значительно усовершенствовать оборудование Герца. Однако это оборудование все еще не выходит за пределы лабораторного применения» [34, s. 130]. Маркони конструктивно улучшил уже по большей части имеющееся оборудование, создал технологичную конструкцию, для производства и продвижения на рынок которой им была основана в 1897 г. компания Wireless Telegraphy and Signal, положившая начало трансферу этой новой техники (телеграфа без проводов) в хозяйственную сферу.

В 1895 г. А.С. Попов использовал когерер, снабдив его встряхивателем и реле и соединив с подвешенным проводом (приемной антенной), для регистрации гроз. В то же самое время Маркони провел серию опытов с применением осциллятора А. Риги, подключив

к нему подвешенный провод (передающую антенну). Для приема он использовал оборудование, в основном идентичное аппаратуре Попова [18]. В 1896 г. Попов опубликовал в журнале российского физико-химического общества статью под названием «Прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний», в которой он поместил схему и детальное описание первого в мире радиоприемника. Успешное практическое применение этого прибора доказало его способность принимать атмосферные электромагнитные волны. 24 марта 1896 г. ученый наглядно продемонстрировал беспроводную передачу сигналов на расстоянии 250 м.

В июне 1896 г. итальянец Гуглиельмо Маркони запатентовал в Англии изобретение, которое повторяло ранее опубликованную Поповым схему его прибора (рис. 2.17). Эта акция вынудила российского ученого опубликовать в отечественной и международной прессе ряд заявлений, в которых он защищает свои права на приоритет. Несмотря на то что на Парижском международном конгрессе в 1900 г. оно было признано, в общественном сознании укоренилось мнение о Маркони как изобретателе радио, прежде всего благодаря его патенту. Позже к игнорированию на Западе российского изобретателя примешались еще и политические компоненты.



**Рис. 2.17.** Сравнение схем приемников А.С. Попова (а) и Г. Маркони (б)<sup>1</sup>

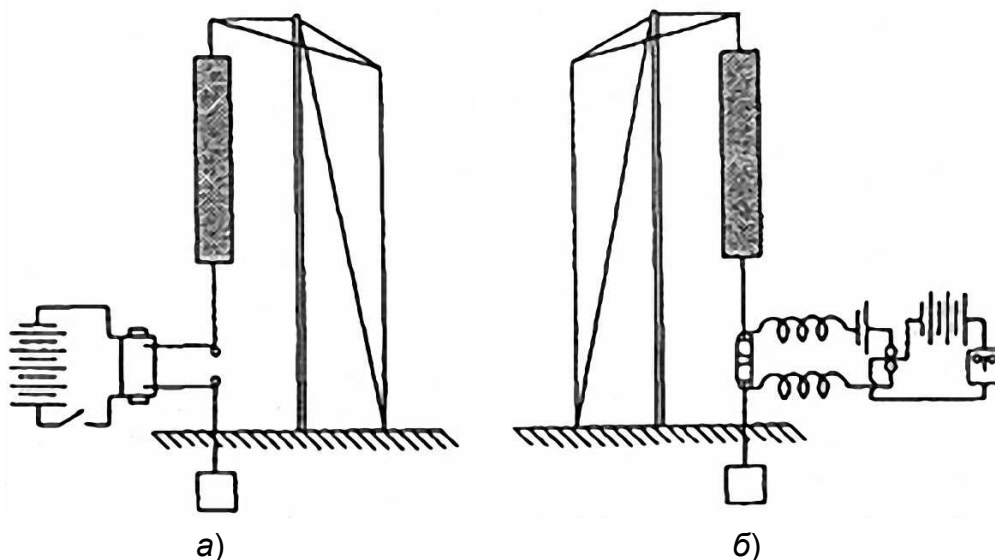
Интересно сравнить описания опытов Попова и Маркони. В книге «Царство изобретений», впервые опубликованной в 1901 г., передача сигналов на расстояние, осуществленная Маркони, описывается следующим образом [35, s. 256].

Для проведения в 1898 г. опытов — телеграфии без проводов — было выбрано предгорье на юго-восточном побережье Англии. (Первый опыт был проведен в 1896 г. на относительно небольшом расстоянии примерно в 13 км через Бристольский канал.) Это место было, однако, уже и раньше связано с историей электричества. Например,

<sup>1</sup> *Blake G. History of Radiotelegraphy & Telephony. – London, 1928, p. 65.*

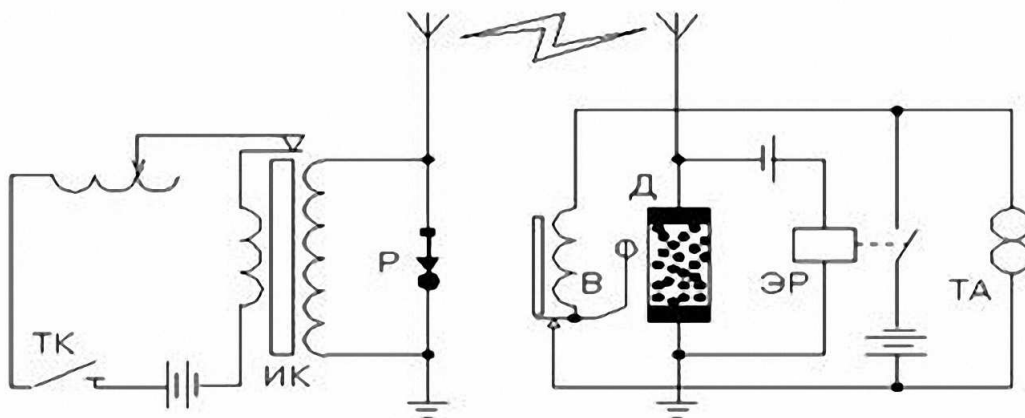


Б. Хопкинсон и Адамс испытывали там на маяке свои первые машины переменного тока. Они также проводили эксперименты по измерению силы света в электрических лампах. «Именно перед этим маяком была воздвигнута мачта высотой в 350 м, составленная из трех частей, передатчик и приемник электрических волн, которые являются носителями беспроволочной телеграфии» (рис. 2.18).



**Рис. 2.18.** Передающая (а) и приемная (б) станции Маркони [29, р. 195]

Собственно станция состоит из большой катушки индуктивности, когерера и аппарата для приема телеграмм (рис. 2.19).



**Рис. 2.19.** Передатчик Маркони с осциллятором Риги и приемник<sup>1</sup>

Улучшенная конструкция позволила сделать так, чтобы приемный аппарат включался автоматически, как только передавались депеши, и чтобы тем самым станция всегда была готова к приему телеграфных сообщений. Принятая телеграмма вычерчивалась в виде четких точек и тире с помощью специального карандаша на движущейся

<sup>1</sup> <http://www.computer-museum.ru/connect/histra13.htm>

бумажной ленте; кроме того, можно было включить электрический звонок, по сигналам которого телеграфист мог принимать депешу непосредственно на слух. Даже неопытные телеграфисты с помощью этого аппарата могли достичь скорости от четырнадцати до пятнадцати слов в минуту, а опытные — более двадцати. После того как была успешно осуществлена связь между английским и французским побережьями на расстоянии 50 км, следующим важным шагом стало дальнейшее улучшение аппарата.

Что же, собственно говоря, нового сделал Маркони, если все, что он применил в своем аппарате, было известно до него? «Вклад Маркони следует искать в ином направлении. В действительности ему удалось, в отличие от его предшественников, с помощью в принципе уже известных мероприятий и на основе интуиции относительно технических характеристик прийти к функционирующему целому; достаточным физическим образованием он, однако, не обладал. Собственный изобретательский вклад Маркони был минимальным» [36, s. 445].

«Если ставить вопрос относительно оборудования, то на него легко ответить: он привнес очень мало в то, что уже существовало... Он перевел уже сделанные другими научные открытия в полезное и потенциально прибыльное устройство. Говоря аналитически, он был заключительной ступенькой в простой линейной прогрессии — заключительной в том смысле, что вместе с Маркони и подобными ему экспериментаторами (Поповым в России; Дюкрете во Франции; Слаби, Арко и Брауном в Германии; Стоуном, Фесседеном и де Форестом в США и до некоторой степени Лоджем в Англии) линия научного прогресса, ведущая свое начало от Фарадея и Максвелла до Герца, достигла теперь стадии коммерческой эксплуатации. Передача нового знания происходила до этой точки исключительно в одну сторону: от науки к технике и затем к коммерческому использованию. Теперь, однако, зародился противоположный поток информации, когда Маркони, имея цель — достижение все большего расстояния, которая в меньшей степени непосредственно касалась ученых, вышел за пределы той сферы знания, в которой наука того времени могла бы ему помочь, и начал исследовать проблемы, по которым наука не имела решения. Функция Маркони становилась более сложной. Кроме использования уже имеющегося знания для практических целей, он также стал генерировать, в своего рода процессе обратной связи, проблемы, которые должна была решать наука и данные для рационализации самой науки...

Как предприниматель в области техники и рационализатор, Маркони достиг той проблемной сферы, в которой наука не имела готовых ответов. Этот процесс обратной связи, генерация новой ин-

формации из “сферы опыта”, оказался бы более медленным для тех ученых, которые уже над этим упорно работали и, вероятно, было бы меньше неожиданных результатов, если бы Маркони удовлетворился бы работой с волнами очень короткой длины.

Следует отметить, что Лодж в своих экспериментах и демонстрациях между 1894 и 1896 гг. не находил ничего, что его удивляло бы, никаких явлений, которые он как ученый считал бы аномальными или странными. Маркони, напротив, уже с 1895 г. начал уходить от этого упорядоченного и хорошо организованного пастбища в область неизведанного.

Рассмотрим, например, что ему потребовалось, чтобы полностью понять результаты, которые он получил, оперируя со своей новой антенной и когерером. Ему требовалось создать теорию проектирования антенны; не считая фундаментальной теории линейного диполя, здесь ничего не было сделано. Ему была нужна теория распространения радиоволн и в особенности теория, которая позволила бы ему распознавать и использовать различия между характеристиками распространения разных диапазонов частот. Но такой теории не существовало ... Ему нужна была также такая теория линий передачи, которая позволила бы ему согласовать его передатчик и приемник с антенной. В этой области были выработаны некоторые эмпирические соотношения, но систематически организованного знания не существовало. В каждой из этих областей работа Маркони заключалась в генерации новых данных и проблем» [29, р. 198–200].

Точно так же экспериментировал в России с передачей сигналов без проводов А.С. Попов. «Летом 1897 г. Попов увеличил возможное расстояние передачи. На средства Морского министерства Попов построил новые приборы и достиг пятикилометровой дальности передачи сигнала. Этот первый российский опыт с радио, имевший в первую очередь военное значение, сохранялся в тайне, но открытое при этом свойство отражения радиоволн от предметов (а именно от кораблей) послужило основой для будущего радара. В 1898 и 1899 гг. Попов руководил экспериментами на Балтийском и Черном морях и разработал способ преобразования принятых радиоволн в звуковые сигналы (ранее модно было их регистрировать лишь на бумаге). В 1900 г. дальность передачи сообщений достигла уже 112 километров» (рис. 2.20) [37].

Тогдашние чиновники, в среде которых Попов находил недостаточно понимания, весьма незначительно поддерживали его работу. Он умер в 1906 г. после очередной бессмысленной беседы с соответствующим министром. Только позже важность его открытия для страны была правильно оценена. В 1910 г. для разработки мор-

ских радиостанций в Санкт-Петербурге Морским министерством России было основано «Радиотелеграфное депо» (позже ставшее Радиотелеграфным заводом).

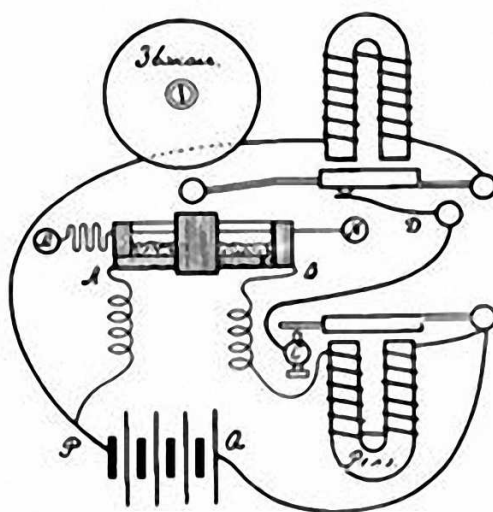


Рис. 2.20. Радиоприемник А. Попова<sup>1</sup>

В советское время как радиопромышленность, так и теоретические и прикладные исследования и разработки в этой области получают действительно серьезную государственную поддержку. В 1918 г. в Петрограде было основано «Российское общество радиоинженеров», которое было инициатором организации Центральной радиолaborатории (ЦРЛ) в Нижнем Новгороде, а также издания научного журнала «Телеграфия и телефония без проводов» при Народном комиссариате почт и телеграфов. На примере учрежденной в 1918 г. Нижегородской радиолaborатории видно, что теоретические исследования и задачи обучения совмещались в первые годы с инженерным проектированием и даже производством. Новые открытия почти сразу же воплощались в изобретениях и затем быстро попадали в производство.

В задачи Нижегородской радиолaborатории входила не только организация научных исследований, но и разработка новой радиоаппаратуры, подготовка высококвалифицированных специалистов, а также производство катодных реле до 3 000 штук в месяц. Однако в 30-е гг. лаборатория концентрирует свое внимание на выполнении общих научно-исследовательских функций. По мнению ее руководителя М.А. Бонч-Бруевича, она, конечно, могла решать задачи опытного производства, но никак не вопросы оказания помощи заводам. Для этой цели из нее выделилась лаборатория под руководством В.П. Вологодина, которая вошла в состав треста заводов сла-

<sup>1</sup> См.: Морозов И.Д. Что изобрел Попов и на что получил патент Г. Маркони — [http://www.1september.ru/ru/fiz/2002/20/no20\\_1.htm](http://www.1september.ru/ru/fiz/2002/20/no20_1.htm)

бого тока и была преобразована в Центральную радиолaborаторию, руководитель которой приравнивался по своему статусу к директорам заводов, входящих в трест.

Главной задачей ЦРЛ стало выполнение научно-технических исследований, ориентированных на решение определенного класса инженерных задач. На ее промежуточный (между теоретическими исследованиями в технической науке и исследованиями в сфере инженерной практики), но важный статус указывают следующие данные: 14 ее сотрудников стали академиками, 12 — членами-корреспондентами АН СССР, свыше 100 — докторами и кандидатами наук, более 60 — директорами и главными инженерами заводов и научно-исследовательских институтов (НИИ), на ее базе было создано более 15 НИИ и исследовательских лабораторий, с ее помощью появились десятки новых заводов [38].

Маркони использует для своих работ многие результаты других исследователей и изобретателей и демонстрирует коммерческую смекалку. Но очень скоро оказалось, «что для достижения большей дальности передачи сигналов требуется непропорциональное увеличение высоты антенны. Поэтому, например, А. Слаби (в 1897 г.) для преодоления расстояния в 21 км использовал антенный провод длиной 300 м, который прикреплялся к воздушному шару. На этом пути новое блестящее изобретение Маркони, как стало очевидно, не могло быть далее развито без появления новых идей и получения нового знания о происходящих в нем физических процессах. И то и другое смог достичь Ф. Браун...» [18]. Он разработал так называемый сдвоенный передатчик (первичный контур — конденсаторный контур с искровым промежутком, вторичный контур — антенна), в то время как Маркони использовал антенну с включенным в нее искровым промежутком. Какие физические процессы происходили в антенне Маркони, в то время никто ясно себе не представлял. В противоположность Маркони Браун сознательно работал с большими длинами волн. 14 октября 1898 г. Браун запатентовал свое изобретение.

Его ассистент и ближайший сотрудник Ценнек<sup>1</sup> провел серию опытов на Северном море для проверки возможностей обоих передатчиков и доказал этими опытами явное преимущество передатчика, созданного Брауном. Маркони моментально перенял новое изобретение, что позволило ему реализовать беспроводную телеграфную связь между Европой и Америкой в 1901 г.

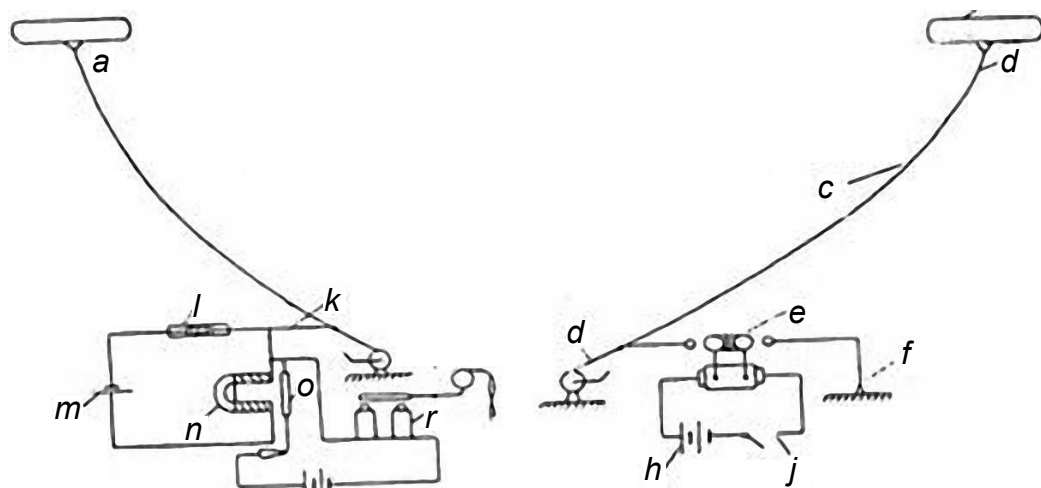
Интересно, что сам Маркони после первых успешных опытов по передаче сообщений на сравнительно небольшое расстояние не верил в возможность реализации беспроводной телеграфии на боль-

---

<sup>1</sup> Позже Ценек стал директором Музея истории техники в Мюнхене.

шие расстояния (как, например, между Европой и США). Он называл распространяемые тогда в прессе рассуждения по этому поводу необоснованными фантазиями. «Он сам (имеется в виду Маркони. — *Прим. В.Г.*) ни в коем случае не соглашается с фантастическими сообщениями прессы, которые видят в его изобретении знаки телеграфии будущего и считают реализацию беспроводной телеграфной связи между Америкой и Европой лишь вопросом времени. Эти сообщения прессы вызвали легко объяснимое беспокойство кабельных компаний. По его же мнению, беспроволочная телеграфия не сможет вытеснить провод и кабель, если речь идет о тысячах километров» [35, s. 257].

Другой немецкий ученый, А. Слаби, который принимал участие в опытах Маркони в мае 1897 г., провел после этого сам эксперименты по беспроволочной телеграфии. «Что же было здесь уже сделано к 1 ноября 1897 г.? Подытожим предварительные результаты: можно было на расстоянии 21 км привести в действие телеграфный аппарат Морзе и передавать в общем правильные неискаженные телеграммы без использования связного кабеля. Причем средства, которые использовал Слаби, в соответствии со схемой Маркони... были самыми простыми». Он улучшил аппаратуру, в качестве передатчика использовал искровой индуктор (катушку Румкорфа), искровой промежуток которого был расположен в индуктивно с ним связанном антенном контуре. Когерер же и соответствие антенного провода различным частотам были также последовательно улучшены (рис. 2.11).



**Рис. 2.11.** Схема приемно-передающей аппаратуры А. Слаби [34, s. 257]

«Канат, привязанный к аэростату *a*, расположенному на высоте примерно 250–300 м над землей, одновременно используется в качестве антенны. Между верхним 20-метровым канатом *b* и нижним, выходящим из лебедки *d*, канатом расположен 100-метровый стальной трос *c*, который и служит собственно антенной. Через тонкий

оголенный медный провод этот стальной трос соединен с осциллятором Риги  $e$ , состоящим из четырех шариков... Внешние шарики вложены во вторичную обмотку небольшого индуктора, первичная обмотка которого питается восемью аккумуляторными элементами  $h$  через выключатель  $i$ . Стальной трос  $c$  выполняет функцию антенны. Когерер  $l$  специально сделан не очень чувствительным, чтобы он не реагировал на случайные атмосферные помехи. Реле  $n$  после прохождения тока приводит в действие стержень  $o$ , а током от батареи  $p$  — телеграфный аппарат Морзе  $r$  [34, s. 130–131].

Спор за приоритет между Поповым и Маркони демонстрирует нам различия в “философии техники” сообществ ученых и инженеров. В то же время становится ясным, что для внедрения новой техники в жизнь важную роль играют не только открытие, изобретение и их патентирование, но и возможность промышленного производства этой новой техники, а также распространение вновь созданного продукта (нововведения) на рынке. Такую способность соединить воедино все эти области лучше всего продемонстрировал Ф. Браун, блестящий физик-теоретик и практик, который развивал беспроводную телеграфию одновременно со своими контактами в области промышленности. Он не только вовремя и грамотно запатентовал и защитил свои изобретения, но также создал фирму для продвижения своих изобретений и патентов на рынок. Он доказал, например, что его патенты на замкнутый колебательный контур и рамочную антенну, без которых вряд ли возможно было бы перейти к передаче сигналов на большое расстояние, появились существенно раньше патентов Маркони.

В Германии продолжалась борьба за приоритет между Брауном и Слаби, которую все же они смогли прекратить. Слаби и его бывший ассистент Георг фон Арко работали на фирму АЭГ, а Ф. Браун — на фирму “Сименс”. Браун разработал и усовершенствовал также целый ряд измерительных инструментов. Коммерческое распространение всех его приборов на рынке взяла на себя фирма “Хартманн и Браун”, руководителем которой был брат Брауна.

В связи с ростом значения радиотелеграфии в 1903 г. для противовеса деятельности фирмы Маркони с помощью АЭГ, а также “Сименс и Гальске”, которые до того находились в конкуренции друг другу, было создано “Общество беспроводной телеграфии” (“Телефункен”) [36, s. 446]. Совместное сотрудничество Ф. Брауна с инвестором Стольверком привело в июле 1900 г. к образованию “Общества Браун — Сименс — Гальске”, которое позже слилось с другими предприятиями и до сих пор производит свою продукцию под маркой “Телефункен”...

С технической точки зрения новая фирма “Телефункен” еще долгое время не была выше британского “Общества Маркони”. Ей, правда, удалось благодаря демпинговым ценам получить у российского правительства заказ на оснащение российского военно-морского флота системами Арко — Слаби. Но во время морской битвы при Цусиме (против японского морского флота) система отказала в работе, тогда как несколько станций Маркони надежно работали» [39, s. 13—21].

Далее развитие электродинамики проходило в двух основных направлениях:

1) дальнейшего обобщения и систематизации физической теории;

2) совершенствования структурных схем эксперимента, стимулировавшего появление беспроводной телеграфии (радиотехники).

«Главную цель технических наук мы видим в описании и объяснении структуры и функционирования, как существующей, так и возможной техники» [40, s. 324]. Это второе направление носило в основном инженерный характер и привело к созданию на базе разработанной Фарадеем, Максвеллом и Герцем естественнонаучной теории электромагнитных взаимодействий новой технической теории — теоретической радиотехники.

#### 2.2.4. Возникновение радиотехники

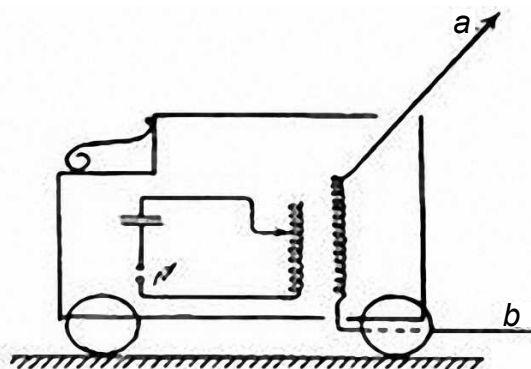
Институализация такого рода инженерной деятельности осуществляется, впрочем, лишь после открытия радио, когда начинает формироваться новая отрасль промышленности. Эта деятельность была направлена на разработку конструктивных вариантов радиотехнических устройств. Она составила основу появления и функционирования радиотехнической теории. С данного момента начинается собственная история радиотехники. С этого времени она становится связанной в основном с развитием новых схем радиотехнических устройств (например, схемой с заземленной сеткой, рефлексной системой, супергетеродинным приемником и т. д.).

Именно этого рода деятельностью и занялся Ф. Браун. В передатчике для беспроводной телеграфии должен был создаваться, по возможности, сильный высокочастотный переменный электрический ток, чтобы то же самое произошло и с излучением, т. е. электромагнитными волнами. Передатчик Маркони, который в отличие от конденсаторного контура представлял собой не закрытый, а открытый колебательный контур, превосходно излучал (радиоволны. — *Прим. В.Г.*). Конденсаторный контур, который сам практически ни-



чего не излучал, напротив, с точки зрения создания сильных токов высокой частоты намного превосходил открытый колебательный контур. На основе объединения обеих схем и возник знаменитый передатчик Брауна.

Аналогичная задача возникла и перед приемником. Прежде всего необходимо было, чтобы пришедшие от передатчика электрические волны были приняты, причем требовалось преобразовать в высокочастотные токи, которые затем со своей стороны воспроизводили бы знаки в телефоне или записывающем устройстве. И здесь тоже для приема волн нужен был подвешенный провод, как это превосходно сделали и Попов, и Маркони. Однако он в меньшей степени подходит для целевого использования полученной энергии. Для этого, как считал Браун, лучше подходит конденсаторный контур. Именно таким образом с помощью соединения этого провода с одним или многими конденсаторными контурами и возник связанный приемник Брауна (рис. 2.22) [18].



**Рис. 2.22.** Индуктивно связанный колебательный контур в передатчике Брауна (мобильный вариант) [41]

Ф. Браун был первым, кто действительно понял, какие электрические процессы происходят в радиопередатчике и радиоприемнике. Исходя из теоретических рассуждений, он пришел к выводу, что нужно индуктивно соединить искровой промежуток в передающем устройстве, а также когерер с антенной. Это сделало его передатчик гораздо более действенным и тем самым позволило осуществить радиосвязь через Атлантику. Изобретенный Брауном кристаллический детектор скоро заменил предложенный Бранли когерер. «Вся техника передачи с того времени, как Браун ввел в практику замкнутый контур, претерпела множество изменений. Передатчик с взрывным искровым разрядом был заменен передатчиком Вина после основополагающего открытия искры замыкания... Использование электронных ламп привело к полному видоизменению и появлению совершенно новых возможностей, которые в первые года становления этой области вообще трудно было себе даже представить» [18].

Именно с этого момента можно говорить о формировании собственно технической теории в радиотехнике.

В первые же годы после изобретения радио начинается бурное развитие радиотехники. Инженерная деятельность становится главным стимулом теоретических изысканий. Основное внимание многочисленных изобретателей того времени концентрируется на совершенствовании конструктивных элементов (детекторов, трансформаторов и машин высокой частоты, катодных ламп, прерывателей, рамочной антенны и т. д.) и схем радиотехнических устройств (дуговых генераторов, передатчиков с ударным возбуждением, замкнутого колебательного контура и др.).

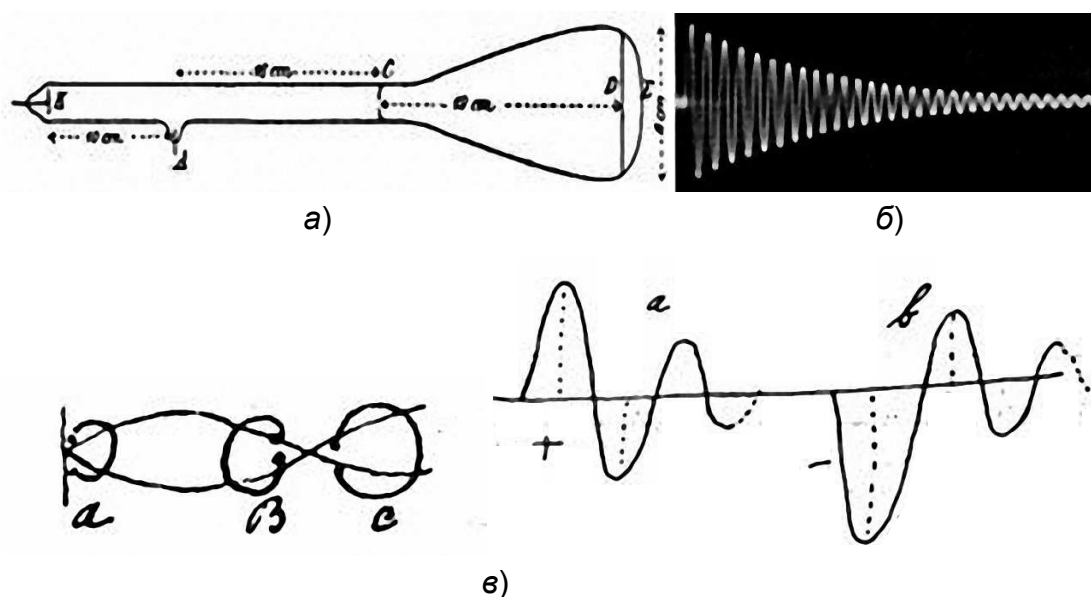
Применение замкнутого колебательного контура имело особое значение. «Для принятия электрических волн следовало использовать закрытые колебательные контуры, а не используемые до сих пор открытые контуры. В опытах 1913 г. в Страсбурге появляется рамочная антенна, которая сегодня является наиболее распространенной. Прием на рамочную антенну, в отличие от приема с помощью открытого колебательного контура, имел существенные преимущества. В этом случае можно освободиться от помех, которые появляются с вполне определенных направлений, и тем самым получить большую свободу от помех. Кроме того, появлялась возможность радиопеленга и т. д. Эти преимущества, которые сегодня всем известны, были впервые выявлены Брауном» [18].

Изобретение Ф. Брауном рамочной антенны имело важное значение для дальнейшего развития телеграфии без проводов. «В 1890 г. впервые примененная рамочная антенна сделала возможными направленное излучение и направленный прием. При этом были подавлены атмосферные помехи и нежелательный прием других станций. Маркони перенес эту новую схему Брауна в свои приборы. В 1901 г. он осуществил радиосвязь между Европой и Америкой, в результате чего беспроводная телеграфия смогла завоевать мир» [32].

Все это было направлено на увеличение их мощности, дальности действия, удобства эксплуатации, экономичности, а также на освоение все новых диапазонов электромагнитных волн для осуществления радиопередачи и радиоприема и достижения их все более наглядного представления. Такого рода элементом была, например, электронно-лучевая трубка, или трубка Брауна. «В силу ее практически безынерционного функционирования она давала возможность исследовать временные характеристики переменных токов и напряжений весьма высокой частоты. Эта особенность трубки, ее особое место среди иных осциллографических устройств подчеркивались Брауном буквально в самых первых публикациях. Для отображе-

ния быстрых колебаний, которые использует радиотехника, трубка Брауна является единственным средством детального исследования временных характеристик...» [18].

Браун хотел «с помощью своей электронно-лучевой трубки сделать видимым переменный ток, которым снабжался город Страсбург. Он заказал ее у наследника фирмы “Франц Мюллер Гайслер”... На связанном с его электронно-лучевой трубкой поворотном зеркале появилась синусоидальная кривая. Переменный электрический ток вновь созданной электростанции города Страсбурга стал виден на экране электронно-лучевой трубки... В последующие годы Браун и Ценнек добавили к этому дополнительные устройства, обеспечившие прежде всего горизонтальную развертку и некоторые иные улучшения... Роговский в Аахене доработал это устройство, введя в него в 1905 г. нагреваемый катод и электростатическую развертку»<sup>1</sup>. Изображение кривой тока было видно непосредственно на флуоресцирующем экране. Луч следовал непосредственно за изменениями электрического тока, и Браун смог сфотографировать картину колебаний и опубликовать ее. Было очень важно уметь представлять переменные токи, измерять их и геометрически конструировать (рис. 2.23) [32, s. 114–116].



**Рис. 2.23.** Оригинальный чертеж трубки Брауна (а) и осциллограмма (б)<sup>2</sup>; чертежи Г. Герца, сделанные им на основе наблюдения в темном помещении через микроскоп небольшого искрового промежутка (в)<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Там же.

<sup>2</sup> Там же.

<sup>3</sup> Из писем Генриха Герца швейцарскому физику Эмилю Саразину от 12 апреля 1891 г. и профессору Л. Ценлеру во Фрайбург от 29 апреля 1893 г. из Бонна (HS 03141 и HS 03169).

Трубка Брауна была, однако, только лишь прототипом современного осциллографа, который стал сегодня «одним из основных измерительных приборов в электронике, который позволяет сделать видимым на экране в графической форме изменяющееся во времени напряжение (прохождение и форму сигнала), а также измерить или представить его амплитуду в зависимости от времени» (рис. 2.24)<sup>1</sup>.

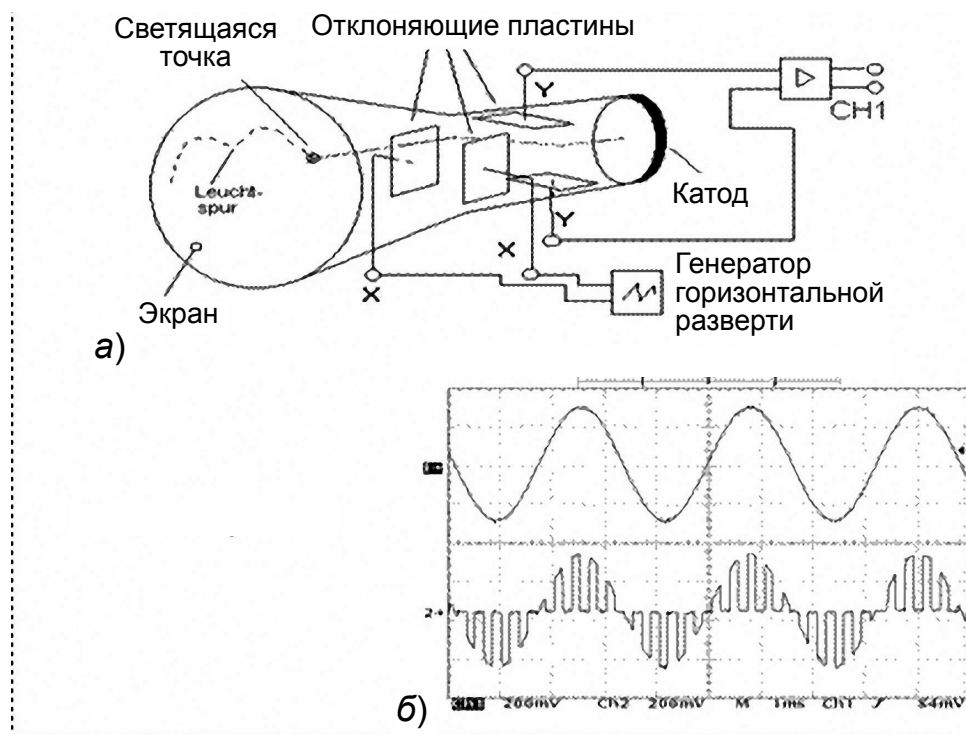


Рис. 2.24. Осциллограф (а) и осциллограмма (б)<sup>2</sup>

Каждому такому изобретению сопутствовали определенные теоретические и экспериментальные исследования. Например, для создания катодного вентиля (двухэлектродной лампы) был использован эффект Эдисона (электронная эмиссия), установившего в 1883 г. во время опытов со своей лампой накаливания, что «если вблизи нити накаливания расположить металлический стерженок и соединить его с положительным полюсом батареи, то через него потечет электрический ток» [36, s. 452]. Однако для достижения технического применения этого эффекта понадобилось провести целый ряд дополнительных исследований.

Американский физик Ли де Форест, установив, что раскаленное тело может вести себя как излучатель, стал разогревать не два, а один электрод, расположив при этом против него холодный анод в виде пластинки. Он «вполне сознательно начал поиск замены

<sup>1</sup> Der Oszillograph-Prinzip — <http://www.abe-si.de/ET/oszi.html>, <http://www.abe-si.de/ET/abtast.html>

<sup>2</sup> Там же.

для когерера в качестве радиоприемника... Он получил патент 15 января 1907 г... и сначала продемонстрировал трехэлектродную лампу с управляющим электродом как раннюю форму триода (рис. 2.25, *а*). Но этот управляющий электрод не был расположен еще между катодом и анодом... Только несколько позже... [он] начал вводить управляющий электрод между катодом и анодом, а именно — чтобы не разорвать электронный поток — в форме сетки» (рис. 2.25, *б*) [32, s. 451].

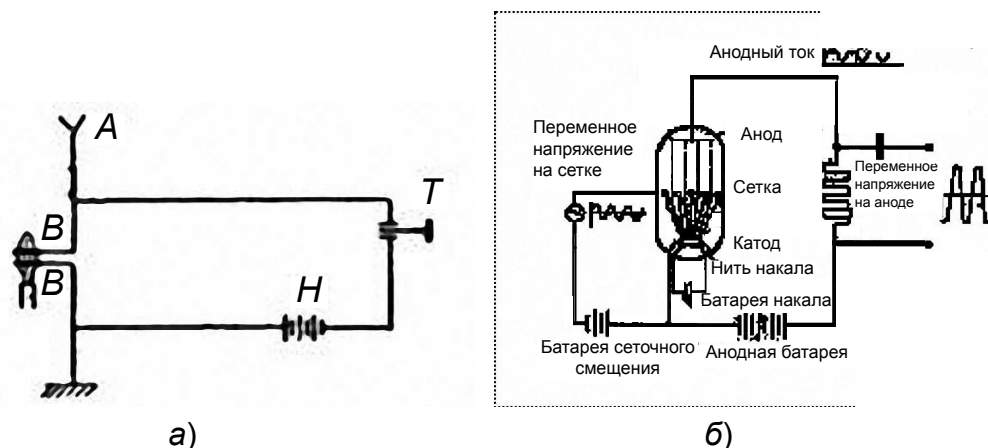
В современной нанотехнонауке созданы наноструктуры, выполняющие функции электронной лампы. В данном случае от анода к катоду как через вакуумное пространство транспортируются отдельные электроны, движение которых вблизи поверхности пленки жидкого гелия управляется сеткой. Существенное отличие заключается не только в наноразмерах, но и в том, что все это происходит на поверхности пластины гелия и, следовательно, является фактически двухмерной наноструктурой. Жидкий гелий идеально подходит в качестве субстрата для двухмерной электронной системы. Причем это возможно осуществить лишь, работая с тончайшей пленкой жидкого гелия, что на объемном материале практически невозможно. Отдельный электрон транспортируется вдоль наноструктурированной поверхности, причем его поведение в этом случае подчиняется одновременно как закономерностям классической, так и квантовой механики.

На рис. 2.26 показан так называемый полевой фототранзистор, который функционально аналогичен электронной лампе (см. рис. 2.25, *б*), хотя принципы их действия совершенно различны.

Флеминг использовал технически уже открытый Эдисоном эффект для конструкции двухэлектродной детекторной (выпрямительной) электронной лампы и в его (Эдисона) «колебательном клапане» и уже в 1905 г. получил британский и американский патенты. «Права на его изобретения находились в собственности фирмы Маркони, консультантом которой он был. Но диод Флеминга так никогда и не сыграл какой-либо значащей практической роли, поскольку он явно проигрывал в качестве выпрямляющего элемента кристаллическому детектору Брауна» [32, s. 452].

Флеминг использовал полученный «пустотный клапан» в качестве детектора в радиоприемном устройстве (рис. 2.27).

Точно так же открытое ранее свойство двух находящихся в соприкосновении кристаллов пропускать ток в одном направлении послужило основой для изобретения кристаллического детектора. После ряда специальных исследований Браун и Пиккар нашли подходящие пары для кристаллических детекторов.



**Рис. 2.25.** Трехэлектродная лампа (триод) Ли де Фореста с управляющим электродом и лампой накаливания Эдисона (а)<sup>1</sup> и схема трехэлектродной лампы (триода), где катод, подогретый нитью накала, эмитирует поток электронов, направляемый приложенным к аноду напряжением (б).

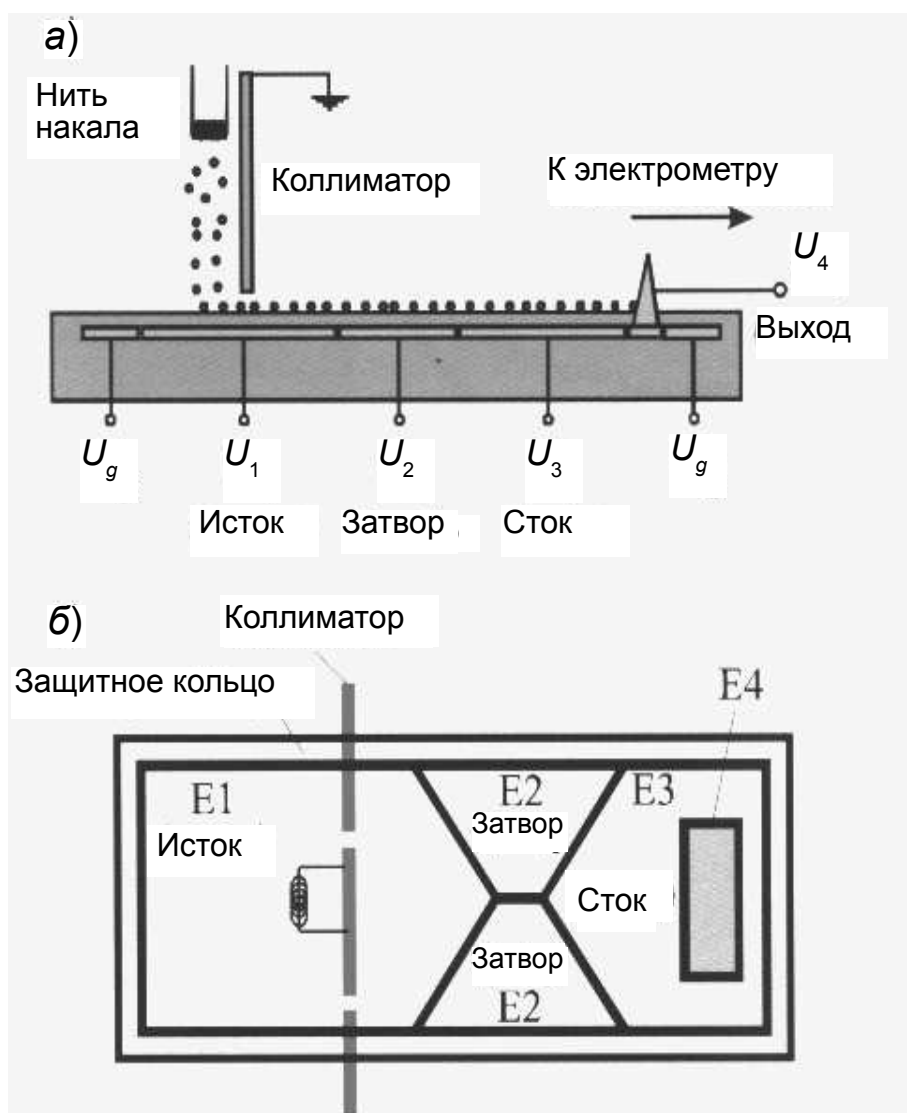
Переменное напряжение на сетке триода регулирует интенсивность этого потока электронов, создавая тем самым на выходе (анode) данного электронного устройства (усилителя) аналогичное по форме, но большее по амплитуде переменное напряжение

Уже в 1874 г. Браун пишет об открытых им явлениях следующее: «если пропустить электрический ток через медный колчедан, пирит (железный колчедан), галенит (свинцовый блеск), блеклую руду и т. п. минералы, то наблюдается тот факт, что сила тока не пропорциональна электромагнитной силе. Если же при этом электроды сделаны различным образом, тогда сила тока зависит также от направления заложенной разности потенциалов.

Браун, например, обнаружил, что в случае принятой им первоначальной конфигурации опытного оборудования различия в силе тока для противоположных направлений составляют 30%. Для более позднего способа расположения эти различия в силе тока стали существенно больше, так что можно было сказать, что ток течет в одном направлении. Это явление, которое представляет собой отклонение электропроводности от закона Ома и характерно для однополярной проводимости, нашло свое важное применение: на нем основываются открытые Брауном и введенные в практику телеграфии без проводов кристаллические детекторы» [18].

Применение новых детекторов обеспечивало важный переход от передачи и приема простейших звуковых сигналов азбуки Морзе к передаче и приему человеческой речи, закодированной в изменениях частоты или амплитуды электромагнитных колебаний.

<sup>1</sup> Искровой беспроволочный телеграф как эпоха ранней радиосвязи. Проект: От электрической искры до мировой компьютерной сети – <http://radiomuseum.ur.ru/index5.html>



**Рис. 2.26.** Электронная лампа как двухмерная наноструктура: *а* — вид сбоку; *б* — вид сверху [42, р. 182]. Электроны эмитируются нитью накала и направляются с помощью специально приложенного электрического поля. Исток (E1) и сток (E3) этого устройства разделены узким каналом шириной в несколько десятков микрон. Прикладывая отрицательное напряжение к затвору (разделительной сетке E2) с обеих сторон этого канала, сужают рабочую ширину канала таким образом, что транспортировка электрона от истока к стоку (т. е. от катода к аноду. — Прим. В.Г.) полностью перекрывается. Коллиматор — это устройство, ограничивающее число и изменение угла распространения пучка электронов или отдельных частиц

Все это, однако, потребовало проведения новых исследований и разработки на их основе новых конструкций радиоаппаратуры для уменьшения шумовых эффектов, увеличения дальности приема с одновременным уменьшением размеров антенны и аппаратуры, а также потребления электроэнергии.

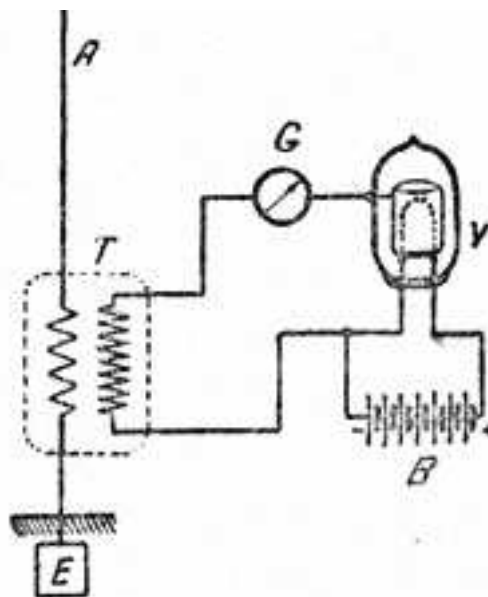


Рис. 2.27. Диод Флеминга<sup>1</sup>

Формирование новых теоретических схем радиотехники идет по двум основным направлениям:

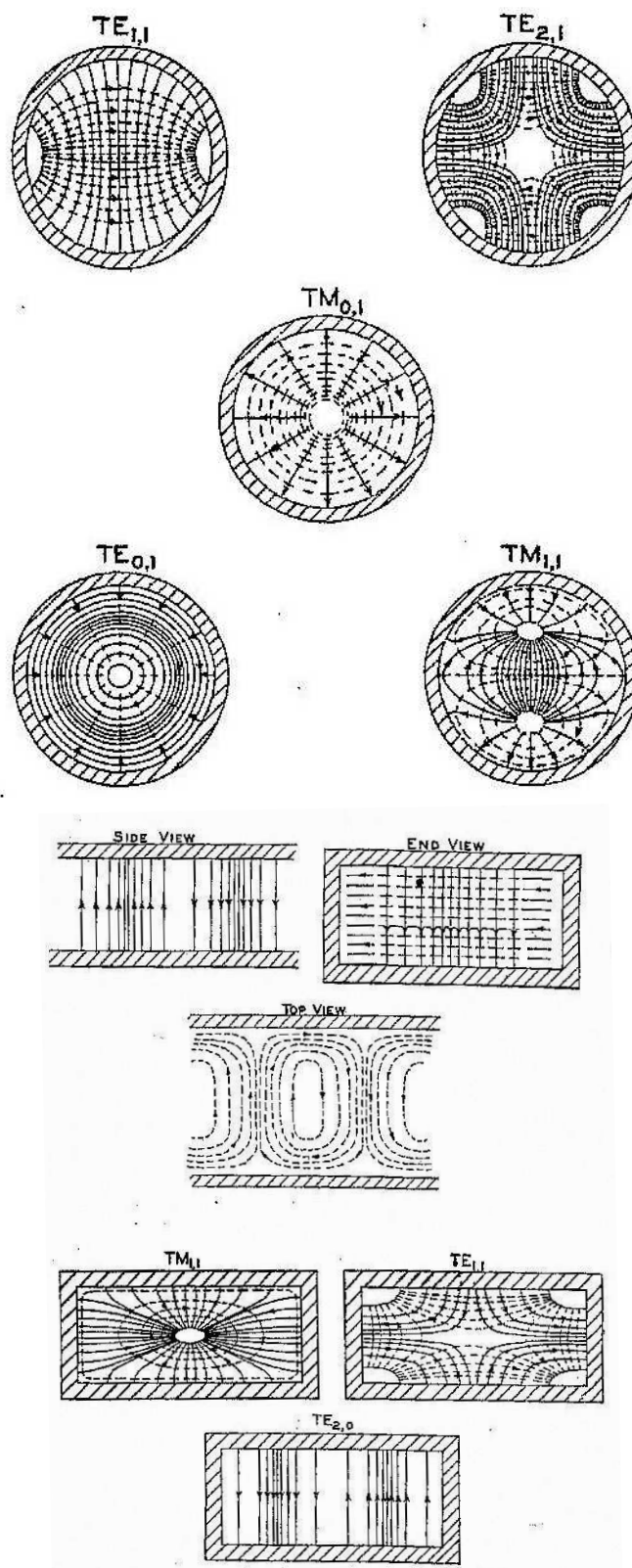
1. В плане развития и конкретизации «универсальной» теоретической схемы электромагнитных взаимодействий путем заполнения диапазона практически используемых радиоволн (с одновременным развитием методов исследования их физических свойств). При этом исследования стали проводиться не только с точки зрения распространения электромагнитных волн в свободном пространстве (рис. 2.7), но и в самих новых радиотехнических устройствах и их элементах, например в волноводах (рис. 2.28).

«Огромная серия экспериментальных работ и теоретических исследований также по чисто научным вопросам в области электрических колебаний и волн не была бы предпринята, если бы к ним не привела беспроволочная телеграфия» [43, s. 424].

2. В аспекте разработки специфической обобщенной теоретической схемы радиотехники на базе анализа конструкций различных радиотехнических систем, включая развитие средств их синтеза.

<sup>1</sup> Там же.





**Рис. 2.28.** Различное распределение силовых линий магнитного поля в круглых и прямоугольных волноводах<sup>1</sup>

<sup>1</sup> См.: *Moreno T.* Microwave Transmission Design Data. N.Y.: McGraw-Hill, 1948.

### 2.2.5. Построение технической теории — теоретической радиотехники

«Телеграфия без проводов» первоначально представляла собой прикладное исследовательское направление электродинамики. Позже она стала рассматриваться как новый раздел (область исследования) электротехники, задача которого заключалась в борьбе со всевозможными видами помех излучению, приему и использованию тока высокой частоты. В ранних курсах по радиотехнике еще значительное место занимает электротехническая часть, так как радиотехника пользуется различными стандартными электротехническими устройствами и элементами. Поэтому радиотехнические цепи рассматриваются первоначально как разновидность электротехнических цепей, работающих на токах высокой частоты. В данном случае можно говорить о переносе исходной теоретической схемы и соответствующих ей понятий, представлений и методов анализа из смежной технической теории.

В связи со сказанным выше важно провести различие теоретического и эмпирического уровней технического знания. Эмпирические технические знания включают в себя практико-методические, технологические и конструктивно-технические знания. Первые связаны с деятельностью субъекта по созданию определенного продукта, вторые — это знания о взаимодействии преобразуемого объекта и используемых для этого орудий труда, т. е. в широком смысле — о методах создания артефактов и принципах их применения. Конструктивно-технические знания отражают структурные и функциональные особенности различных конструктивных элементов технического устройства. Теоретический уровень технических знаний (наук) зависит от развития собственно технической теории.

В структуре технической теории, так же как и в естественнонаучной, можно выделить три типа теоретических схем (рис. 2.29):

- 1) *функциональные*, имеющие целью математическое описание;
- 2) *процессуальные*, выделяющие в техническом устройстве протекающие в нем естественные (в особенности физические) процессы, т. е. процессы функционирования;
- 3) *структурные*, представляющие параметры и расчеты конструкции, т. е. структуры этого устройства.

В процессе становления технической теории функциональные схемы строятся на основе исходных теоретических моделей математики, а процессуальные схемы — на базе представлений соответствующей базовой естественнонаучной теории.

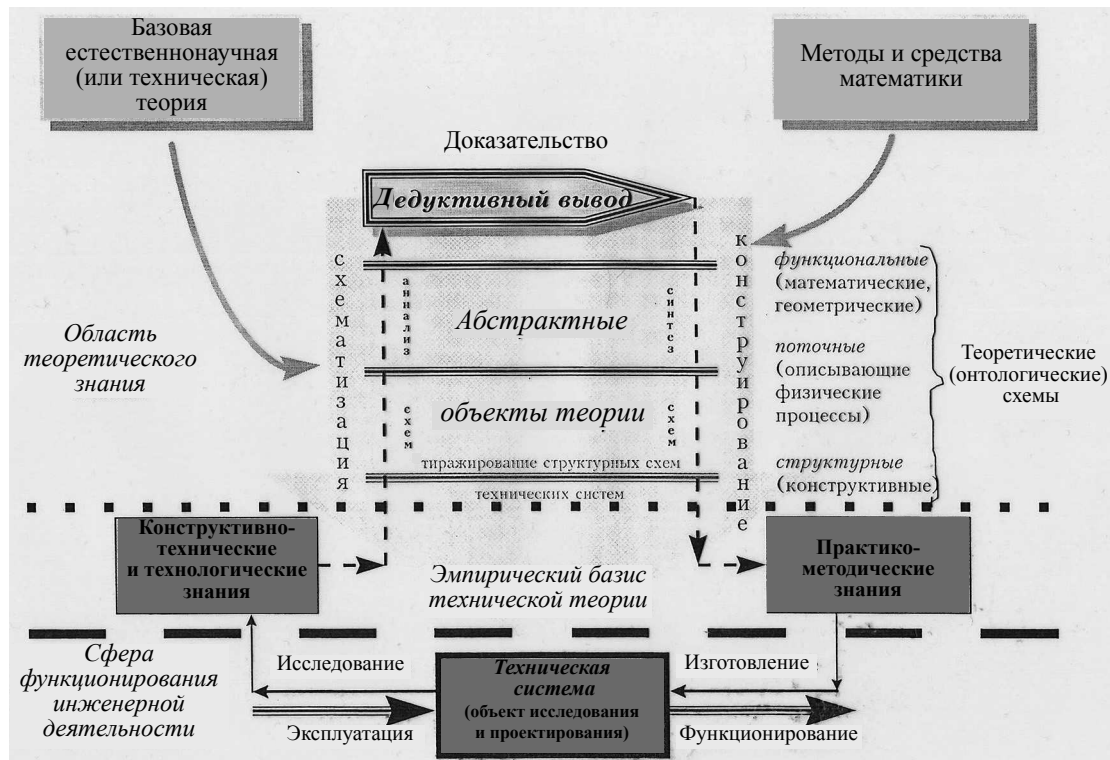


Рис. 2.29. Структура технической теории

Формирование технической теории происходит, как правило, следующим образом. В начале возникает задача создания технического устройства конкретного типа. Прежде всего эта задача представляется в виде определенной структурной схемы, которая затем преобразуется в картину естественного физического процесса, отражающую функционирование этого устройства.

Инженерная задача переформулируется в виде научной проблемы, а затем математической задачи, решаемой дедуктивным путем. Этот путь «снизу вверх» называется анализом схем, а противоположный ему — синтезом схем, который позволяет на базе уже имеющихся конструктивных элементов, точнее соответствующих им идеальных объектов, синтезировать новое техническое устройство (вернее его идеальную модель или теоретическую схему) по определенным правилам дедуктивного преобразования, рассчитать его основные параметры и проимитировать его функционирование. Выработанное на идеальной модели решение затем последовательно переносится на уровень инженерной практики. Главная задача технической теории состоит в разработке разных типов структурных схем для различных (всевозможных) требований и условий. Тем самым заранее теоретически обеспечивается создание соответствующих технических устройств.

Математические модели выполняют в технической теории разные функции, и прежде всего, например, инженерных расчетов. В развитой технической теории эти модели используются для анализа и синтеза теоретических схем. Применение математических методов для верификации идеальных объектов служит саморазвитию технической теории. С помощью манипуляции математическими параметрами получают новые знания о процессах, протекающих в технических устройствах, без обращения к инженерной практике, хотя математические методы в процессе их применения сами претерпевают определенные изменения. Они приспособляются к решению специфических научно-технических задач. Именно таким образом, например, возникло операционное исчисление, развитое первоначально для решения практических инженерных задач и получившее свою совершенную логическую форму значительно позже (подробнее об этом см. разд. 1.3).

Применение математики в рамках проведения инженерных расчетов уже требует определенной идеализации технических систем. Исследователь — представитель технической науки — работает одновременно с теоретическими схемами как физической, так и технической теории, а также с математическими моделями, которые интерпретируются, с одной стороны, с точки зрения их физического смысла, а с другой — с позиций содержания инженерной деятельности. Его собственная деятельность заключается в поиске научного обоснования средств идеального описания стоящих перед ним познавательных задач, которые, однако, выявляются в процессе инженерной деятельности. При этом данная идеализация строится так, чтобы были возможны переходы между слоями теоретических схем, имеющие в конечном счете результатом использование их в расчетах проектировщиков новой техники.

В процессе переработки этой схемы, взятой из электротехники, на основе нового эмпирического материала (иных конструктивных элементов) происходит ее коренное преобразование. Радиотехнические схемы имеют ряд существенных отличий от электротехнических цепей. А это влечет за собой и необходимость изменения их исходной электротехнической модели. Так, для получения токов высокой частоты в радиотехнике стали применяться методы, неизвестные в электротехнике, свободные колебания, не связанные с проводами и совершенно новые приборы и устройства. «Методы измерения силы тока, напряжения и т.д. невозможно было непосредственно заимствовать из тогдашней электротехники. Появлялись совершенно новые устройства новой измерительной техники: измерение частоты или длины волны и логарифмического декремента» [18]. Кроме того, изменяется и масштаб многих электротехнических величин. Радиотехнику приходится учитывать такие величины, которые слишком малы и не представляют интереса при изучении техники медленных изменений электрического

тока. Другими словами: достигается соответствие двух слоев технической теории — поточных (описывающих физические процессы, протекающие в радиотехнических устройствах) и структурных (задающих конструктивно-технические параметры этих устройств) схем.

Параллельно разрабатываются частные теоретические модели, такие как теория усилителей, теория пустотных (ламповых) генераторов переменного тока и т.д., образующие отдельные островки теоретического исследования. Все частные теоретические вопросы, касающиеся конструктивных элементов радиотехнических систем (например, электровакуумных приборов), и более детальное описание конструкции их подсистем (радиоприемников, радиопередатчиков, антенн<sup>1</sup> и др.) постепенно выносятся в специальные курсы. В результате выделились некоторые вопросы, представляющие общий интерес для всякого радиотехнического устройства. Частные теоретические схемы перерабатываются и систематизируются с одновременным их обобщением. «Развитие радиоприемной техники было бы невозможно, если бы оно велось исключительно опытным путем, без широких, обобщающих накопленный опыт и раскрывающих дальнейшие перспективы теоретических исследований. Такие исследования проводились на всех этапах совершенствования приемников...» [44, с. 18]. Это утверждение относится ко всем компонентам и подсистемам радиотехнических систем.

Проблема введения однородных идеальных объектов радиотехнической теории, позволяющих установить соответствие ее функциональной, поточной и структурной схем, на уровне традиционных электротехнических элементов решалась относительно просто.

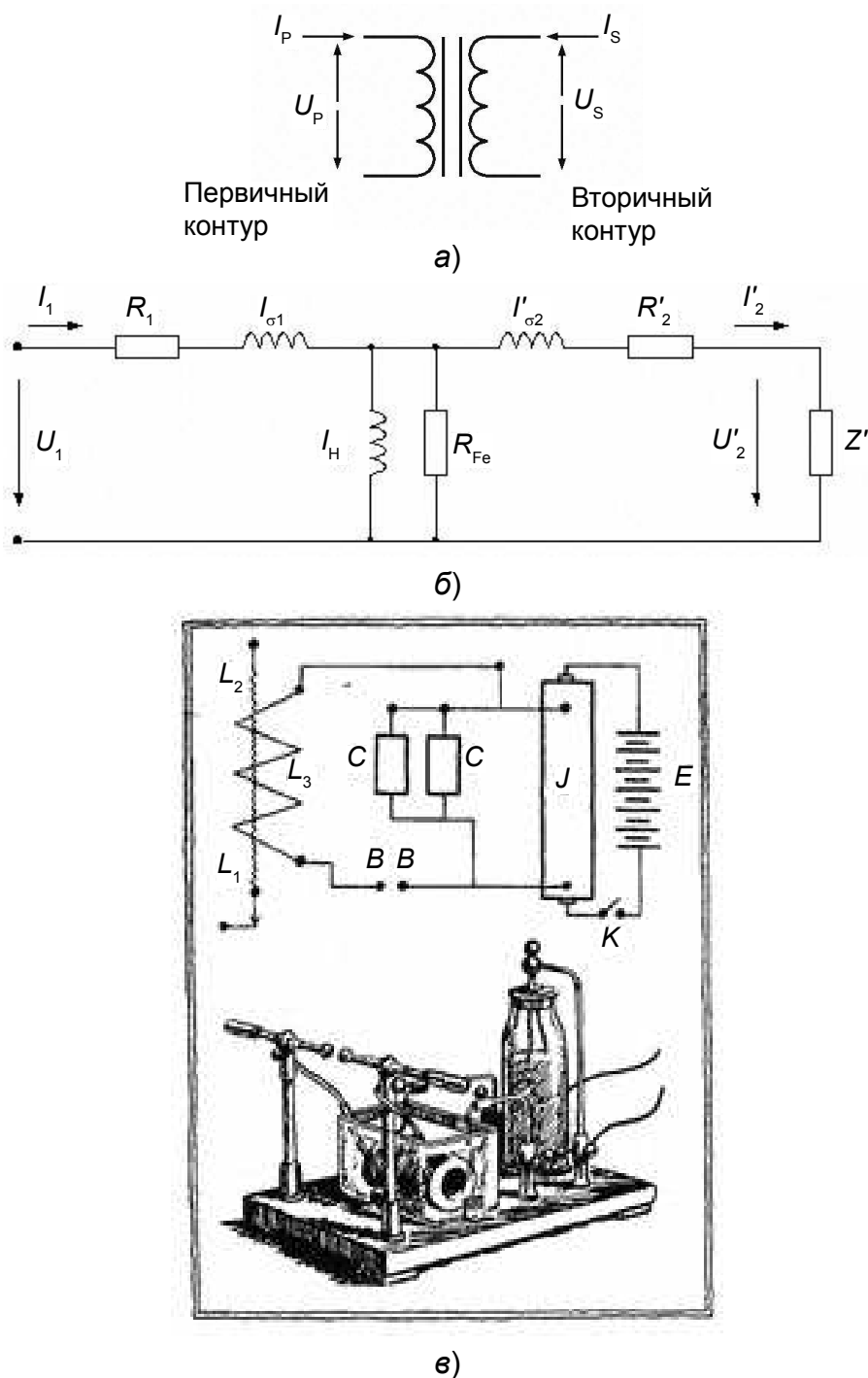
Во-первых, эти элементы (емкости, индуктивности, сопротивления) уже были в электротехнике поставлены в четкое соответствие конструктивным элементам реальных электрических схем (конденсаторы, катушки индуктивности, резисторы). Во-вторых, такая электрическая цепь может быть приведена к оперативному виду с помощью специально разработанных в теории электрических цепей приемов. В ней развиты также особые методы анализа данных цепей.

Рассмотрение радиотехнических систем с точки зрения теории цепей значительно упрощает задачу их исследования, поскольку огромное разнообразие конструктивных элементов, отличающихся своими характеристиками, принципом действия, конструктивным оформлением и т.д., заменялось сравнительно небольшим количеством идеальных элементов и их соединений, представляющих реальные элементы и связи. Любой элемент электротехнической цепи рассма-

---

<sup>1</sup> Уже Браун окончательно определил, что антенна не является пассивным конструктивным элементом [32, s. 138].

тривается как идеальный двухполюсник, действие которого на проходящий через него ток может быть описано линейным уравнением. На рис. 2.30 приведена эквивалентная схема трансформатора.



**Рис. 2.30.** Схема трансформатора (а), его эквивалентная схема (б) и схема включения и внешний вид трансформатора Теслы (в)<sup>1</sup>:

$L_1, L_2$  – первичная и вторичная катушки, помещенные в масло;  
 $J$  – катушка индуктивности;  $I$  – источник тока;  $BB$  – искровой разрядник;  
 $CC$  – лейденские банки (батарея);  $K$  – механический прерыватель

<sup>1</sup> Tesla-Transformer – <http://de.wikipedia.org/wiki/Tesla-Transformer>

Трансформатор представляет собой преобразователь тока и/или напряжения, который в простейшем случае состоит из двух обмоток, а именно первичной и вторичной, часто с железным сердечником. Только снабжение первичной обмотки трансформатора с переменным напряжением электрического тока может индуцировать (создать) напряжение во вторичной обмотке. Принцип действия трансформатора Теслы, предназначенного для создания переменных токов высокой частоты и напряжения, базируется на законе резонанса в форме колебательного контура. Целью Николы Тесла (1856–1943) было создать устройство для беспроводной передачи энергии. В 1897 г. он получил в Нью Йорке патент на «электрический преобразователь»<sup>1</sup>.

Несколько сложнее обстоит дело с так называемыми нелинейными элементами радиотехнических цепей (например, радиолампами). Но и они, после описания их соответствующими эквивалентными схемами, содержащими уже только линейные элементы, могут быть рассчитаны с помощью традиционных электротехнических методов. Исходную схему включения триода (рис. 2.31, в) с символическим обозначением электронной лампы можно заменить для проведения расчетов эквивалентной схемой с эквивалентным сопротивлением и эквивалентным источником тока (рис. 2.31, а) или же эквивалентным источником напряжения (рис. 2.31, б).

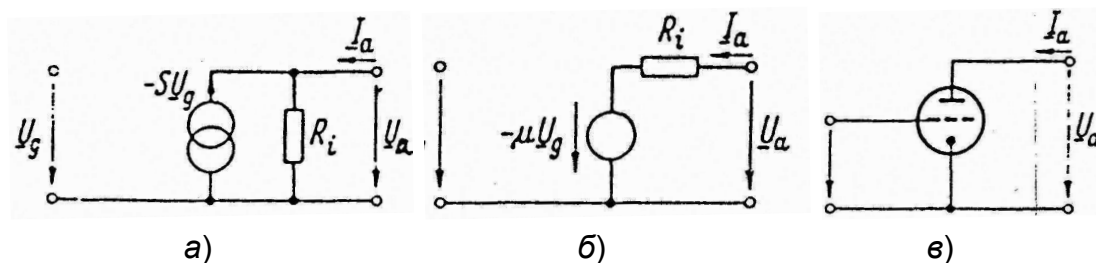


Рис. 2.31. Схема замещения четырехполюсника<sup>2</sup>

К началу 1920-х гг. телеграфия без проводов, где ранее преобладали интуиция и искусство, превратилась в инженерную дисциплину, покоящуюся на твердом фундаменте технических расчетов и проектирования. В электрической телеграфии используются по сравнению с силовой электротехникой лишь слабые электрические токи и низкие напряжения. Тем не менее многие знания относительно распространения электрического тока остаются в обеих этих областях аналогичными... [45, s. 12]. В дополнение к этому разрабатываются новые методы и теории, например теория электрических

<sup>1</sup> Там же.

<sup>2</sup> Steinbuch K., Rupprecht W. Nachrichtentechnik. Eine einführende Darstellung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1973, s. 113.

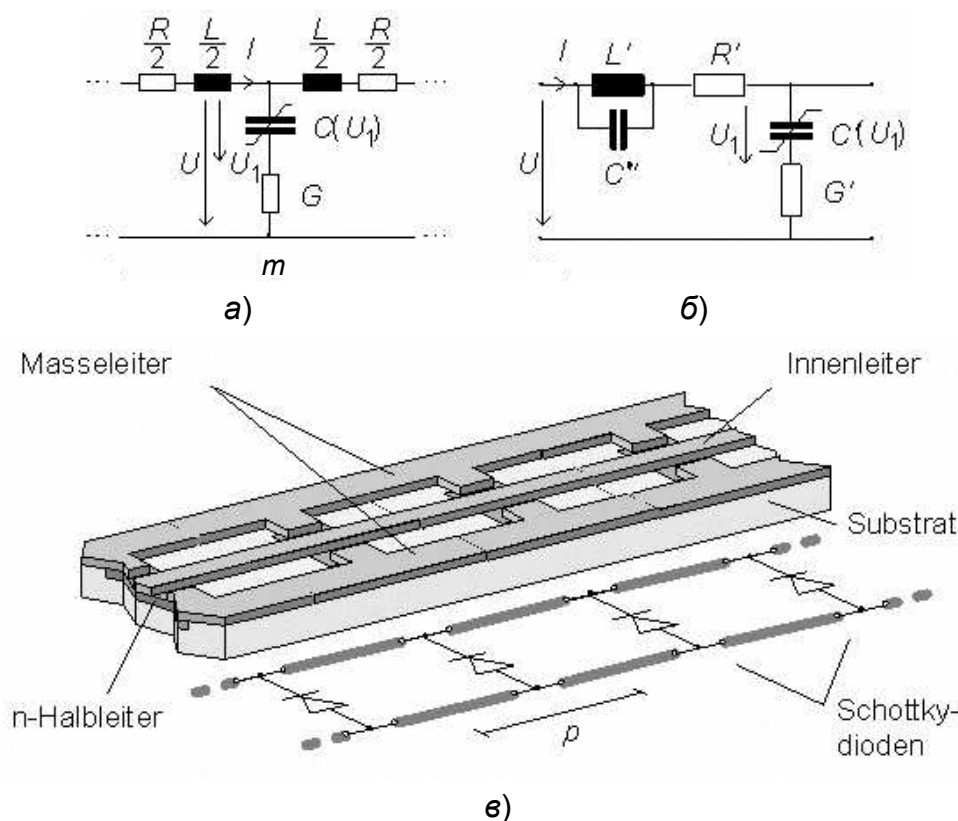
цепей. «Доминирующая до конца XIX столетия сильноточная электротехника (машиностроительный период развития электротехники) была в основном ориентирована на практический опыт и поэтому не могла решающим образом помочь развитию теории электрических цепей... Впервые в начале нашего столетия быстро развивающаяся слаботочная электротехника (телефонии и беспроводной телеграфии) дала решающий импульс становлению самостоятельной теории электрических цепей и стала в этом виде исходным пунктом для многочисленных математических подходов» [46, s. 26].

В радиотехнических системах постепенно выделились качественно иные, нежели в электротехнике, конструктивные блоки-подсистемы: колебательные и связанные контуры, фильтрующие цепи, усилители низкой, промежуточной и высокой частоты, модуляторы, детекторы, мультивибраторы, генераторы, ограничители, линии задержки и др. Эти конструктивные блоки, однако, могут иметь различную физическую основу, не обязательно сводимую к электротехническим элементам. Вокруг каждого такого блока группируются особые теоретические знания. Другими словами, эти блоки сами представляют собой различные частные теоретические схемы, являющиеся, в свою очередь, обобщением конструктивных схем конкретных радиотехнических устройств. Например, главное свойство дроссельных фильтров (низких частот) и фильтров верхних частот — «явно выраженное предпочтение или подавление определенных диапазонов частот. Именно поэтому их называют “сепараторами”, или “фильтрами”».

Вагнер выделил четыре основных типа фильтров: нижних частот, верхних частот, полосовой фильтр и полосовой заграждающий фильтр. Кэмпбелл независимо от Вагнера пришел к аналогичным результатам, но опубликовал их лишь в 1922 г. Частотные соотношения этих цепей, состоящих из катушек индуктивности и конденсаторов (реактивных четырехполюсников), могут быть рассчитаны с помощью теории Вагнера. Проведенный при этом “анализ электрических цепей” был настолько успешным, что стал применяться для расчета акустических и других механических колебательных систем. В то время как техника связи еще несколько десятилетий прежде должна была заимствовать аналогии из других научно-технических дисциплин, теперь ее теоретический аппарат настолько расширился, что она смогла возратить полученное с процентами» [47, s. 393]. Все эти блоки радиотехнических систем могут быть исследованы едиными методами в специально развитой для этого теории четырехполюсников.



Монолитную, или твердотельную, схему, которая в действительности изготавливается как единый блок с помощью планарной технологии, можно теоретически представить как электронную схему (четыреполюсник), состоящую, например, из резисторов и конденсаторов, т. е. двухполюсников (рис. 2.32, *а* и *б*).



**Рис.2.32.** Конструктивный блок радиотехнического устройства и его реализация в виде интегральной схемы: схемы замещения нелинейной линии передачи с дискретными (*а*) и распределенными (*б*) элементами; конструирование нелинейной линии передачи с помощью интегральной схемы (*в*)

Модель на рис. 2.32 представляет собой схематическое описание «в форме соответствующей схемы замещения». На рис. 2.32, *а* представлена дискретная схема замещения «сначала для длины  $p$ » (рис. 2.32, *в*). «В данном случае индуктивность и омические потери цепи электрического тока высокой частоты учитываются с помощью введения элементов  $L$  и  $R$  и за счет непроводимости диода в одном направлении для рассматриваемой полосы высоких частот через последовательное включение зависимой от напряжения емкости перехода  $C(U)$  и электронной проводимости  $G$ . Периодическая нелинейная линия передачи в целом (рис. 2.32, *в*) представляется, таким образом, с помощью цепочки нескольких таких схем замещения, которые также обозначают как ячейки», что на рис. 2.32, *а* показано пунктиром.

«При пренебрежении резисторными элементами зацикливание подобных ячеек (с чередованием последовательного и параллельного включения ветвей) приводит к схеме замещения в форме многозвенной  $LC$ -цепи с характеристикой фильтра нижних частот.

Для вывода волнового уравнения примененной здесь модели прием теперь, что при распространении волн по нелинейной линии передачи длина любых появляющихся в ней волн является достаточно большой по сравнению с длиной периода  $p$ » (рис. 2.32, *в*). Тогда схема замещения с распределенными элементами на рис. 2.32, *б* «будет полезной для описания нелинейного распространения волн по всей нелинейной линии передачи. На этой схеме замещения описываются с помощью индуктивности, последовательно включенного резистора, а также зависимой от напряжения емкости перехода и электронной проводимости проводника через соответствующие проводящие пластины» [48].

В теории четырехполюсников многочисленные частные схемы приводятся к одной обобщенной схеме — четырехполюснику. Теория исследования схем с включенными в них пассивными элементами (сопротивлениями, конденсаторами, катушками индуктивности, трансформаторами) была наиболее разработанной. «Соотношения между силой тока и напряжением в какой-либо электрической цепи, состоящей из сопротивлений с двумя входами и двумя выходами (так называемый четырехполюсник), могут быть определены с помощью... правил, установленных Робертом Кирхгофом и Германом фон Гельмгольцем». Позже они были распространены на технику переменного тока. «Тем самым стали принципиально возможными расчеты электрических цепей, содержащих не только сопротивления, но и конденсаторы (емкости) и катушки индуктивности (индуктивности)» [47, s. 392–393]. Их зачастую стали называть соответственно емкостными и индуктивными сопротивлениями в отличие от омического сопротивления. Все эти три вида сопротивления образуют так называемое комплексное сопротивление.

Любой проводник (например, кусок медной проволоки) может быть представлен на эквивалентной схеме для цепи постоянного тока омическим сопротивлением. Для цепи переменного тока низкой частоты к нему должно быть добавлено индуктивное сопротивление, а для переменного тока высокой частоты — еще и емкостное сопротивление.

В русском языке термин «сопротивление» (или «эквивалентное сопротивление») означает в первую очередь идеализированный элемент (абстрактный объект технической теории — физическую величину) идеализированной электрической цепи (поточной схемы),

в отличие от «сопротивления» как конструктивного элемента (радиодетали) реальной электрической цепи (структурной, или конструктивной схемы), называемого «резистором» (от англ. *resistor*).

Таким образом, одна и та же реальная электрическая цепь, состоящая из резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности, соединенных между собой проводочными проводами, может быть представлена для разных режимов функционирования этой электрической цепи различными эквивалентными схемами. Для постоянного тока достаточно представить ее в виде (поточной) эквивалентной схемы — схемы замещения, состоящей только из омических сопротивлений. Для переменного тока низкой частоты к ним добавляются индуктивные сопротивления, а на высокой частоте следует учитывать и емкостное сопротивление данной цепи.

Это, однако, пока еще анализ схем. Техническая же теория только тогда может считаться построенной, если в ней становится возможным также синтез схем — создание нового технического устройства на основе имеющихся конструктивных элементов. Очень важно теоретически рассчитать основные параметры нового технического устройства и проимитировать его функционирование.

Радиотехническая система может быть представлена в виде цепочки блоков, каждый из которых преобразует один из параметров электромагнитных колебаний. К таким блокам относятся: генератор (преобразует какой-либо вид энергии в электромагнитные колебания), модулятор (позволяет изменять соответствующую характеристику электромагнитного колебания по определенному закону, например амплитуду, частоту или фазу), фильтр (отфильтровывающий помехи), усилитель (устройство, увеличивающее колебания только по амплитуде, их фазовые и частотные соотношения должны передаваться без изменений) и т. д.

В теории четырехполюсников разрабатывается специальный математический аппарат, основанный на матричном исчислении, доказываются специальные теоремы, анализируются различные типы четырехполюсников, даются их обобщенные уравнения и параметры. Теория четырехполюсников дает возможность осуществлять анализ и синтез различных многокаскадных радиотехнических устройств на теоретическом уровне и при этом транслировать на уровень инженерной деятельности важнейшие результаты.

Таким образом, в теоретической радиотехнике динамическая физическая картина электромагнитных взаимодействий (колебаний, волн, полей) совмещается со структурным изображением радиотехнических систем, в которых эти естественные (в данном случае физические, точнее электродинамические) процессы протекают и ис-

кусственно поддерживаются. Именно их органическое сочетание и образует обобщенную теоретическую схему технической науки.

Формирование теоретической радиотехники идет по двум основным направлениям: во-первых, развития и конкретизации теоретической схемы электромагнитных взаимодействий, развитой на базе естественнонаучной теории (электродинамики), путем заполнения диапазона практически используемых радиоволн с одновременным развитием методов исследования их физических свойств и, во-вторых, обобщения частных теоретических моделей, возникших в результате анализа конструкций различных радиотехнических систем в процессе решения конкретных инженерных задач.

На первых этапах своего развития радиотехника отличалась скорее описательными, чем расчетными методами исследования. Однако о появлении технической науки можно говорить в полной мере лишь тогда, когда построена математизированная техническая теория. В ней должны быть выработаны процедуры перехода от структурных теоретических схем к «процессуальным» и функциональным схемам и обратно (другими словами, процедуры анализа и синтеза). Только после того, как в технической науке заданы процедуры теоретического синтеза технических систем, которые позволяют распространить полученные теоретические результаты на целый класс гипотетических технических систем (с возможностью выработки на их основе практических методических рекомендаций для еще неосуществленной инженерной деятельности), построенная обобщенная теоретическая схема может рассматриваться как универсальная относительно данного класса технических систем. Другими словами, именно тогда она получает статус «универсальной» теоретической схемы определенной научно-технической дисциплины (точнее «семейства» такого рода дисциплин) и соответствующего им вида инженерной деятельности.

Развитие телеграфии без проводов происходило с 1895 по 1905 г. эмпирически. Ф. Браун, который был сторонником развития университетской технической науки, пытался открыть в Страсбургском университете технический факультет. Он считал, что с открытием этого факультета при поддержке нескольких успешно работающих электротехнических предприятий вне его можно развить экспериментальную и педагогическую практику как новую техническую науку, которую еще предстоит создать, с ясно определенными целями и содержанием обучения. Он ориентировался не на теорию, а на необходимость технических применений и разработал программу модернизации физики как технической физики. К сожалению, этому проекту не было суждено осуществиться. Техническая физика вела

в университетах лишь своего рода теневое существование, хотя большинство физиков и работало в области техники [32].

Эти идеи, однако, оказали влияние не только в Германии, но и в России. Ближайшие сотрудники Брауна из России Л.И. Мандельштам и Н.Д. Папалекси стали развивать радиотехнику в России в духе идей Фердинанда Брауна.

Л.И. Мандельштам учился на физико-математическом факультете Новороссийского университета в России, но из-за участия в студенческих волнениях вынужден был продолжить свое образование в Страсбурге, которое закончил в 1902 г. В 1902 г. Мандельштам защитил у Брауна кандидатскую диссертацию, а в зимнем семестре 1906/1907 гг. получил докторскую степень. Изучая колебания в электрическом контуре, он открыл принципы слабых взаимодействий, которые до сегодняшнего дня являются весьма важными для радиотехники. В течение десяти лет Мандельштам был ассистентом Брауна. Он также работал несколько недель на почте и в лаборатории фирмы «Сименс», чтобы изучить технику связи и телеграфии, а в 1911 г. получил постоянное место преподавателя прикладной физики. Позже ему было присвоено звание профессора.

Н.Д. Папалекси происходил из богатой семьи русского помещика в Крыму, так что у него не было необходимости работать в Страсбурге, чтобы обеспечить себе пропитание. Он защитил кандидатскую диссертацию в 1904 г., а докторскую — в 1911 г. Затем работал приват-доцентом у Брауна. В начале Первой мировой войны Мандельштам и Папалекси вынуждены были, однако, как российские граждане покинуть Германию. В 1914 г. они возвратились обратно в Россию, с 1923 г. работали вместе в научном отделе Центральной радиолаборатории Электротехнического треста заводов слабого тока в Ленинграде. С 1924 г. Л.И. Мандельштам стал заведовать кафедрой теоретической физики в Московском университете. Папалекси оставался сначала в Ленинграде, также как профессор Политехнического университета, а с 1934 г. перешел на работу в Физический институт (и, кроме того, в Электротехнический институт) Российской академии наук. В 1937 г. Мандельштам также перешел на работу в Физический институт, где проводил исследования в области оптики, радиофизики, радиотехники и теоретической физики (часто совместно с Папалекси). Мандельштам и Папалекси были избраны действительными членами Российской академии наук [49, с. 932–340].

Еще работая в Страсбургском университете под руководством Брауна, Мандельштам и Папалекси начинают работу по совершенствованию структурных схем радиопередающего и радиоприемного устройств в рамках радиотехнической теории. В 1913 г. Мандельштам

и Папалекси подали патентную заявку на усовершенствование схемы двухконтурного передатчика Брауна с целью устранения тех потерь энергии, которую несет искра. В своей схеме (1913 г.) Мандельштам и Папалекси объединили идею Вина об «отключении» искры и идею Брауна о последовательном соединении конденсаторных контуров. У них отключение происходило за счет не малости разрядного промежутка и слабости тока в первичном контуре, а конструкции цепи и подбора ее параметров.

В одной из своих статей Мандельштам выдвинул единую теорию различных модификаций передатчика Брауна. Он предложил не только обобщенную математическую структуру системы, представив антенну (открытый контур) в виде последовательности  $m$  замкнутых контуров, включающей контур, который непосредственно индуктивно связан с первичным замкнутым контуром, но и составил соответствующую систему дифференциальных уравнений. Мандельштам в духе математической физики предложил моделировать антенну как систему с большим числом степеней свободы. Далее он пришел к выводу, что «система с автотрансформаторной связью<sup>1</sup>, если принять омическое сопротивление в ней малым, описывается той же системой дифференциальных уравнений, что и система с индуктивной связью» [50, с. 68–71]. Такие рейды от структурных схем конкретных технических устройств к обобщенным структурным математическим схемам и знаменуют начало становления радиотехнической теории.

Теоретические исследования в радиотехнике исходили первоначально из экспериментальных работ Герца и все время опережали практику. Теоретическая систематизация появляющихся новых результатов становится безотлагательно необходимой тогда, когда возникает потребность обучения нового поколения инженеров. «Частичные проблемы, которые были решены к концу первых десятилетий развития техники телефонной связи и техники высоких частот, как кажется на первый взгляд, были мало внутренне взаимосвязаны. Поэтому Франц Брейзиг поставил перед собой в 1910 г. задачу попытаться эти многочисленные вопросы рассмотреть на единой базе уравнений Максвелла. Свою книгу “Теоретическая телеграфия” он начал с общих основ теоретической электротехники, вывел из них следствия для проблем телефонии и телеграфии и в конце задал перспективу теоретической радиотехники. Книга Брейзига ясно показывает, что проводная телефония и телеграфия, так же как молодая радиотехника, выдвинули многочисленные технические вопросы, разрушили математически обоснованные решения, взорвали

---

<sup>1</sup> Автотрансформатор — трансформатор, у которого первичная обмотка является продолжением вторичной.

рамки физических представлений. Он впервые указал на расширение телеграфии (как синонима “слаботочной техники”, т. е. техники связи) в техническую науку» [47, с. 318].

В России в 1907 г. в Санкт-Петербурге выходит в свет первое издание «Научных основ беспроволочной телеграфии» А.А. Петровского. Во втором ее издании в 1913 г. под тем же название Петровский приводит уже точные математические представления также и для решения инженерных задач. Он пишет в этой книге, что «радиотелеграфия превратилась в новую научную дисциплину, которая занимается приложением электричества и магнетизма к практике» [51, с. 1]. В 1901 г. в качестве преподавателя и руководителя кафедры физики в Санкт-Петербургский политехнический институт, который в 1886 г. был основан в качестве Высшего технического училища почтово-телеграфного ведомства, был приглашен А.С. Попов. В 1902–1903 гг. он прочитал там спецкурс «Телеграфирование без проводов». После смерти Попова этот курс продолжил читать его ученик А.А. Петровский. В 1917 г. кафедру радиотехники в этом институте создал и возглавил профессор И.Т. Фрейман, также ученик Попова. Им изданы первые учебники по радиотехнике: «Краткий очерк основ радиотехники» и «Общий курс радиотехники» (1-е изд. — 1924 г., 2-е изд. — 1928 г.).

В 1907–1908 гг. было основано Общество беспроволочной телеграфии, в 1913 г. в США выходит в свет первый ежемесячный журнал *Proceedings IRE* (IRE — Институт радиоинженеров). В Германии в 1970 г. выходит «Журнал слаботочной техники», а в 1908 г. появляется «Ежегодник беспроволочной телеграфии и телефонии».

В германских высших технических школах техника слабых токов была представлена явно недостаточно. В 1911 г. в этом вопросе произошел перелом — Высшая техническая школа г. Дрездена образовала самостоятельный Институт слаботочной техники. Возглавил его Генрих Бакхаузен<sup>1</sup>. Другие высшие технические школы последовали этому примеру. В том же 1911 г. был основан радиотехнический журнал «Телеграфная техника и техника связи».

Подводя итог, можно констатировать, что к 1914 г. закончился период становления техники связи как технической науки [47, с. 320].

---

<sup>1</sup> «Бакхаузен построил преподавание и книгу по следующей схеме: “Теория радиоламп” и “Теория переключателей”. Первая теория может быть обозначена как основание современной электроники, а вторая внесла большой вклад в теорию двухполюсников» (см.: *Börner H. Georg Heinrich Backhausen (1881–1956). Lehrer der wissenschaftlichen Nachrichtentechnik // Lebensbilder von Ingenieurwissenschaftlern. Eine Sammlung von Biographien aus zwei Jahrhunderten. G. Buchheim, R. Sonnemann (Hg.). Basel; Boston; Berlin: Birkhäuser, 1989, s. 186–189).*

\* \* \*

Изложенная выше история теоретической радиотехники представляет собой образцовый пример (исторический идеальный тип) того способа формирования технической теории, когда исходным пунктом, с одной стороны, развития новой техники и отрасли промышленности, а с другой — технической теории и научно-технической дисциплины является взаимодействие естественнонаучной теории и эксперимента в физике. Это взаимодействие дало мощный импульс для разработки радиотехнической теории, без которой было бы немыслимо решение современных инженерных задач, например по расчету и проектированию нелинейных радиотехнических систем. Современная теория нелинейных радиотехнических систем и методика их исследования созданы академиками Л.И. Мандельштамом и Н.Д. Папалекси, а также учеными их школы. Эта теория позволяет с большой глубиной исследовать и рассчитывать весьма сложные явления, происходящие в таких элементах приемников, как регенераторы и сверхрегенераторы, регенеративные фильтры, многие элементы современной радиолокационной аппаратуры и др. Кроме того, проводились фундаментальные исследования распространения радиоволн от передатчика к приемнику и процессов, происходящих в самих радиотехнических системах (в резонансных системах при приеме коротких импульсов, при преобразовании частоты в супергетеродинных приемниках и т. д.), учитывающих освоение практической радиотехникой новых диапазонов радиоволн.

Именно трудам ученых радиотехника обязана и разработкой теории таких вопросов, как помехи радиоприему, автоматические регулировки в приемниках, прием частотно-модулированных и импульсно-модулированных колебаний, прием на одной боковой полосе и многих других. Это было дальнейшим разворачиванием и спецификацией электродинамической картины мира и требовало именно теоретических исследований для ответа на сложные вопросы, которые ставила радиотехническая практика. Были построены теория антенн, без которой было бы невозможно создание таких новых типов антенн, как, например, фазированная антенная решетка (с управляемыми фазовыми сдвигами радиоволн, расчет которых требовал разработки новых теоретических методов) [44, с. 18–19].

Инженерная практика ставила все новые вопросы перед теоретиками радиотехники, поскольку без теоретических исследований практические проблемы просто невозможно было решить, например при



переходе к использованию новых диапазонов радиоволн и созданию новой радиоэлектронной аппаратуры. «Различие между входными цепями приемников длинных волн и приемников ультравысоких частот заключается не только в конструктивных и схемных решениях, но и в тех принципах, которые положены в основу выполнения всей системы в целом» [44, с. 250]. То же самое можно сказать о переходе на новую элементную базу. Внедрение в радиоэлектронику электронных ламп, затем полупроводниковых элементов (например, транзисторов) и твердотельных схем, а в последнее время наноэлектроники всегда сопровождалось не только построением новой теории этих элементов<sup>1</sup>, но и разработкой новых методов анализа и синтеза теоретических схем, построенных на соответствующей элементной базе. Теоретические исследования также должны были учитывать конструктивные особенности различных радиотехнических устройств, их элементов и схем. Например, переход к молекулярной электронике потребовал развития трех направлений: фундаментальных исследований в области квантовой физики в наноразмерном диапазоне, построения архитектуры чипов нового типа, позволяющей наиболее эффективно использовать возможности наноэлектроники, и, конечно, разработки методов дешевого массового производства наноэлектронных компонентов [52, с. 81].

Дальнейшее ее развитие шло по пути: во-первых, освоения новых диапазонов электромагнитных волн и связанных с ними режимов функционирования радиотехнических систем; во-вторых, исследования и проектирования новых структурных реализаций в направлении микроминиатюризации радиотехнических систем и их элементной базы; в-третьих, изучения и использования в радиоэлектронике новых, в том числе неклассических, представлений и процессов. Первое и последнее связаны с развитием радиолокации сначала как нового исследовательского направления в рамках радиотехники, а затем как самостоятельной научно-технической дисциплины и технической теории, а первое и второе — с развитием нанотехнонауки.

---

<sup>1</sup> Например, в электронной лампе рассматриваются полет электронов в свободном пространстве между катодом и анодом и влияние на него сетки, а не движение электрического тока в проводнике или распределение магнитных и силовых линий. Таким образом, здесь скорее применима альтернативная электродинамике Фарадея — Максвелла — Герца теория, где работают ньютоновские принципы дальнего действия. Инженерная практика выдвинула требование стыковки теоретически казалось бы несовместимых картин физической реальности.

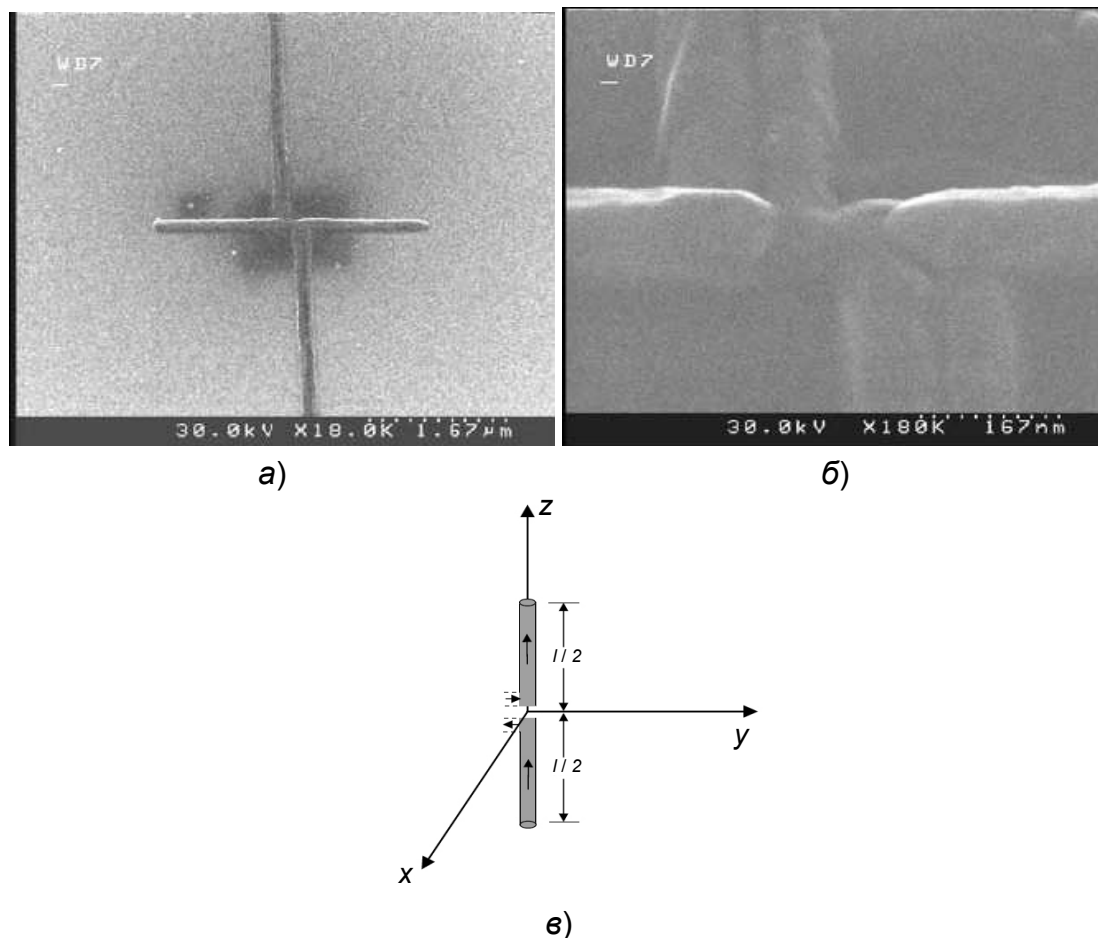
### 2.2.6. Нанотехнонаука как наноэлектроника

Наносистемы могут быть рассмотрены как особые вариации электронных цепей, например, как наноэлектрические переключатели в наносхемах. Поэтому в нанотехнологии часто определяют наносистему как наносхему, состоящую из стандартных элементов: «Нанотехнологические конструкции являются подражанием традиционным электронным компонентам (переключателям, диодам, транзисторам и т.д.) на наноуровне. Одна из главных целей такого рода усилий — открыть новые измерения для обработки данных, а именно с помощью запоминания больших объемов информации на наивозможно маленьком пространстве... В силу срединного положения наношкалы его также называют “мезомир”» [53, р. 77–96].

В структуре наносхем мы можем обнаружить традиционные электронные компоненты (электронные компоненты на молекулярном уровне) различного типа реализации на основе нанотехнологий. Это такие электронные блоки, как, например, антенна (испускает излучаемую мощность в виде узкого луча с максимальным коэффициентом передачи и получает отраженный от цели сигнал) или модулятор (обеспечивающий работу передатчика в точные и периодически повторяющиеся промежутки времени) [54].

***Миниатюрная антенна на микро- и наноуровне.*** Речь в данном случае идет о наноантенных датчиках в диапазонах видимых и инфракрасных волн: «Чтобы детектировать электромагнитное излучение, необходимы два базисных элемента: 1) физическая структура, которая эффективно соединена с излучением — антенной, и 2) выпрямительный элемент, конвертирующий высокочастотный сигнал переменного тока в низкочастотный сигнал, который может быть детектирован электронными средствами.

Антенные устройства и выпрямляющие диоды применяются для передачи радиоволн, телевизионных сигналов и т.д. В данной работе показано, что миниатюрная антенна на уровнях микро- и нанометровой шкал может резонировать с излучениями инфракрасного и видимого диапазонов и быть интегрирована с выпрямляющим “металл — оксид — металл” диодом (МОМ-диодом). Датчик состоит из МОМ-диода и объединенной с ним симметричной вибраторной антенны. Мы создаем устройства с помощью одношаговой электронно-лучевой литографии, комбинированной с напылением и оксидированием (схематически показано на рис. 2.33, а). Электронный снимок типичного антенного диода показан на рис. 2.33, б» [55, р. 133–138].

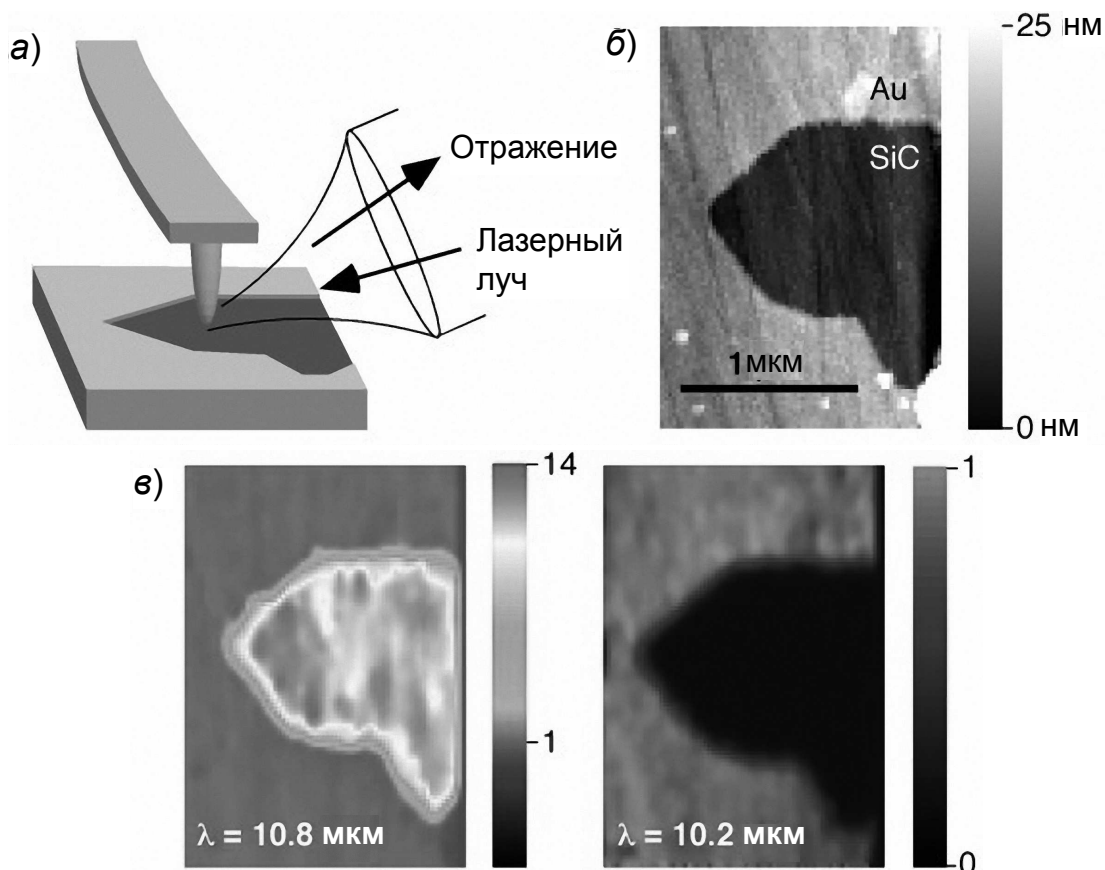


**Рис. 2.33.** Схематическое изображение процесса напыления (а); двойная с антенной МОМ-структура (б)<sup>1</sup>; геометрическое изображение наноантенны (в) [56]

На рис. 2.34 изображена наноантенна в инфракрасном диапазоне.

**Кремниевый электрооптический модулятор микрометровой шкалы.** «Большое количество нашей электроники скоро сможет быть заменено фотоникой, в которой световой луч, быстро движущийся через микроскопические каналы на кремниевом чипе, заменяет электроны в проводниках. Фотонные чипы будут переносить больше данных, потребляют меньше энергии и работают без помех с волоконно-оптическими коммуникационными системами. Проблема заключается в том, чтобы “склонить” электронику и фотонику к “диалогу”...»

<sup>1</sup> Важная особенность таких соединенных с антенной МОМ-детекторов состоит в том, что они могут быть естественным образом интегрированы с кремниевой схемой в одном и том же чипе, поскольку все этапы фабрикации являются совместимыми. Это открывает возможность встраивать эти детекторы непосредственно внутрь каждого элементарного процессора регулярной структуры без тех узких мест, когда считывание и обработка должны быть расположены на отдельных платформах [55].



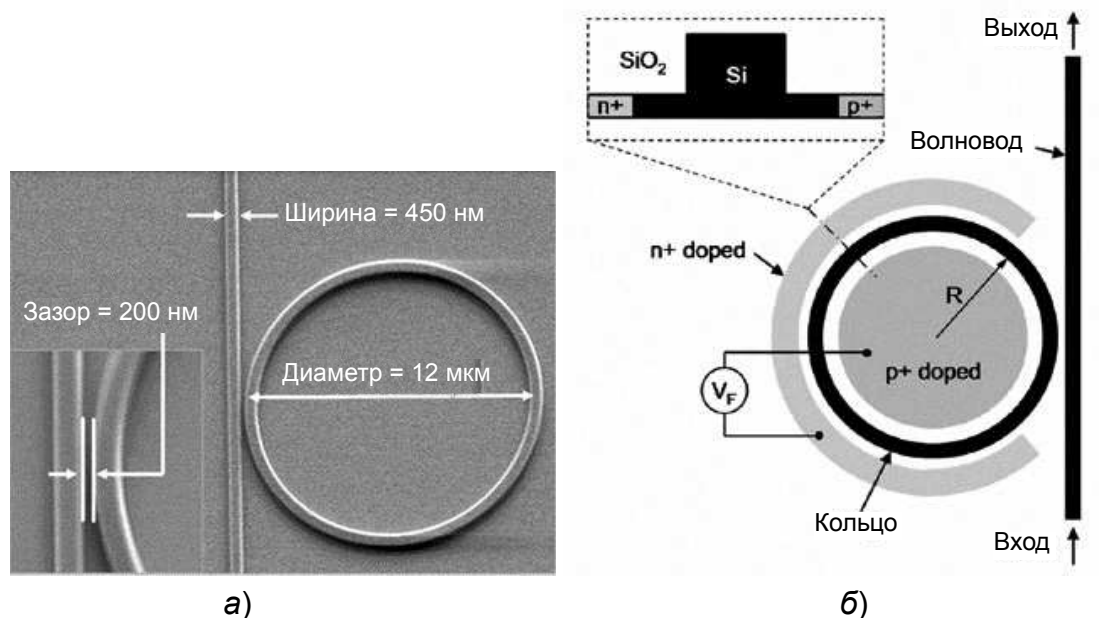
**Рис.2.34.** Наноантенна в инфракрасном диапазоне. Изображение вибраций кристалла: *а* – схема воспроизводящей иглы и исходящего от нее лазерного излучения (стрелки указывают на то, что инфракрасный лазерный луч фокусируется на излучающей игле и значительно усиливает отражение); *б* – топографическое изображение;

*в* – изображение инфракрасного ближнего поля при резонансе и без него (цветовая шкала кодирует амплитуду сигнала). Фотонный резонанс у карбида кремния SiC (карборунда) происходит при длине волны 10,8 мкм, создавая усиление яркости, которая становится сравнимой с блеском золота. При длине волны 10,2 мкм контрастность изображения обращается и золото отражает сильнее, чем карборунд<sup>1</sup>

Ученые Корнельского университета сделали недавно важный шаг вперед в преодолении этого коммуникационного разрыва в разработке кремниевых устройств, которое использует электрический сигнал для модулирования светового излучения на микрометровом уровне. «В модуляторе применяется кольцевой резонатор – круглый волновод, соединенный с прямым волноводом, несущим модулированный световой луч. Свет, двигаясь вдоль прямого волновода, делает петлю много раз вокруг круглого волновода до обработки... Это кольцо окружено внешним кольцом из негативно легированного

<sup>1</sup> <http://idw-online.de/pages/de/news50711>

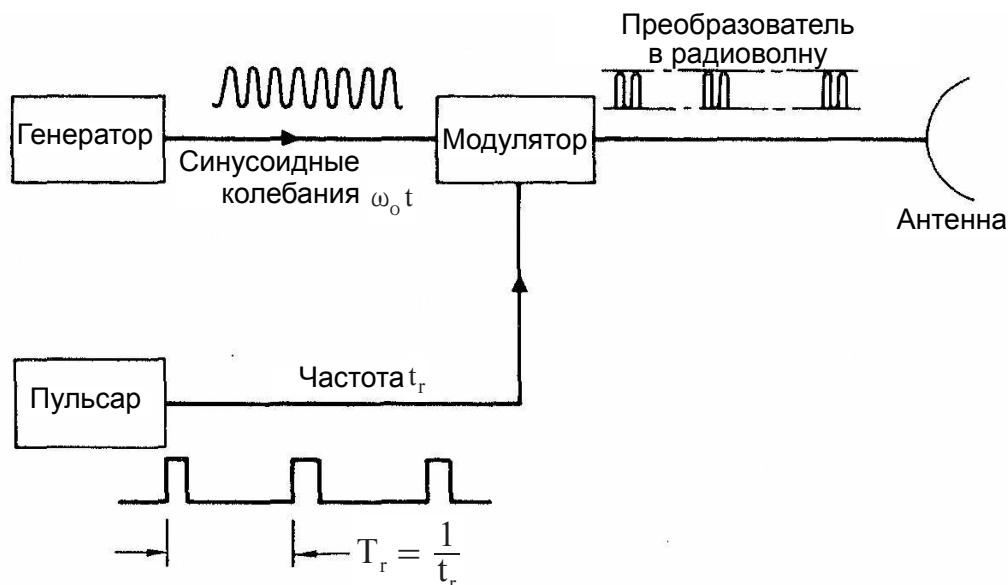
кремния, а область внутри кольца является позитивно легированной, делая сам волновод внутренней областью собственной электропроводности регулируемого резистивного диода... Вследствие того что свет движется многократно вокруг круглого резонатора, небольшие изменения имеют большой эффект, делая возможным построение весьма малого устройства» (рис. 2,35) [57].



**Рис. 2.35.** Изображение кольца, сдвоенного с волноводом, полученное электронным сканирующим микроскопом с изображением в увеличенном масштабе зоны соединения, (а) и схема кольцевого резонатора как основы модулятора (б). Вставка показывает поперечное сечение кольца [56]

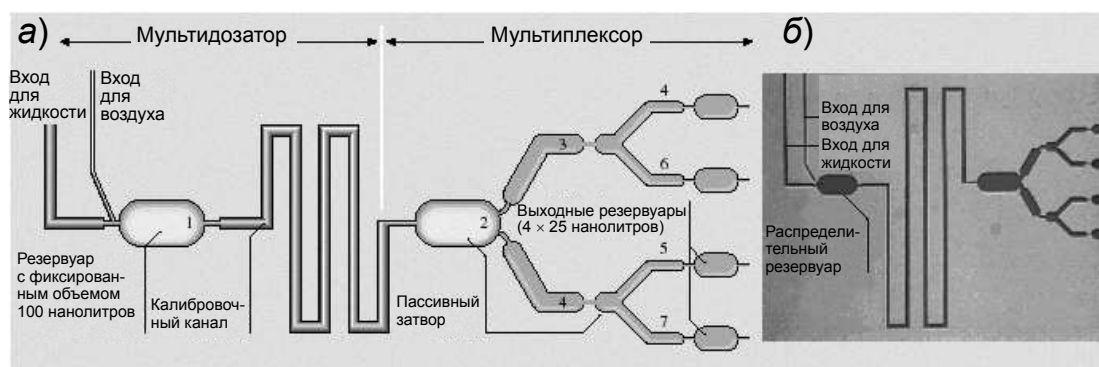
В радиоэлектронике модулятор выполняет роль кодирующего устройства, которое изменяет частоту сигнала в соответствии с заданными параметрами для передачи сообщения. В радиолокации модулятор продуцирует импульсы регулируемой длительности, которые повторяются через точные интервалы времени, задаваемые синхронизирующим устройством, и используются для того, чтобы включать и выключать передатчик в заданные интервалы времени. Это необходимо для того, чтобы была возможность принимать отраженный от цели сигнал в интервале времени, когда передатчик не работает (рис. 2.36).

**Нанотехнология создания электронных схем.** Речь идет фактически о создании молекулярного вычислительного устройства: эта система была вставлена в программируемый струйный микроэлемент (в отличие от обычных твердотельных элементов современной электроники). Появление программируемых струйных микросистем открывает возможность для создания систем, аналогичных электронным компьютерам или иным радиоэлектронным системам.



**Рис. 2.36.** Схема, поясняющая работу модулятора в радиолокационной системе [54]

Нанотрубки можно соединять друг с другом подобно водородным трубам (рис. 2.37): «молекулы воды можно ввести в нанотрубки, которые представляют собой *идеальную модель* одномерного канала, аналогичного максвелловским трубкам с несжимаемой жидкостью, т.е. геометрическую конструкцию для изучения как гидродинамических процессов, так и электромагнитных взаимодействий. Протекающая через них жидкость генерирует электродвижущую силу в другой части нанотрубки подобно генератору» [14, р. 45]. Как видим, блоки таких схем отражают различные операции над элементами нанотехнологических систем в процессе их функционирования.

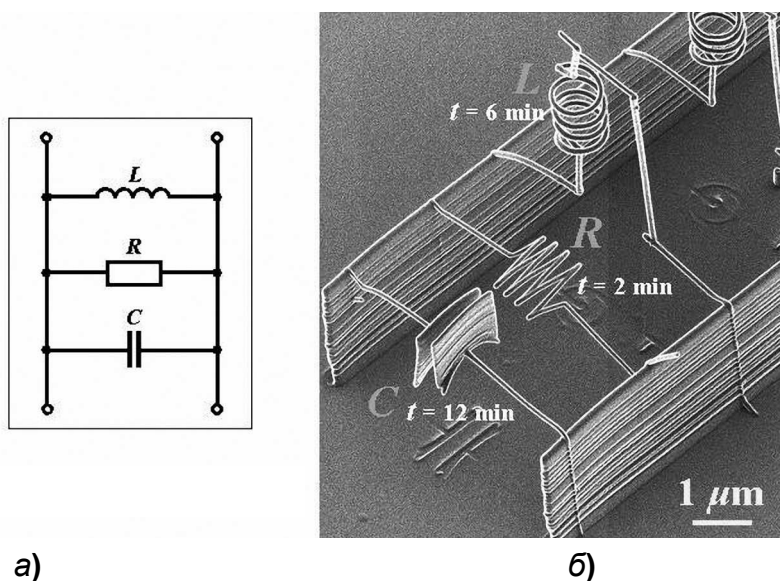


**Рис. 2.37.** Микрофлюидальный коммутатор с интегрированным распределительным устройством: *а* — схематическое изображение; *б* — готовое изделие, заполненное красящим веществом<sup>1</sup>

<sup>1</sup> См.: Springer Handbook of Nanotechnology / B. Bhushan (Ed.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2004, p. 268.

В нанотехнонауке для анализа и синтеза наноцепей также используются различные модели из теории электрических цепей (эквивалентные цепи со стандартными электронными компонентами). И в них мы можем видеть те же самые традиционные электронные компоненты («электронику на молекулярном уровне»), реализованные с помощью нанотехнологии.

Примерами такого рода структурной схемы в нанотехнонауке являются изображения микромеханических систем или устройств из нанотрубок в виде трехмерных наноструктур, состоящих из стандартных компонентов электрических схем (рис. 2.38)<sup>1</sup>.



**Рис 2.38.** Изображение на сканирующем ионном микроскопе (SIM) наноструктуры, состоящей из стандартных элементов электрической цепи  $L$ ,  $R$  и  $C$ : *a* — модель эквивалентной электрической цепи; *б* — трехмерная наноструктура<sup>2</sup>

Таким образом, в нанотехнонауке мы обнаруживаем черты как естественной, так и технической теории (рис. 2.39).

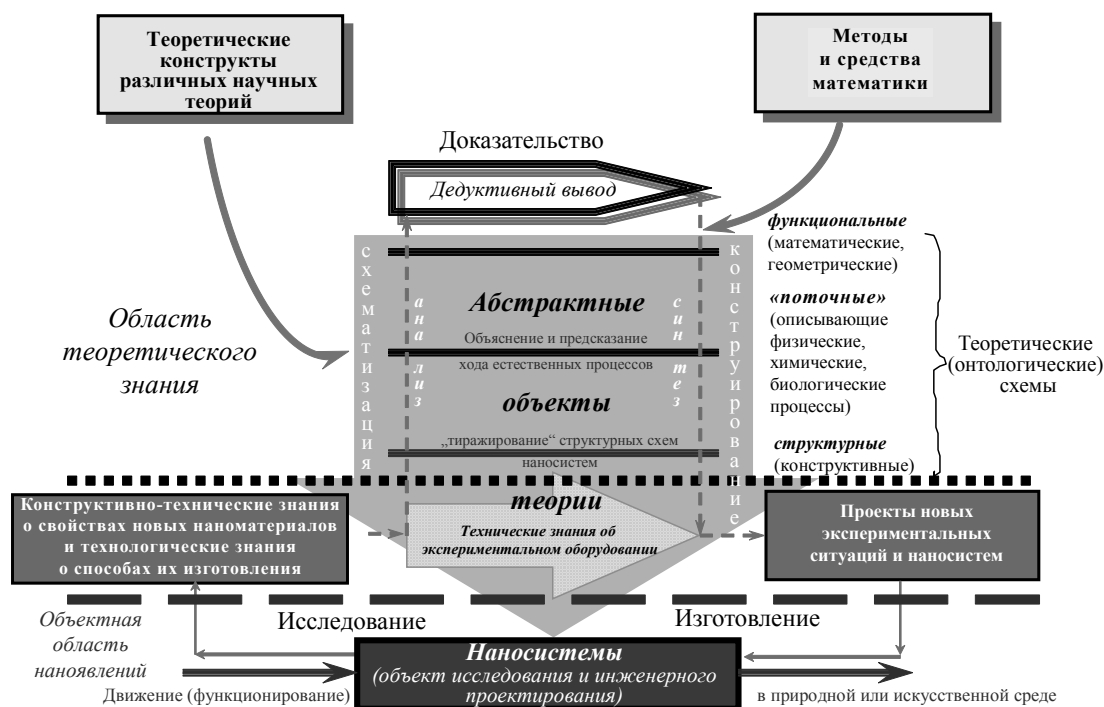
Конструктивная функция нанотехнонауки также выражается в ее отношении к инженерной практике. В нанотехнонауке одинаково важно предсказывать ход естественного процесса на наноуровне и конструировать новые структурные схемы наносистем.

Независимо от конструктивного исполнения и наполнения элементов наноцепи она может выполнять функции, например, радиоприемника. С точки зрения радиоэлектроники не имеет значения, с помощью какого рода реализации отдельных блоков или элементов технической системы будет обеспечено бесперебойное функционирование ее схем.

<sup>1</sup> Там же, р. 187.

<sup>2</sup> Там же, р. 186.

## Структура нанонауки



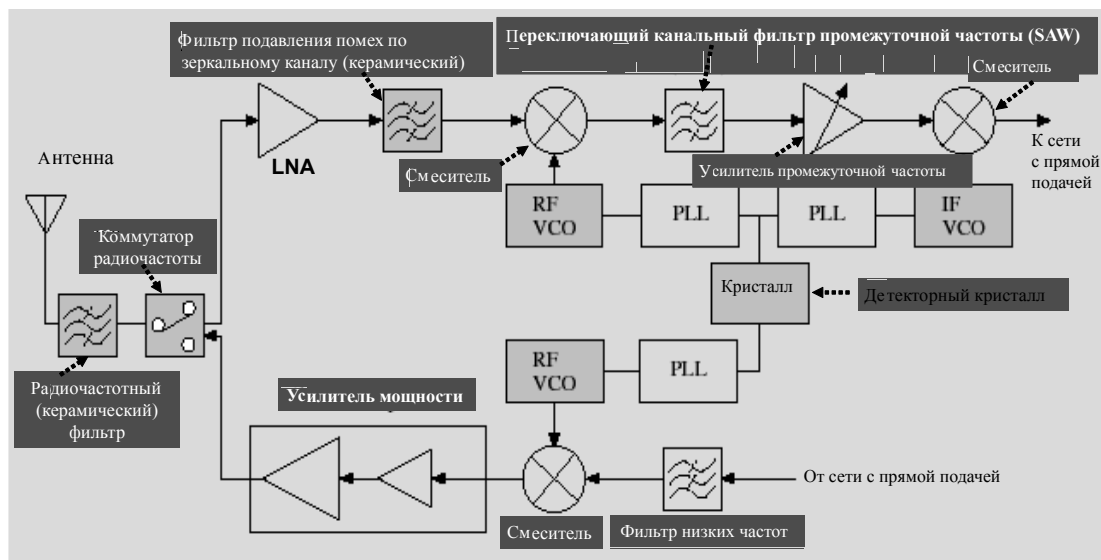
**Рис. 2.39.** Нанонаука как комбинация естественнонаучной и технической теорий — нанотехнонаука

Это может быть и реализация на базе определенных наноструктур, как, например, супергетеродинный радиоприемник<sup>1</sup> на наноуровне (рис. 2.40).

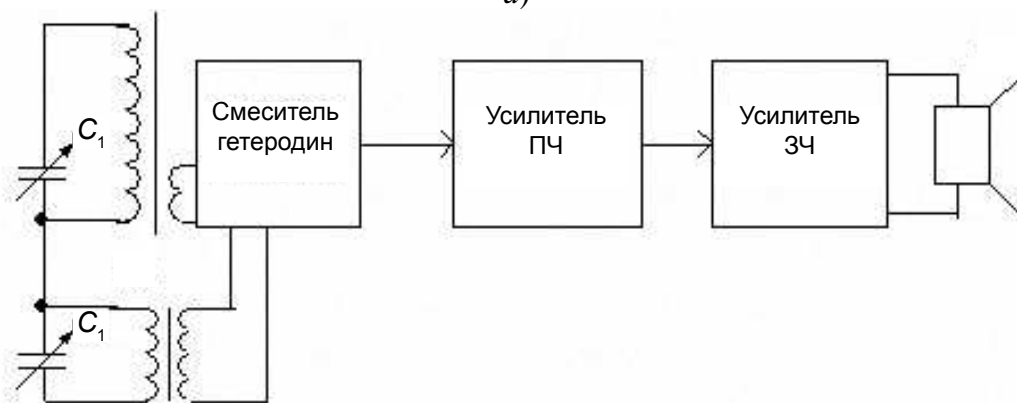
Наносхемы в таком случае представляют собой разновидность электронных схем, элементы которых выполнены на основе иных физических принципов, нежели в классической радиотехнике, и работают в иных диапазонах электромагнитных волн, например оптическом.

<sup>1</sup> В супергетеродинном приемнике основное усиление сигнала происходит в усилителе промежуточной частоты (ПЧ). Для этого в его схему вводятся блоки смесителя и гетеродина, представляющего собой маломощный генератор высокой частоты, отличающейся от частоты принимаемой радиостанции на промежуточную частоту. Высокочастотный сигнал радиостанции, выделенный входным контуром, смешивается в смесителе с сигналом гетеродина. На выходе смесителя получается сигнал разностной частоты, являющейся промежуточной. Так как в таком приемнике нет необходимости делать усилитель ПЧ широкополосным, коэффициент усиления его может быть очень большим, что позволяет достичь высокой чувствительности приемника в целом.





a)



б)

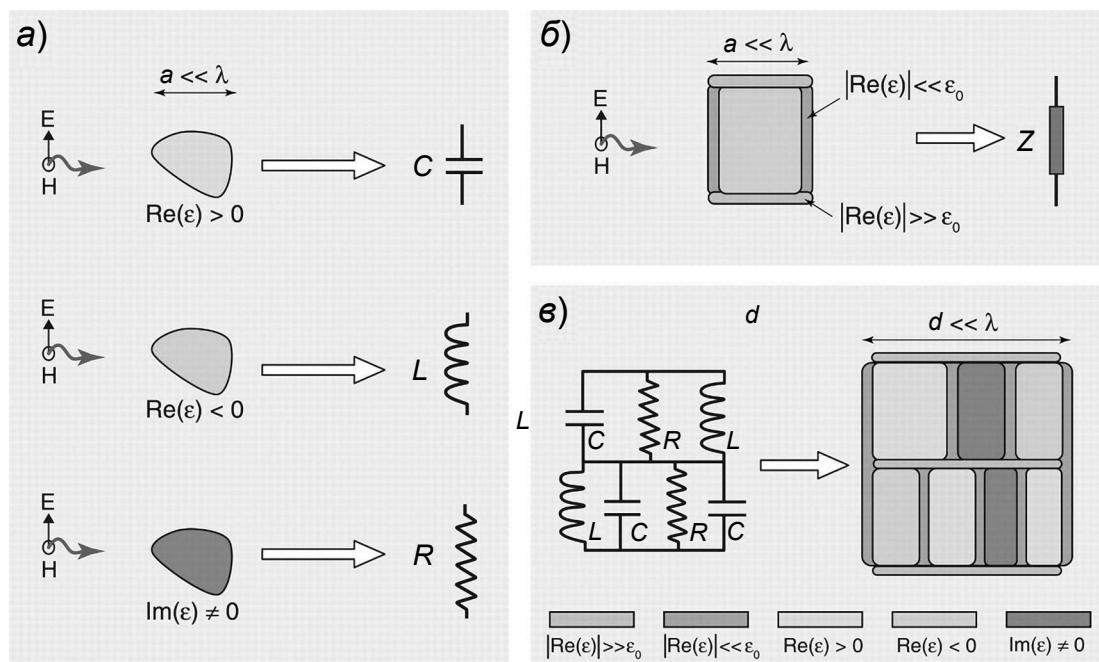
**Рис. 2.40.** Схема супергетеродинной радионаноархитектуры (а): VCO – генератор, управляемый напряжением; RF – радиочастота; IF – промежуточная частота; SAM – мономолекулярный слой на основе самосборки; PLL – система с фазовой автоматической подстройкой частоты; LNA – усилитель с низким уровнем собственных шумов (дискретные компоненты, выделенные темно-серым цветом, с помощью нанотехнологии могут быть интегрированы на кремниевой подложке с микроэлектроникой<sup>1</sup>); структурная схема обычного супергетеродинного приемника (б): ПЧ – промежуточная, ЗЧ – звуковая частота<sup>2</sup>

На рис. 2.41 показаны составленные из таких наночастиц блоки, которые представлены на структурной схеме устройства как сосредоточенные элементы, работающие на оптической частоте. После освещения их монохроматическим оптическим сигналом эти наночастицы, имеющие размеры меньше длины волны ( $a \ll \lambda$ ), могут эффективно

<sup>1</sup> См.: Springer Handbook of Nanotechnology / B. Bhushan (Ed.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, p. 240.

<sup>2</sup> <http://radiocon-net.narod.ru/page23.htm>

играть роль сосредоточенных элементов оптической цепи в зависимости от диэлектрической проницаемости материала, из которого они изготовлены. Если такой схеме оптическим сигналом передается возбуждение, оптическое электрическое поле и ток смещения в этих элементах подобраны и структурированы таким образом, что этот блок может вести себя в определенном диапазоне частот примерно так, как электронная схема, показанная на рис. 2.41.



**Рис. 2.41.** Наночастицы, имеющие размеры меньше длины волны (а); оптический наномодуль, созданный из наночастиц и выполненный в виде изолированного оптического нанoeлемента с двумя клеммами (б); блок, составленный из нескольких оптических наномодулей, соединенных друг с другом (в)

Независимо от того, осуществляется ли в технической теории анализ, синтез схем или простой инженерный расчет, можно сформулировать следующий обобщенный алгоритм функционирования технической теории (рис. 2.42).

1. В начальном пункте процесса теоретического решения новой инженерной задачи на языке конструктивно-технических и технологических знаний формулируются исходные условия этой задачи, инженерные требования и ограничения и возможные аналогии с решенными ранее задачами. Эта процедура может быть названа концептуализацией инженерной задачи.

2. Полученное эмпирическое описание должно быть теоретически сформулировано в стандартных для данной технической теории понятиях и представлениях. Эта процедура может быть названа идентификацией инженерной задачи с научной проблемой, т. е. уста-

новлением соответствия исследуемой и проектируемой технической системы определенной теоретической схеме данной технической теории. В результате строится структурная схема из идеализированных элементов, взятых из каталога стандартных элементов.



**Рис. 2.42.** Обобщенный алгоритм функционирования технической теории

3. Построенная таким образом структурная схема преобразуется методом аппроксимации 1-го порядка в более простую и типовую. При этом выделяются наиболее значимые для данной задачи параметры технической системы. С помощью эквивалентных преобразований (построения схем замещения) строятся поточные схемы для разных режимов функционирования технической системы (каких именно — определено в условиях задачи). Если сложная поточная схема не может быть за один или несколько шагов сведена к простейшей типовой схеме, для которой существует выработанное в теории унифицированное решение (если и этого не требуется, решения получаются сразу по формулам, взятым из таблиц), то она замещается по четко сформулированным правилам соответствия эквивалентной ей функциональной схемой. Таковой может быть, например, потенциальная диаграмма, позволяющая весьма просто наладить напряжения между любыми точками электрической цепи. Каждой точке цепи соответствует определенная точка потенциальной диаграммы: действующее значение и фаза искомого напряжения определяются

прямой, соединяющей соответствующие точки потенциальной диаграммы. Для такой замены используются различные методы — комплексный, контурных токов, узловых напряжений и т. д.

4. На основе функциональной схемы, построенной с помощью аппроксимации 2-го порядка, составляется система уравнений, которая решается с помощью определенных математических методов (например, матричных). Эти уравнения получаются на основе физических законов (например, законов Ома, Кирхгофа и т. д.), устанавливающих, скажем, зависимость между параметрами протекающего в цепи электрического тока и ее элементами. Их конкретные численные значения, известные из условий задачи, позволяют в результате решения данных уравнений вычислять неизвестные параметры тока и элементов цепи.

5. На функциональной схеме выполняется решение математической задачи с помощью стандартной методики расчета и типовых способов решения задач на основе применения ранее доказанных теорем. Для этого функциональная схема по особым правилам преобразования приводится к типовому виду. Так, в теории электрических цепей смешанные соединения преобразуются в более простые последовательные и параллельные, многоконтурные схемы — в одноконтурные и т. д. Для описания такого рода упрощающих преобразований в теории электрических цепей специально доказываются эквивалентность некоторых типовых схем и особые теоремы (скажем, об эквивалентном источнике тока и напряжения), позволяющие получать более удобные для расчета схемы. Это дает возможность заменять определенные участки цепи другими, эквивалентными и упрощающими схему.

6. Полученный с помощью математических методов результат решения задачи транслируется в процессе обратного эквивалентного преобразования по правилам соответствия на уровень поточных схем. Формулируются результаты решения научной проблемы. Несколько поточных схем (для разных режимов функционирования) синтезируются затем в структурную схему технической системы.

7. Осуществляются адаптация к конкретному случаю и частичная модификация решения, т. е. проводятся дополнительные расчеты и вносятся конструктивные и технологические поправки. Это необходимо, поскольку как анализ, так и синтез схем всегда основывается на компромиссе между сложностью и точностью расчетов, использовании приближенных методов и типовых искусственных приемов. Полученные теоретические расчеты должны быть скорректированы в соответствии с различными инженерными, социальными, экономическими, экологическими и другими требованиями. Это может потребовать введения новых, соответствующих им элементов в со-

став теоретических схем, которые можно рассматривать как коннотации (дополнительные, сопутствующие признаки) этих схем.

Формулировка системы коннотаций, которые вводятся в виде особых элементов в состав теоретических схем технической науки, может привести к необходимости многократного возвращения на предыдущие стадии (итерационная процедура); составлению новых (с учетом коннотаций) поточных и функциональных схем, проведению новых аппроксимаций, эквивалентных преобразований и расчетов.

Одна из основных задач функционирования развитой технической теории заключается в тиражировании типовых структурных схем для всевозможных инженерных требований и условий. Тогда решение любых инженерных задач, построение любых новых технических систем данного типа будет заранее теоретически обеспеченным. В этом и состоит конструктивная функция технической теории, ее опережающее развитие по отношению к инженерной практике. В противном случае ее функционирование будет сведено лишь к решению рутинных инженерных задач.

8. Заключительная процедура функционирования технической теории состоит в формулировке результата решения в виде практико-методических рекомендаций (проектировщику, изобретателю, конструктору и др.).

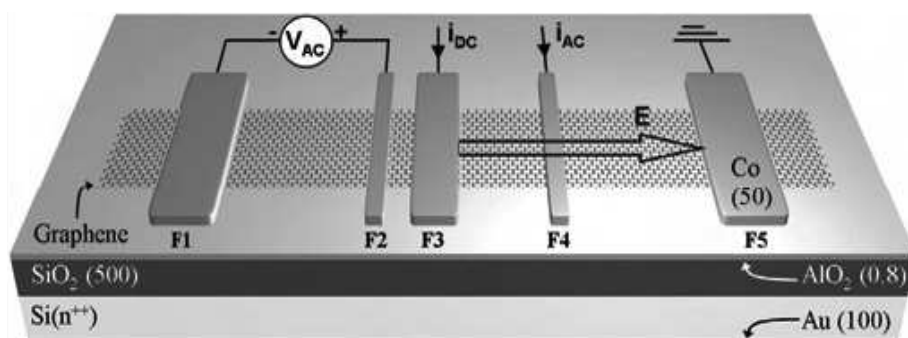
Конструктивная функция нанотехнонауки также выражается в ее отношении к инженерной практике. В нанотехнонауке одинаково важно предсказывать ход естественного процесса на наноуровне и конструировать новые структурные схемы наносистем, например, такой новый элемент спинтроники, как «спиновый клапан» («spin valve»), схематически показанный на рис. 2.43. Собственно в классической электронике спин-электрон (спин — собственный магнитный момент) не играл никакой роли<sup>1</sup>, а в спинтронике именно это свойство электрона используется в качестве ключевого элемента<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> В полупроводниках электрон рассматривается вместе с «дырками» как взаимосвязанная пара, а в спинтронике учитывается спин-электрон, т. е. направление его вращения, что не принимается во внимание в классической электронике. (См.: *Ohno H., Matsukura F. A ferromagnetic III±V semiconductor: (Ga,Mn)As // Solid State Communications. 2001. Vol. 117, p. 185).*

<sup>2</sup> В так называемой магниторезистивной памяти — MRAM (Magnetoresistive RAM), которая сможет заменить механически действующий жесткий диск современных компьютеров, информация запоминается благодаря использованию различных состояний спин-электрона, меняя спин у отдельного электрона в единственном атоме, что может привести к созданию квантовых компьютеров, обладающих большим быстродействием и меньшим потреблением энергии (См.: *Nanotechnology Innovation for Tomorrow's World. European Communities, 2004, p. 27*), особенно если они будут строиться на графеновой основе.

В нем наблюдается явный биполярный (изменение от положительного к отрицательному знаку под влиянием изменения направления постоянного электромагнитного поля) «спинный сигнал» [58, p. 10].

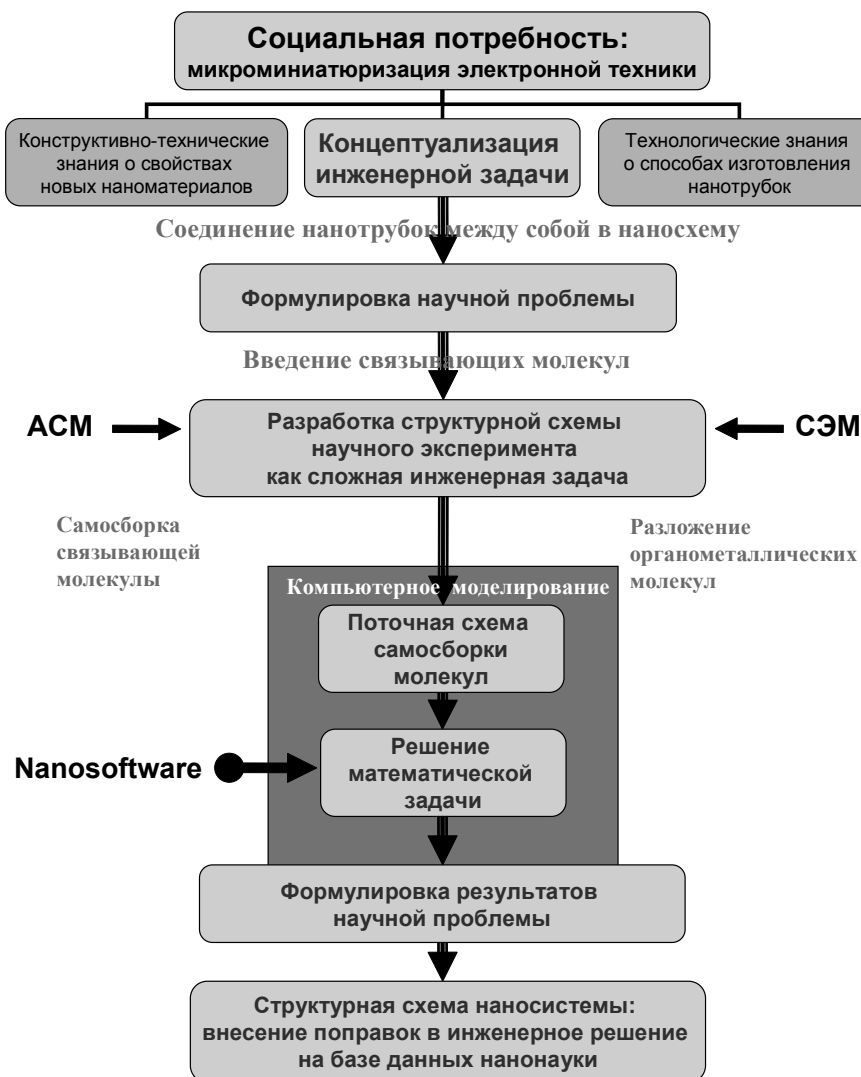


**Рис. 2.43.** Спиновый вентиль на основе использования эффекта полевого транзистора с двухмерной графеновой структурой (тонкий графеновый слой толщиной в один атом): F1, F2 — детекторы; F3, F4 — электроды; F5 — ферромагнитный кобальтовый электрод; E — переносимый электрон; IDC — постоянный и IAC — переменный электрический ток; VAC — переменное электрическое напряжение

В качестве примера можно привести исследование химической наносборки транзисторов из углеродных нанотрубок с целью получения более сложной функциональной наноструктуры. Главной проблемой здесь оказывается обеспечение соединения отдельных нанотрубок в наносхему и визуализация данной наносхемы для измерения входных и передаточных характеристик полученного нанотранзистора.<sup>1</sup> Таким образом исследовательская проблема детерминирована инженерной задачей, поскольку «транзистор — важный компонент электронной промышленности», а в данном случае одновременно и объект исследования. Для достижения все большей его миниатюризации, что диктуется фактически социальным заказом, требуется разрабатывать все новые технологии и материалы, среди которых одними из наиболее перспективных считаются транзисторы, изготовленные из углеродных нанотрубок. Транзисторы из углеродных нанотрубок изготавливаются разными способами. При этом возникает серьезная не только инженерная задача, но и научная проблема присоединения нанотранзистора из нанотрубок, сконструированных и работающих на наноуровне, к микросхемам, в которые они включаются в качестве основных элементов, и самих нанотрубок между собой. Сложной инженерной задачей является создание электродов, соединяющих

<sup>1</sup> Roth S., Kern D. Self-Assembly of carbon Nanotube Transistors // Nanotechnology — Physics, Chemistry, and Biology of Functional Nanostructures. Results of the first research programme Kompetenznetz «Funktionelle Nanostrukturen» (Competence Network on Functional Nanostructures). Th. Schimmel et al. (Eds.). Stuttgart: Landesstiftung Baden-Württemberg, 2008, p. 77–94.

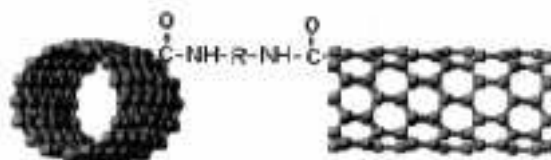
нанообъект с микрообъектом — контактной площадкой традиционной микросхемы. Соединение углеродных нанотрубок между собой в определенную функционирующую наносхему также является исключительно сложной инженерной задачей. Ее можно осуществить химическим путем с помощью «самосборки», поскольку на наноуровне невозможно оперировать с макро- и даже микроинструментами, — необходим инструмент, вынуждающий нанотрубки самоорганизовываться в заданные пространственные структуры (рис. 2.44).



**Рис. 2.44.** Решение инженерной задачи — создание электропроводящего соединительного молекулярного моста: АСМ — атомный силовой микроскоп; СЭМ — сканирующий электронный микроскоп; *Nanosoftware*<sup>1</sup> — специально разработанное для нанотехнологии с целью компьютерного моделирования нанопроцессов и наносистем стандартное программное обеспечение, которое используется теоретиками и экспериментаторами для обработки полученных в экспериментах данных

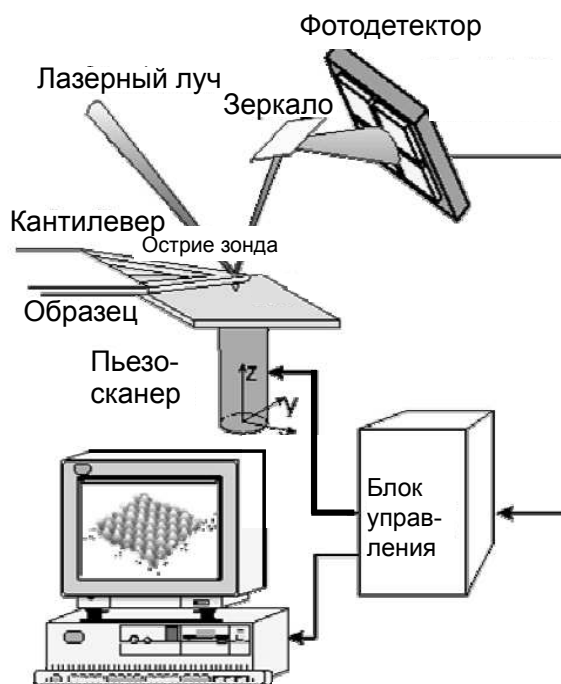
<sup>1</sup> Nanoscope Software 6.13 User Guide. Veeco Instruments Inc., 2004 ([www.veeco.com/pdfs.php/268/?showPDF=true](http://www.veeco.com/pdfs.php/268/?showPDF=true))

Чтобы соединить между собой углеродные нанотрубки, их химически функционализируют, т.е. искусственным путем придают им определенную функциональную направленность — некоторые свойства, делающие их из функционально нейтральных функционально определенными, например электропроводящими. С этой целью в их стенки искусственно вводят атомы или дефекты. Для соединения нанотрубок используются радикалы, которые начинают действовать как связывающая молекула R (рис. 2.45).



**Рис. 2.45.** Схематическое изображение двух углеродных нанотрубок, конец одной из которых соединен с серединой стенки другой с помощью связывающей молекулы R

Сканирующий силовой микроскоп (рис. 2.46) в данном наноэксперименте выступает средством и научного исследования, и одновременно изготовления мостика как между нанотрубками, так и нанотрубок с электродами.



**Рис. 2.46.** Принцип действия сканирующего атомного микроскопа [47]

Ведущее представление нанотехнологии как целенаправленной манипуляции материей на атомарном уровне было сформулировано еще в 1959 г. американским физиком, нобелевским лауреатом Ричардом Фейманом. В 1981 г. Г.К. Бинниг и Г. Рорер сконструировали



ровали первый зондовый микроскоп, сканирующий туннельный микроскоп, с помощью которого удалось *визуализовать атомы*. Посредством зонда этого прибора можно определить модуляцию электронной плотности, энергии связей атомов и наблюдать каждый атом по отдельности и в заданных точках.

Родился новый физический метод — сканирующая зондовая микроскопия, а вместе с ней и технологический прием локального воздействия на поверхность (электрического, магнитного, механического и т. д.) с точностью ориентации до отдельных атомов. Его относят сейчас к основным методам нанотехнологии.

Сканирующий атомный силовой микроскоп поставляет не изображения или звуковые сигналы, а данные, которые протоколируют *взаимодействие* острия зонда и поверхности образца. Здесь важны процессы интерпретации и подготовки полученного эмпирического материала, т. е. данных измерений. Главную роль в этих процессах играет специальный программный продукт для графической обработки данных, предлагающий средства для работы с изображением: показать срез в одной из секущих плоскостей, окрасить изображение, сделать его рельефным. Именно программа придает измерительным данным вид поверхности или глубинной структуры.

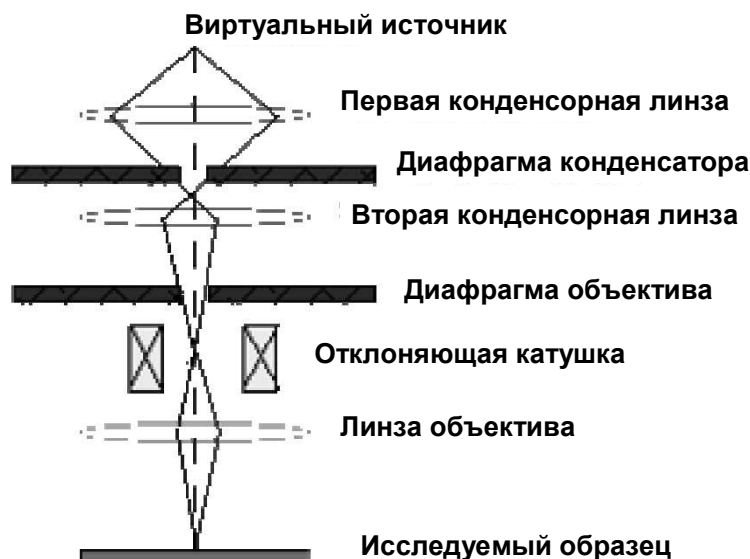
Другой способ соединения нанотрубок с микроэлектродом основан на использовании силового электронного микроскопа [60], который одновременно выполняет функцию визуализации нанотрубок и создания такого рода соединений (рис. 2.47).

Сканирующий электронный микроскоп осуществляет сканирование сфокусированным пучком электронов. При этом он превращается из сложного экспериментального прибора в промышленную установку Nanowriter электронно-лучевой литографии для производства наноструктур.

В этом случае на поверхность образца с нанесенными на нем углеродными нанотрубками высаживаются органометаллические молекулы (т. е. искусственно приготовленное органометаллическое соединение какой-либо органической молекулы), содержащие один или более атомов металла. Некоторые из этих молекул адсорбируются (осаждаются) на нанотрубках, что регистрируется силовым электронным микроскопом, электронный луч которого, направленный в желаемое место, разлагает эти молекулы, выделяя связанный в них атом металла. Таким образом, на поверхности нанотрубки возникает электропроводящий соединительный мост.

Итак, в технической теории заданы и специально нормированы не только правила соответствия функциональных, поточных и структурных схем, т. е. эквивалентные преобразования их друг в друга, но и правила преобразования абстрактных объектов в рамках каждого

такого вида теоретических схем. Причем структурные схемы, описывающие в идеализированной форме конструкцию технической системы, играют в технической теории ведущую роль, поскольку именно через них полученные теоретически результаты решения инженерных задач транслируются в область инженерной практики.



**Рис. 2.47.** Схема работы силового электронного микроскопа. В сканирующем электронном микроскопе функцию луча света выполняет поток электронов, выпускаемых из электронной пушки и управляемый рядом линз и отклоняющих пластин<sup>1</sup>

В естественной науке эти схемы выполняют вспомогательную роль — обобщенного описания экспериментальных ситуаций — и, как правило, в процессе систематического изложения теории, например в учебниках, или совсем опускаются, или приводятся лишь в качестве иллюстративных примеров.

## 2.3. Методологический анализ истории становления классической радиолокации

### 2.3.1. Принципы методологического анализа истории радиолокационной науки и техники как научно-технической дисциплины

Становление и развитие радиолокации в качестве объекта социального и методологического анализа выбрано нами не случайно. История именно этой области науки и техники, на наш взгляд,

<sup>1</sup> См.: Koch Th. Microstructure and Flux Flow Processes in Superconducting MgB2 Films. Theses of PhD Dissertation in Physics and Mathematics. Chisinau: Moldavian Academy of Sciences, Institute of Applied Physics, 2006, p. 73.

дает возможность проследить те общие процессы современного научно-технического прогресса, которые, как в капле воды, наиболее рельефно отразились в ней и могут стать репрезентантом, демонстрирующим на конкретном примере тенденции устойчивого научно-технического развития.

Пытаясь преодолеть образовавшийся в философии науки разрыв между экстерналистским и интерналистским подходами, мы будем комбинировать социальную историю радиолокации с внутренней историей радиолокационной теории. Если первая в последнее время достаточно подробно освещается в многочисленных мемуарах и юбилейных статьях ее участников, то вторая практически не проанализирована философами и историками науки и техники. Исключение, пожалуй, составляет докторская диссертация Ульриха Керна «Становление методов радиолокации: об истории радиолокационной техники до 1945 г.» [61], выполненная в 1984 г. в Историческом институте (отдел истории естествознания и техники) университета г. Штутгарта (Германия) на соискание ученой степени кандидата философских наук. В ней сделана успешная попытка объединить в своем исследовании аспекты социальной и методологической истории радиолокации. Но она заканчивается начальным периодом истории радиолокационной науки и техники. Особый интерес, на наш взгляд, представляет собой именно послевоенная история радиолокации и ее превращение в радиолокационную системотехнику (этот этап ее развития рассмотрен в разд. 3.2).

Предметом содержательного методологического анализа в данной работе является теория и практика создания радаров<sup>1</sup> как особой научно-технической дисциплины (в отличие от отрасли промышленности). Такой выбор предопределен следующими факторами.

Во-первых, теоретические основы радиолокации возникают первоначально в рамках развитой к тому времени технической науки, а именно — радиотехники. Поэтому в данном случае можно уже го-

---

<sup>1</sup> Радар (radar — Radio Detection and Ranging) — радиообнаружение (локация) и измерение дальности. «Радиолокация, таким образом, осознается как область науки и техники, которая включает в себя разработку методов и оборудования для выполнения следующих основных операций против мишени: 1) радиолокационное обнаружение; 2) радиолокационное измерение; 3) распознавание, селекция и идентификация вызвавшей интерес цели. Термин «радар» применяется к приложениям по решению научных и практических проблем в различных областях человеческой деятельности. При этом упоминают, например, подводные, астрономические или исследовательские географические радары (см.: *Barton D.K., Leonov S.A. et al. Radar Technology Encyclopedia (Electronic Edition). Boston, London: Artech House, 1998*).

ворить о независимом развитии конкретной научно-технической дисциплины. Именно потому, что радиолокация возникла как отрасль другой технической науки, ее появление не было инициировано какой-либо областью естествознания.

Во-вторых, изобретение радара привело к поистине революционным изменениям в радиопромышленности, а также в сфере научно-технических дисциплин, так как радиолокация как новая область технической науки и инженерной деятельности, которая занималась разработкой и производством мощных импульсных радаров, превращается во второй половине XX столетия в современную комплексную научно-техническую дисциплину — радиолокационную системотехнику.

В данной работе, однако, мы анализируем теоретическую радиолокацию не столько как конкретную научно-техническую дисциплину, сколько как репрезентативную модель развития современных научно-технических дисциплин.

**Проблемы исследования.** Что дает возможность квалифицировать новую технологию как радикально новую? Этим вопросом задается Б. Винстон в своей книге «Мультимедийные технологии и общество. История: от телеграфа до Интернета» и сам же на него отвечает. Термин «революция», утверждает он, является риторическим приемом, и совершенно неверно его вообще применять для описания развития информационных и коммуникационных технологий. «Действительно, — пишет он далее, — в исторической летописи можно наблюдать не только более медленный темп изменений, чем обычно предполагается, но и такие регулярности в инновационных структурах и их распространении, которые могут быть моделью для всех таких изменений» [62, р. 2]. Такого рода моделью и может стать пример с историей развития радиолокационной науки и техники.

Мы обычно идентифицируем разработку информационных и коммуникационных технологий с компьютерной наукой, но существует великое множество определений и мнений, что же такое компьютерная наука: одни считают ее фундаментальной наукой, другие — междисциплинарным научно-техническим исследованием, третьи — лишь новым названием кибернетики. Однако по отношению к кибернетике компьютер занимает такое же положение, как физические инструменты относительно физики, а современная компьютерная наука объединяет специалистов, работающих в области кибернетики, логики, психологии и лингвистики, математики и т. д., ученых и инженеров, исследователей и проектировщиков. К компьютерной науке относят информационные системы и средства ком-

муникации, средства автоматизации и контроля, средства математического моделирования и компьютерного эксперимента. Но по сути дела все эти проблемы возникли и решались первоначально в лоне радиолокации. В последнее время особый упор в компьютерной науке делается на имитационном моделировании, поскольку разрабатываемые ею средства компьютерного моделирования находят все более широкое применение в самых разнообразных областях науки и техники. Однако впервые эти проблемы также возникли в связи с развитием радиолокационной науки и техники. Поэтому, исследуя ее историю, мы одновременно рассматриваем и предпосылки того, что называют компьютерной революцией, которая своими корнями уходит в историю развития радиолокации.

Норберт Винер, отец кибернетики, занимался во время Второй мировой войны проблемами управления зенитным артиллерийским огнем, поэтому многие понятия и идеи, введенные им в кибернетику, пришли именно из этой области, которая и была одним из ранних направлений развития радиолокации. Вероятно, именно эта последняя работа мотивировала открытие им новой области кибернетики, которую он описал в своей книге «Кибернетика или управление и связь в животном и машине» (1948). В процессе изучения проблемы управления зенитным огнем в системе противовоздушной обороны Винеру могла прийти в голову мысль о рассмотрении оператора в качестве части управляющего механизма и применения к нему таких понятий, как обратная связь и устойчивость, которые первоначально были придуманы для механических и электрических систем. «[Кибернетика] внесла вклад в популяризацию образа мышления в таких терминах теории связи, как обратная связь, информация, управление, вход, выход, устойчивость, гомеостазис, прогнозирование и фильтрация»<sup>1</sup>. После Второй мировой войны эти проблемы создания автоматических систем управления, компьютерного моделирования, системотехнического проектирования были решены именно в рамках радиолокационной науки и техники.

**Основополагающие принципы радиолокации.** Как известно, идея инновационного научно-технического развития пришла из сферы

---

<sup>1</sup> O'Connor J.J., Robertson E.F. Norbert Wiener. — [http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Wiener\\_Norbert.html](http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Wiener_Norbert.html). Винер занимался построением детерминированных стохастических моделей по организации и управлению силами противовоздушной обороны США. Он первым предложил отказаться от практики ведения огня по отдельным целям и разработал новую вероятностную модель управления силами ПВО.

социально-экономических исследований<sup>1</sup>. Мы знаем, что новые технологии появляются из-за социальной необходимости, что они часто рождаются из опыта, приобретенного за пределами стандартных областей, что они возникают все чаще в культурах, базирующихся на риске, что они реагируют на экономические стимулы (на спрос или фактор изменения цены), что они накапливаются с развитием научно опосредованных коллегиальных сетей. И мы знаем, что в 1920-е гг. придавали особое значение тому, что новые технологии появляются в результате новой комбинации уже существующих технологий и, как утверждал Кэмпферт, являются «композицией механических элементов, которые аккумулируются как часть социального наследия»<sup>2</sup>.

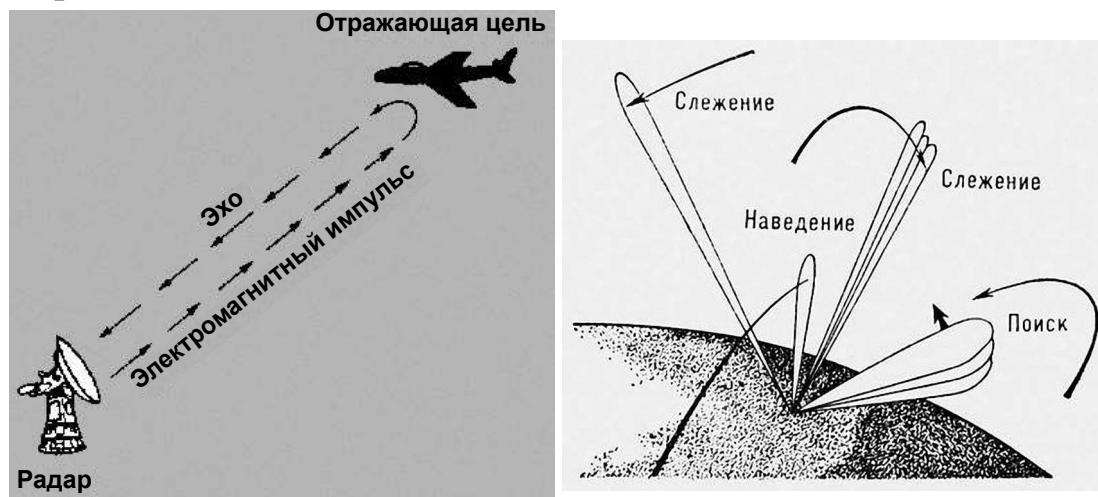
Идея такого комбинирования является старой идеей. Она восходит, по крайней мере, к написанному Тарстоном в 1889 г. [63, р. 2–3], повторенному Шумпетером в 1912 г. и ставшему основной идеей в 1920-х гг. И она является, несомненно, центральной в любой теории изобретения. Но ни один из этих ранних и ни один из современных писателей не дает удовлетворительного объяснения, каким образом имеет место такого рода комбинирование. Возникновение технологий приобретает мистический характер. Технологии всегда развиваются из некоторой центральной идеи или концепции — «метода вещи». Таким образом, «базисное понятие или принцип радара — существенная идея, которая позволяет ему работать, — состоит в том, чтобы посылать высокочастотные радиоволны и определять расстояние до объектов с помощью анализа отраженного от поверхности этого объекта сигнала. То, что радиоволны отражаются от металлических объектов, является феноменом; идея же использования этого феномена для обнаружения металлических предметов на расстоянии (в радаре) представляет собой принцип. Сам феномен является чисто природным эффектом и как таковой существует независимо от людей и от технологии. Он не имеет прикрепленного к нему “применения”. Принцип же, напротив, является идеей использова-

---

<sup>1</sup> См., например, работы: *Bijker W.* Of Bicycles, Bakelite and Bulbs: Toward a Theory of Socio-technical Change. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1995; *David P.* Technical Choice, Innovation and Economic Growth. Cambridge University Press, 1975; *Dosi G.* Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation // *Journal of Economic Literature*, 1988. Vol. XXVI, 1120–1171; *Freeman Ch.* The Economics of Innovation. Aldershot, England: Edward Elgar, 1990; *Rosenberg N.* Inside the Black Box: Technology and Economics. Cambridge Univ. Press., 1982.

<sup>2</sup> Цит. по: *McGee D.* The Early Sociology of Invention // *Technology and Culture*, 1995. Vol. 36. №. 4, p. 782.

ния феномена с определенной целью и существует в мире людей и применений». Для того чтобы понять технологию, требуется понять ее принцип действия и то, каким образом этот принцип преобразуется в рабочую архитектуру [64]. Схематически этот принцип изображен на рис. 2.48.



**Рис. 2.48.** Принцип работы радара. Слева показано, как импульс электромагнитной энергии, посланный антенной радиолокационной станции, отражается от некоторой цели (в данном случае самолета) и в виде электромагнитного эха возвращается обратно. На основе анализа отраженного радиолокационного сигнала вычисляются координаты цели, необходимые, например, для управления зенитно-артиллерийским огнем. Временной интервал между посланным и отраженным сигналами позволяет измерить расстояние до цели<sup>1</sup>. Справа показаны различные режимы работы радара, форма и направление движения «луча» радиолокатора при выполнении его основных функций: поиск цели, слежение за целью, наведение на нее орудий или ракетной установки (с помощью направленного луча электромагнитной энергии)<sup>2</sup>

Идея использования радиоволн в целях радиообнаружения возникла почти сразу же после опытов Герца. Явление отражения радиоволн Герц наблюдал еще в 1886–1889 гг. Влияние корабля, пересекающего трассу радиоволн, на силу сигнала в 1897 г. зарегистрировал А.С. Попов. Впервые идея обнаружения корабля по отраженным от него радиоволнам была четко сформулирована в авторской заявке немецкого инженера К. Хюльсмайера (1904 г.), содержащей также подробное описание устройства для ее реализации<sup>3</sup>. 30 апреля 1904 г. Кристиан Хюльсмайер в Дюссельдорфе (Германия) применил

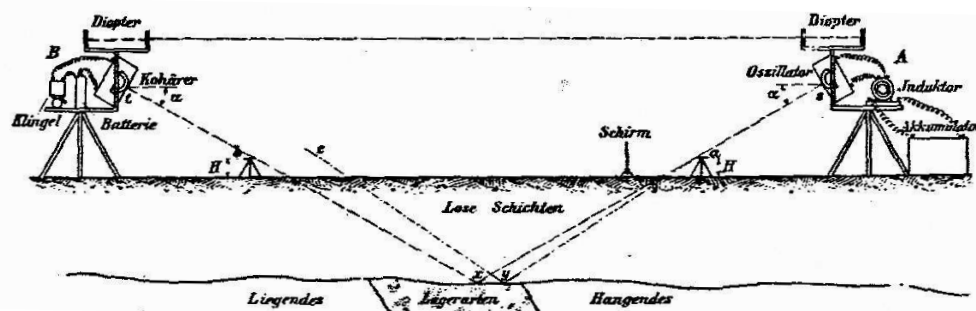
<sup>1</sup> См.: Radarentwicklung. Die technischen Grundlagen des Radar. – radarstrahlung.de

<sup>2</sup> Богомолов А.Ф. Радиолокационная станция. — <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/094/937.htm>

<sup>3</sup> Там же.

в своем патенте «телемобильскоп» («*telemobiloscope*»), который был фактически приемопередающей системой для определения расстояния до металлических предметов с помощью электромагнитных волн. Он основал также собственную компанию *Telemobiloscop-Gesellschaft Huelsmeyer und Mannheim* и провел первую публичную демонстрацию своего прибора 18 мая 1904 г. на мосту в г. Кельне. Когда на реке появился корабль, можно было слышать сигнальный звонок колокольчика, который прекратился после того, как корабль изменил направление и вышел из зоны действия прибора. Все испытания дали положительные результаты. Пресса и общественное мнение были настроены благоприятно, но никто из среды предпринимателей и морского ведомства не проявил к этому изобретению должного интереса. Патент он получил 11 ноября 1904 г. в Англии. Описание на английском языке того, как его радар работает, детально приводится в его американском патенте 810,150 от 16 января 1906 г.<sup>1</sup>

Интересно, что аналогичные идеи высказывались и в других областях. Немецкий ученый О. Тюрстедт разрабатывал экспериментальное оборудование для определения залегания горных пород с помощью отраженной волны: «Я хотел бы сделать следующие предложения по применению более непосредственного метода. Я считаю возможным с помощью отражения лучей электрической силы (так называемых лучей Герца) определять наличие главных минералов в земной коре и глубину залегания рудных месторождений под земной поверхностью» (рис. 2.49) [65, s. 159–162]. Однако развитие радиолокации пошло в ином направлении, а именно: радиобнаружение и сопровождение летательных аппаратов.



**Рис. 2.49.** Рефлектометрическое определение залегания горной породы [65, s. 159]

Рассмотрим теперь, каким образом внутренняя структура радиотехнической теории сначала в процессе формирования нового исследовательского направления, области исследования и новой

<sup>1</sup> См.: Christian Huelsmeyer, the inventor // Radar World – <http://www.radar-world.org/huelsmeyer.html>



научно-технической дисциплины затем была радикально трансформирована в современную неклассическую научно-техническую дисциплину — радиолокационную системотехнику. При этом важно проследить динамику роста числа публикаций в этой области и структурного их изменения, сопровождающихся соответствующими изменениями в научно-техническом сообществе (организация научно-исследовательских институтов, проектно-конструкторских бюро, кафедр в высших учебных заведениях, выпуск специализированных научных журналов, учебников и монографий и т.д.). Для научно-технических дисциплин, однако, важным является также зафиксировать динамику развития экспериментального, серийного и массового промышленного производства (радаров и их компонентов) и связанной с ними инженерной деятельности в данной области. Именно на фоне изменения динамики этих параметров становятся понятными внутренние структурные перестройки в технической теории.

### **2.3.2. Возникновение радиолокации как нового исследовательского направления радиотехники**

Радиолокация, по общему признанию историков [66—74], возникла примерно в одно и то же время в различных странах — СССР, США, Великобритании, Германии — как ответ на четко определенный социальный заказ на создание новых типов радиотехнических систем — радаров, или радиолокационных станций (РЛС). Увеличение скоростей военных самолетов и развитие военно-морского флота потребовали новых способов их обнаружения и навигации. Старая аппаратура — звукоулавливатели и прожекторные системы — для решения новых оперативных задач армии не годились. Поэтому перед инженерами и учеными была поставлена конкретная инженерная задача: проверить возможность использования радиоволн для обнаружения различных объектов и разработать соответствующую экспериментальную аппаратуру.

Однако для ее решения необходимо было провести целый ряд новых научных исследований, поэтому были сформулированы сложные научные проблемы, в процессе разработки которых и сформировалось новое исследовательское направление в рамках радиотехники. «Для трансляции принципа в новую работоспособную технологию действительно требуется новый этап: либо принцип достигается путем рассмотрения возможностей феномена, либо обдумыванием условий определенной потребности. Процесс должен теперь идти от мысленного представления к физическому воплощению, и это

придает ему все более физический характер. Решениям, которые до сих пор были концептуальными, должна быть придана физическая форма, и с подпроблемами, которыми пока отчасти пренебрегали, теперь приходится иметь дело непосредственно... Этот этап распадается на две частично перекрывающиеся друг друга фазы: поиск принципа (выведение его или из феномена, или эффекта) и перевод его в физическую реальность» [75, 76].

На этом этапе становления научно-технической дисциплины постепенно формируются различные частные теоретические схемы радиолокации за счет модификации и конкретизации обобщенных теоретических схем радиотехники применительно к режимам функционирования новых видов радиотехнических устройств. Радиолокационные устройства пока еще рассматриваются как разновидность радиотехнических устройств, функционирующих в импульсном режиме и на сверхвысоких частотах.

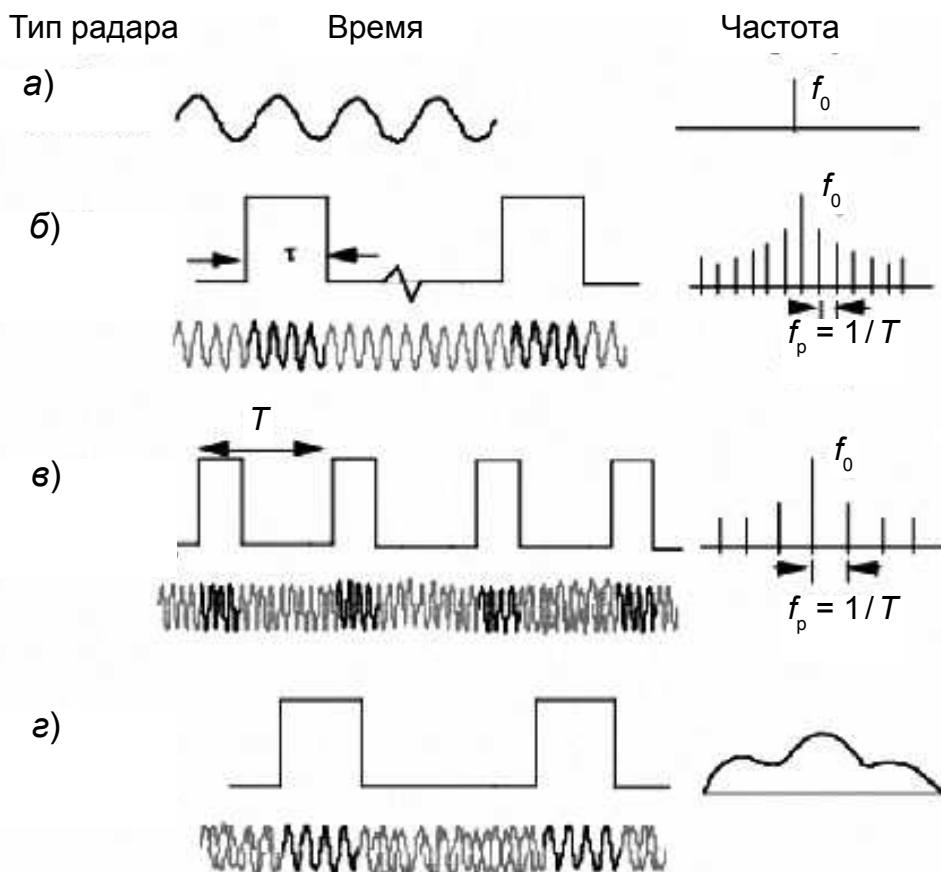
**Формирование новых конструктивных блоков и элементов (приборов) РЛС и связанных с ними частных теоретических схем радиолокации.** К началу 1930-х гг. были известны два основных метода определения дальности с помощью радиоволн: импульсный и фазометрический (рис 2.50). Первый метод использовался для зондирования верхних слоев атмосферы — ионосферы (так называемого пятого слоя Хевисайда). В 1932—1933 гг. его специально изучали для целей радиообнаружения. Второй метод, называемый иногда также интерференционным, или методом «биений», основывался на эффекте Доплера и заключался в измерении разности фаз излучаемой и принимаемой радиоволн<sup>1</sup> (рис. 2.50, а).

Для реализации поставленной задачи первоначально был выбран второй — фазометрический — метод, хотя в дальнейшем наиболее важное значение в развитии радиолокации имел именно импульсный метод. Это было обусловлено прежде всего тем, что ученые и инже-

---

<sup>1</sup> Частота принятого сигнала получает дополнительный сдвиг относительно частоты излучаемых колебаний при перемещении точек приема и излучения, что позволяет измерять радиальные скорости движения цели относительно РЛС. Этот эффект Доплера был впервые описан австрийским ученым Христианом Доплером в 1842 г., обратившим внимание на изменение звука проходящего по железнодорожному пути поезда, и заключался в том, что скорость частицы определяется сдвигом ее частоты. «Когда элементарная частица достигает главного лепестка диаграммы направленности антенны РЛС, излучаемая ей волна сжимается в волну более высокой частоты благодаря ее постепенному движению в сторону РЛС. Частица, которая движется от главного лепестка диаграммы направленности антенны РЛС, будет испытывать удлинение волны, имеющей более низкую частоту (Basic Radar Theory. — <http://snrs.unl.edu/amet451/marsh/theory.html>).

неры, занятые разработкой первой радиолокационной аппаратуры, ориентировались еще на традиционные радиотехнические представления, на старую парадигму данной сферы научного и инженерного знания. Новая парадигма еще только начинала формироваться.



**Рис. 2.50.** Доплеровская РЛС непрерывного излучения (а), импульсная РЛС некогерентная, т. е. с произвольной фазой от импульса к импульсу (б), когерентно-импульсная РЛС соответственно с высокой и низкой частотами повторения импульсов (в и г)<sup>1</sup>

А. Бриан определяет новую технологию как радикально новую, если она «достигает цели, используя новый или принципиально иной принцип, чем тот, который использовался до этого». Тогда под это определение попадает лишь импульсная радиолокация, что верно лишь отчасти, поскольку непрерывная радиолокация оказалась

<sup>1</sup> Первые импульсные РЛС имели очень низкую частоту повторения импульсов. С одной стороны, тогда еще не могли генерировать импульсы с высокой частотой повторения, а с другой — не могли и обрабатывать ее. После Второй мировой войны частоту повторения импульсов уже могли увеличивать настолько, насколько это требовалось (См.: *Wiesbeck W. Lecture Script «Radar System Engineering». 13th Edition WS 2006/2007. Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik, Universität Karlsruhe — [www.ihe.uni-karlsruhe.de](http://www.ihe.uni-karlsruhe.de)*).

впоследствии не менее перспективной. Но в тот период, конечно, переход к импульсным методам произвел радикальный переворот во взглядах на радиолокацию как принципиально новую область радиотехники. Однако, — пишет далее Бриан, — если «мы обозначим новую технику как “изобретение”, то мы всегда найдем цель, выведенную из нового или иного основополагающего принципа. Например: в 30-х гг. приближающийся самолет мог быть обнаружен за горизонтом прослушиванием акустического излучения. Радар же базировался на ином принципе: фиксирование слабого эха, которое летательный аппарат отражает от посланного радиоимпульса» [75].

Для реализации фазометрического метода тогда не требовалась принципиально новая аппаратура, так как генератор дециметровых волн был к тому времени уже разработан и с его использованием проводились сложные теоретические исследования. Непрерывное излучение, которое применялось в данном случае, было уже достаточно хорошо изучено в радиотехнике. Однако проведение работ и в этом направлении встретилось с множеством технических трудностей, последовательное преодоление которых привело к развитию принципиально новых инженерных и научных решений.

Прежде всего для улучшения работы радиолокационных устройств потребовался переход на все более короткие волны, что, в свою очередь, выдвинуло на первый план развитие еще неосвоенной техники сверхвысоких частот (СВЧ). Поэтому и разработка радиолокационных устройств пошла по пути совершенствования отдельных блоков РЛС — генераторов, приемников, усилителей, антенных устройств и т. д. Для этого было необходимо решать задачи их проектирования, научного обоснования протекающих в них процессов и изготовления входящих в их конструкцию новых приборов (например, многокамерных магнетронов, различных клистронов с дисковыми выводами для дециметровых волн, ламп бегущей волны, волноводов и др.).

*Магнетрон* — генераторный электровакуумный прибор СВЧ, в котором взаимодействие электронов с электрической составляющей поля СВЧ происходит в пространстве, где постоянное магнитное поле перпендикулярно постоянному электрическому полю. Этот термин ввел американский физик Альберт Халл, который в 1921 г. опубликовал результаты теоретических и экспериментальных исследований работы магнетрона в статическом режиме и предложил ряд его конструкций. В 1921 г. А. Халл из фирмы General Electric Co., исследуя движение электронов в цилиндрической диоде под влиянием однородного осевого магнитного поля, заметил, что есть возможность управлять потоком электронов с помощью изменения магнитного поля. Собственно говоря, он собирался разработать для своей

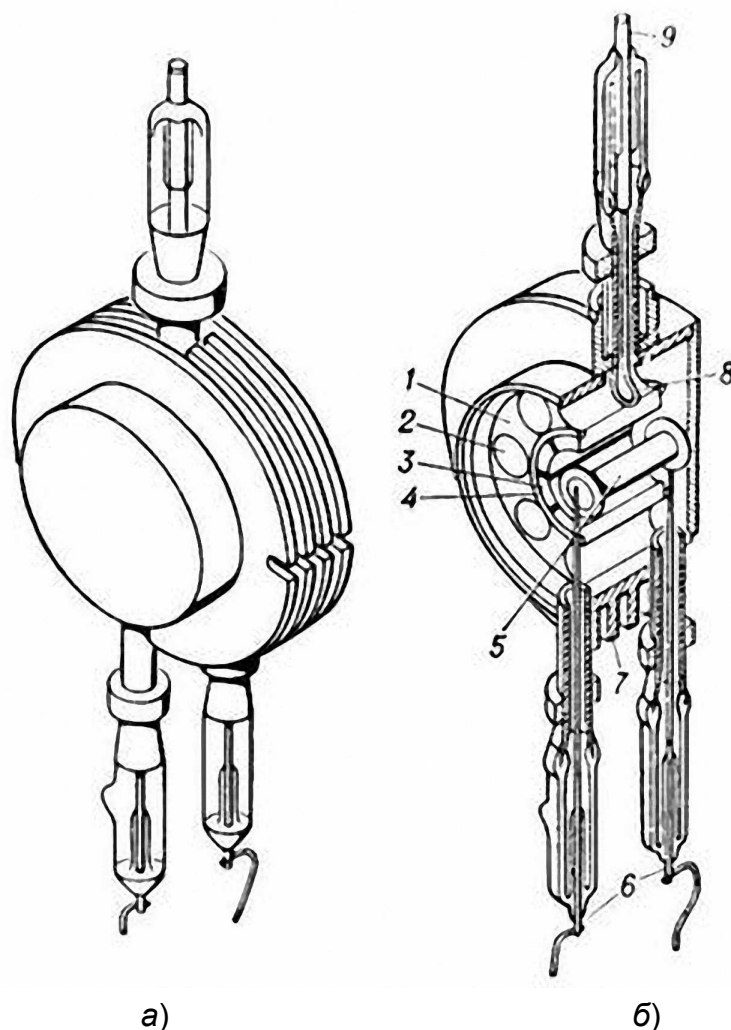
фирмы усилитель с магнитным управлением в противовес триоду с управляющей сеткой фирмы-конкурентки — Western Electric Co., но попутно обнаружил возможность генерации высокой частоты. Новый прибор получил название магнетрона [77].

Генерирование электромагнитных колебаний в дециметровом диапазоне волн с помощью магнетрона «открыл и запатентовал в 1924 г. чехословацкий физик А. Жачек». В 1920-е гг. исследованием влияния магнитного поля на генерирование колебаний СВЧ занимались физики: Е. Хабан (1924, Германия), А.А. Слуцкий и Д.С. Штейнберг (1926—1929, СССР), К. Окабе и Х. Яги (1928—1929, Япония), И. Ранци (1929, Италия). В 1930-е гг. исследования в этой области велись уже во многих странах. Задача увеличения выходной мощности генерируемых колебаний была решена в 1936—1937 гг. советскими инженерами Н.Ф. Алексеевым и Д.Е. Маляровым под руководством М.А. Бонч-Бруевича.

Созданная ими конструкция многорезонаторного магнетрона оказалась настолько совершенной, что в последующие годы во всем мире разрабатывались и выпускались только они. В предложенной конструкции катод имеет форму полого цилиндра, внутри которого располагается подогреватель. В 1940—1970-е гг. в эту конструкцию инженерами многих стран был внесен ряд улучшений и разработаны тысячи их типов для радиолокации.

В 1950—1970-е гг. на основе многорезонаторного магнетрона был создан ряд приборов для генерации и усиления колебаний СВЧ. «В простейшей конструкции многорезонаторного магнетрона (рис. 2.51) анодный блок представлял собой массивный медный цилиндр с центральным круглым сквозным отверстием и симметрично расположенными сквозными полостями (от 8 до 40), выполняющими роль объемных резонаторов. Каждый резонатор соединяется щелью с центральным отверстием, в котором расположен катод. Резонаторы образуют кольцевую колебательную систему [77]. В многорезонаторном магнетроне на электроны, движущиеся в пространстве между катодом и анодом, действуют три поля — постоянное электрическое поле, постоянное магнитное и электрическое СВЧ. При перемещении электронов в радиальном направлении энергия источника анодного напряжения преобразуется в кинетическую энергию электронов. Под влиянием постоянного магнитного поля электроны изменяют направление движения. Так как часть электрического поля СВЧ через щели резонаторов проникает в пространство анод — катод, то электроны... тормозятся... и поэтому их энергия, полученная от источника постоянного напряжения, преобразуется в энергию колебаний СВЧ. Поле СВЧ дважды за период

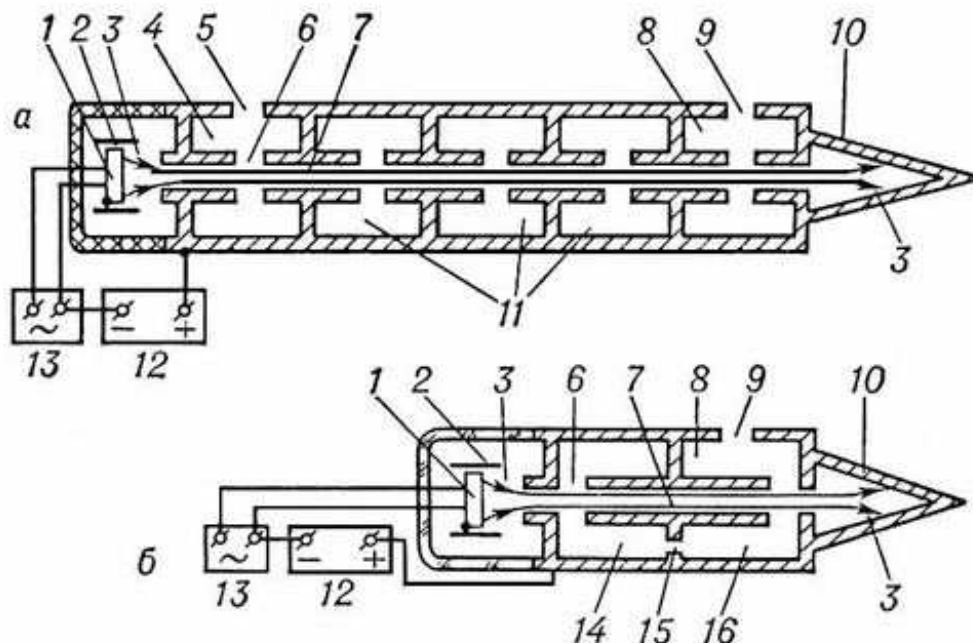
колебаний меняет направление... синхронизм между перемещением электронов и тормозящим электрическим полем СВЧ является основным принципом» его работы [78].



**Рис. 2.51.** Многорезонаторный магнетрон простейшей конструкции:  
*а* — внешний вид; *б* — разрез; 1 — анодный блок с восемью резонаторами типа «щель — отверстие»; 2 — резонатор; 3 — ламель анодного блока;  
 4 — связка в виде металлического кольца (второе такое же кольцо расположено на другом торце анодного блока);  
 5 — катод; 6 — выводы подогревателя катода; 7 — радиатор;  
 8 — петля связи для вывода энергии СВЧ; 9 — стержень вывода энергии СВЧ для присоединения к коаксиальной линии

*Клистрон* — электровакуумный прибор СВЧ, в котором преобразование постоянного потока электронов в переменный происходит путем модуляции скоростей электронов электрическим полем СВЧ (при пролете их сквозь зазор объемного резонатора) и последующей группировки электронов в сгустки (из-за разности их скоростей) в пространстве дрейфа, свободном от поля СВЧ. Клистроны могут быть пролетными и отражательными. В первом случае электроны последо-

вательно пролетают сквозь зазоры объемных резонаторов. Во входном резонаторе происходит модуляция скоростей электронов, в пространстве дрейфа образуются сгустки электронов, которые, проходя сквозь зазор выходного резонатора, взаимодействуют с его электрическим полем СВЧ, большинство электронов тормозится и часть их кинетической энергии преобразуется в энергию колебаний СВЧ (рис. 2.52).



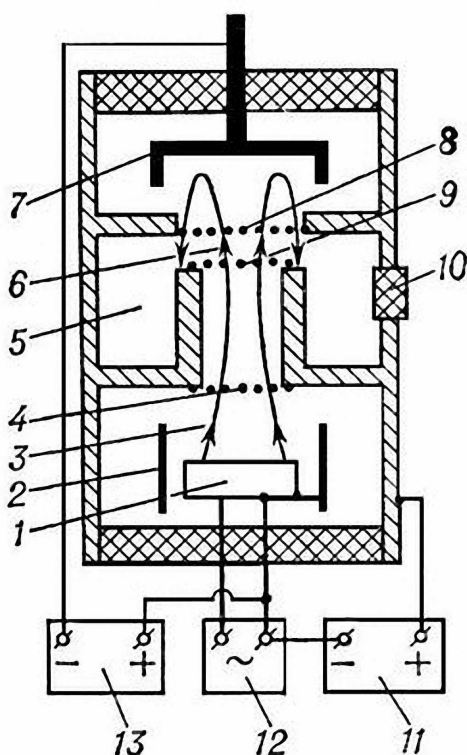
**Рис. 2.52.** Схемы конструкции пролетных клистронов: *a* — усилительного; *б* — генераторного; 1 — катод; 2 — фокусирующий цилиндр; 3 — электронный поток; 4 — входной объемный резонатор; 5 — отверстие для ввода энергии сверхвысоких частот; 6 — зазор объемного резонатора; 7 — пространство дрейфа; 8 — выходной объемный резонатор; 9 — отверстие для вывода энергии сверхвысоких частот; 10 — коллектор, принимающий электронный поток; 11 — промежуточные объемные резонаторы; 12 — источник постоянного анодного напряжения; 13 — источник напряжения подогрева катода; 14 — первый объемный резонатор; 15 — щель связи, через которую часть энергии сверхвысоких частот проходит из второго резонатора в первый; 16 — второй объемный резонатор

Идея преобразования постоянного потока электронов в поток переменной плотности за счет того, что ускоренные электроны догоняют замедленные, рассматривалась советским физиком Д.А. Рожанским [79, 80] в 1932 г. Основанный на этой идее метод получения мощных колебаний СВЧ был предложен совместно советским физиком А.Н. Арсеньевой и немецким физиком О. Хайлем в 1935 г., а первые конструкции пролетных клистронов были созданы в 1938 г. американскими физиками В. Ханом, Г. Меткалфом и независимо от них Р. Варианом и З. Варианом. Большинство из них являются многорезонаторными усилительными клистронами.

Принцип работы отражательного клистрона был использован Хольманном в 1925 году еще до того, как он запатентовал «двухсеточную электронную лампу с тормозящим полем» в 1935 г. в Германии, а в 1938 г. — в США, опередив Рандалла и Х. Бутса, выполнивших свою работу лишь в феврале 1940 г. [77].

Отражательный клистрон был разработан в 1940 г. группой советских инженеров — Н.Д. Девятковым, Е.Н. Данильцевым, И.В. Пискуновым и независимо от них советским инженером В.Ф. Коваленко. Первые работы по теории отражательного клистрона были опубликованы советскими физиками Я.П. Терлецким в 1943 г. и С.Д. Гвоздовером в 1944 г. Отражательные клистроны являются самым массовым типом приборов СВЧ и применяются в радиолокации как генераторы малой мощности [81].

В отражательном клистроне (рис. 2.53) поток электронов, пройдя зазор объемного резонатора, попадает в тормозящее поле отражателя, отбрасывается этим полем назад и вторично проходит зазор в обратном направлении.



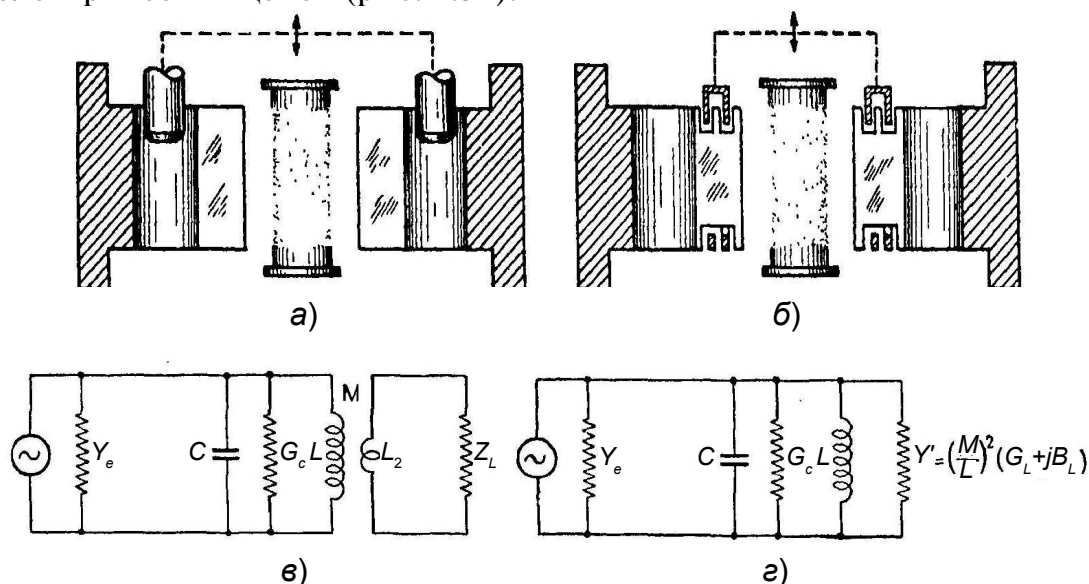
**Рис. 2.53.** Схема конструкции отражательного клистрона:

1 — катод; 2 — фокусирующий цилиндр; 3 — электронный поток; 4 — ускоряющая сетка; 5 — объемный резонатор; 6 — зазор объемного резонатора; 7 — отражатель; 8 — вторая сетка резонатора; 9 — первая сетка резонатора; 10 — вакуумноплотное керамическое окно вывода энергии сверхвысоких частот из объемного резонатора; 11 — источник напряжения резонатора клистрона; 12 — источник напряжения подогрева катода; 13 — источник напряжения отражателя [81]



При первом прохождении зазора его электрическое поле СВЧ модулирует скорости электронов. При втором прохождении (в обратном направлении) электроны прибывают в зазор сформированными в сгустки. Поле СВЧ в зазоре тормозит эти сгустки и превращает часть кинетической энергии электронов в энергию колебаний сверхвысокой частоты. Сгустки электронов образуются в результате того, что ускоренные электроны в пространстве между объемным резонатором и отражателем проходят более длинный путь и находятся дольше, чем замедленные. При изменении отрицательного напряжения на отражателе меняются время пролета электронов, фаза прибытия сгустков в зазор и частота генерируемых колебаний, что используется для электронной настройки, позволяющей управлять частотой генерируемых колебаний при частотной модуляции и автоматической подстройке частоты. Применяется также механическая перестройка частоты [81].

Как видно из приведенного даже краткого описания функционирования принципиально новых радиолокационных приборов — магнетрона и клистрона, физическая сущность протекающих в них процессов и их конструктивные особенности не имели почти ничего общего с традиционными теоретическими схемами классической радиотехники. В то же время для их исследования применялись все те же эквивалентные схемы замещения, что и в классической теории электрических цепей (рис. 2.54).



**Рис. 2.54.** Магнетрон с переменным индуктивным сердечником (а) и с переменными конденсаторными пластинами (б) и его эквивалентные схемы соответственно (в, г) [82, р. 135]

В дальнейшем, конечно, они оказали свое обратное влияние на радиотехнику и привели к корректировке и расширению ее теоретических представлений.

Переход на сверхвысокие частоты потребовал серьезных научных исследований этого нового режима функционирования радиотехнических устройств. Причем ученым и инженерам приходилось ставить и решать проблемы, которые в рамках радиотехники или вообще не возникали или имели второстепенное значение. Одна из таких проблем — подавление внешних помех и внутренних шумов при приеме отраженной от «цели»<sup>1</sup> волны. Это было связано в первую очередь с главной задачей любой РЛС — необходимостью точного измерения параметров отраженной волны для определения характеристик «целей» — и потребовало огромных усилий и изобретательности от конструкторов.

В результате были разработаны специальные схемы и устройства, уменьшающие влияние шумов и помех. В аппаратуре системы обнаружения РЛС отраженный от цели сигнал обрабатывается в условиях наличия шумов приемника. Выставление уровня порогового сигнала позволяет отсечь часть шумов, незначительно отклоняющихся от некоего усредненного уровня радиопомех, чтобы не вызвать ложную тревогу. Но, во-первых, при повышении уровня порогового сигнала хотя и уменьшается количество ложных всплесков, но возникает опасность отсечь и полезный сигнал — отраженный от цели, а во-вторых, некоторое «допустимое» число ложных сигналов всегда остается.

Таким образом, в данном случае возникает дилемма между увеличением ограничения шумов с целью уменьшить количество ложных тревог в единицу времени и возможностью обнаружения целей. «Шумы могут возникать как в самом приемнике, так и быть принятыми через антенну. Та часть шумов, которая возникает внутри приемника, является следствием теплового возбуждения электронов» в электрических цепях и электронных приборах самого приемника [83].

Однако подлинный переворот в традиционном (радиотехническом) представлении радиолокационных устройств вызвало применение импульсного метода. Этот метод выходил за рамки привычных представлений и имел важные преимущества, а именно: позволял резко повысить мощность РЛС, давал возможность отслеживать несколько «целей», вести прием и передачу на одну антенну и др. И хотя принцип здесь использовался тот же самый (передача электромагнитной энергии на расстояние), в рамках электродинамической картины мира формировались отличные от радиотехнических частные теоретические схемы. Значимыми становились другие параме-

---

<sup>1</sup> Так в радиолокации называется объект обнаружения.

тры электромагнитных волн (длительность и скважность импульса, конфигурация его фронта, частота повторения импульсов и др.). Эти новые частные теоретические схемы отражали иную реальность, в связи с чем и требовались другие способы ее представления.

В радиотехнике по параметрам электромагнитных колебаний расшифровывается текст сообщения, а в радиолокации по параметрам импульсов определяются характер и координаты «целей», которые регистрируются зрительно (а не слухом) на специальных устройствах совершенного нового типа — радиолокационных трубках (рис. 2.55).

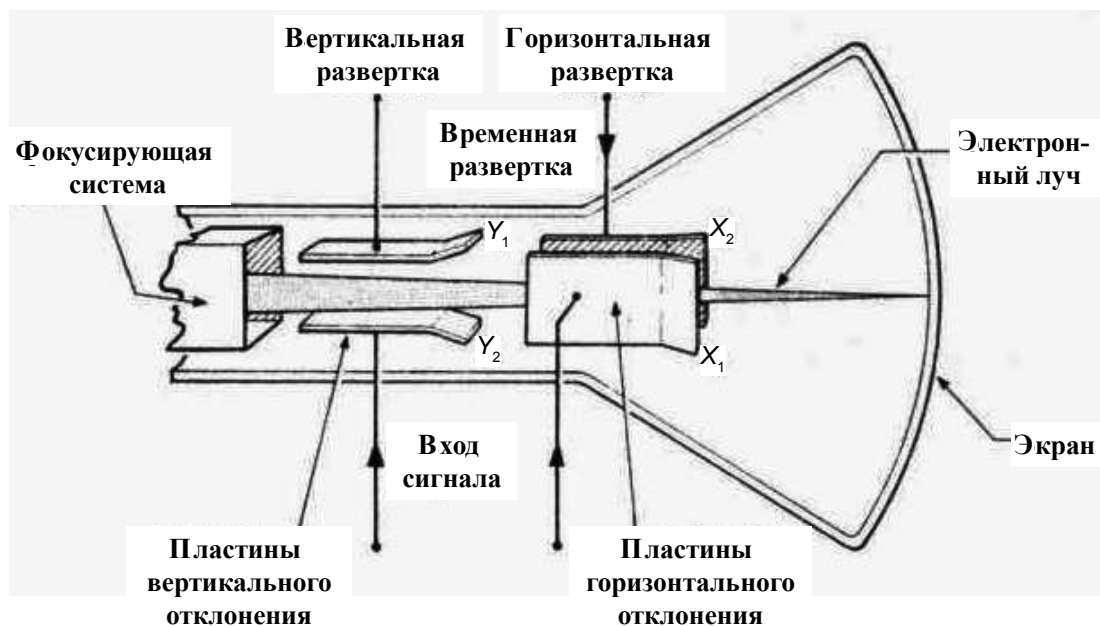
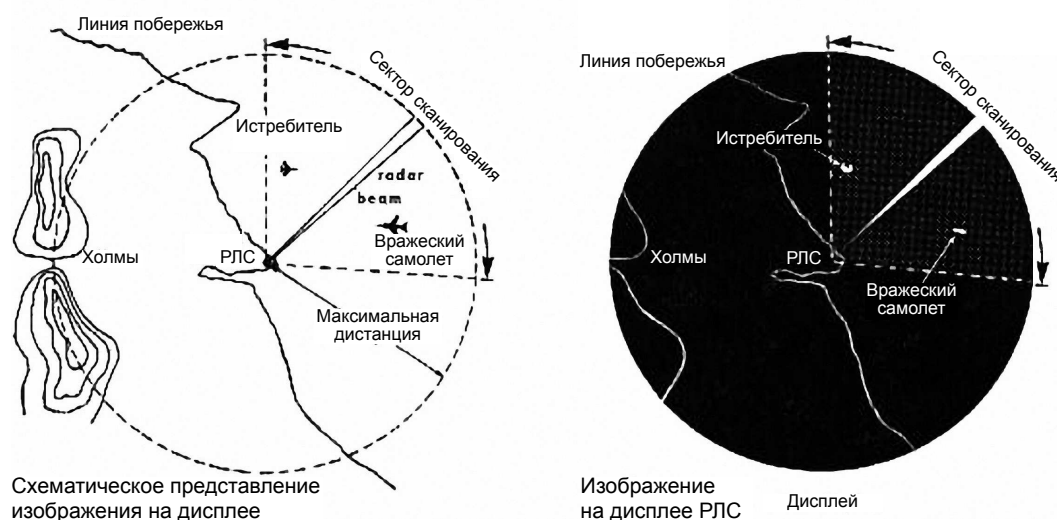


Рис. 2.55. Электронно-лучевая трубка<sup>1</sup>

Как показано на рис. 2.55, пучок электронов, произведенный электронной пушкой, сфокусированный специальным фокусирующим устройством и управляемый отклоняющими пластинами, рисует на люминесцентном (т.е. покрытом флуоресцирующим веществом) экране карту местности с указанием на ней движущейся цели (рис. 2.56).

Кроме того, с изменением режима функционирования этого нового типа радиотехнических устройств постепенно изменились конструктивное оформление РЛС и соответствующие ему теоретические схемы. Если первоначально они строились и изображались по типу разнесенных радиотехнических приемников и передатчиков, то позднее, при переходе на работу с общей антенной сформировались иные структурные схемы РЛС (рис. 2.57).

<sup>1</sup> См.: Radar Theory. — <http://www.radarpages.co.uk/theory/ap3302/sec1/ch4/sec1ch448.htm>



**Рис. 2.56.** Рельеф местности (в данном случае береговая линия и отстоящие от нее на некотором расстоянии холмы) и метка движущейся «цели» — самолет противника (справа от луча локатора) и истребитель собственных ВВС (слева)<sup>1</sup>, высвечиваемый на экране наземной РЛС береговой охраны, сканирующий определенный сектор местности лучом радара при его постоянном круговом движении

Появились и новые блоки, которых не было в традиционных радиотехнических устройствах: антенный переключатель, синхронизатор и индикаторное устройство. Стали разрабатываться новые импульсные схемы (блокинг-генераторы<sup>2</sup>, мультивибраторы<sup>3</sup>, импульсные усилители, пороговые устройства и т. д.), а затем и методы их анализа и синтеза. Для новых элементов потребовалась разработка и их схематического графического изображения в сфере теории.

После того как передатчик послал импульс через антенну, специальное устройство блокирует генератор, а антенный переключатель переводит ее в состояние приема эхо-сигнала, т. е. отраженного от цели импульса, содержащего информацию о местоположении и ха-

<sup>1</sup> Там же.

<sup>2</sup> Блокинг-генератор представляет собой однокаскадный релаксационный генератор кратковременных импульсов с сильной индуктивной положительной обратной связью, создаваемой импульсным трансформатором. Вырабатываемые блокинг-генератором импульсы имеют большую крутизну фронта и среза и по форме близки к прямоугольным — <http://naf-st.ru/main/generator/?blok>

<sup>3</sup> Например, ждущий (или моностабильный) мультивибратор представляет собой электрическую цепь с одним стабильным состоянием. Он используется в РЛС для различных целей, например для генерирования прямоугольных импульсов с точным временным интервалом. Обычное назначение ждущего мультивибратора — получение одиночного импульса заданной длительности.

рактуре цели. Как видно из схемы на рис. 2.57, выходной сигнал от приемника отображается на индикаторе. Чтобы определить положение цели, на индикаторное устройство одновременно направляется импульс от передатчика. Расстояние между этими импульсами и дает информацию о расстоянии до цели. Одновременно от антенны поступает информация о том, в каком направлении ориентирован луч локатора при встрече с целью.

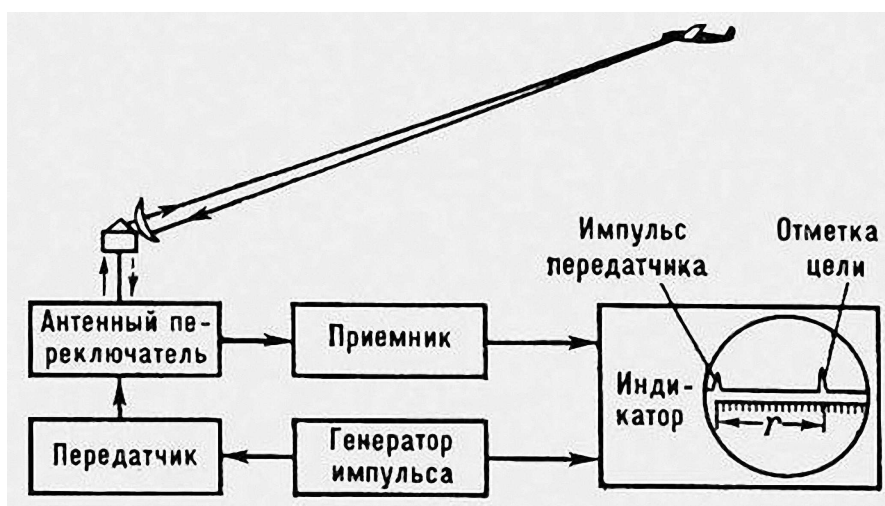


Рис. 2.57. Структурная схема радиолокационной станции<sup>1</sup>

Формирование нового исследовательского направления — радиолокации — в рамках радиотехники как научно-технической дисциплины сопровождалось выходом в свет многочисленных статей и появлением патентов, описывающих принципы действия, аппаратуру и методы работы РЛС, а также становлением промышленной базы для их изготовления. В 1940–1941 гг. были построены и переданы в эксплуатацию несколько опытных образцов РЛС различного назначения, стала осуществляться координация деятельности отдельных исследовательских групп. В СССР, например, в 1938 г. была проведена первая научно-техническая конференция по радиообнаружению.

В 1940 г. между США и Великобританией было подписано соглашение о взаимном обмене научно-технической информацией и опытом разработки РЛС [68]. Начал происходить быстрый переход к серийному производству радиолокационной аппаратуры. С этого времени радиолокация перерастает в отдельную область исследования. На этом этапе ее развития получили уже достаточно детальную разработку новые теоретические схемы, которые, однако, оставались пока лишь частной разновидностью более общих радиотехнических представлений.

<sup>1</sup> См.: Богомолов А.Ф. Радиолокационная станция. — <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/094/937.htm>

**Организационные предпосылки и первые практические результаты.** Первые идеи использования радиолуча для наведения летательных аппаратов относятся к 1904 г. Однако практически эта идея была реализована в разработанном на германской фирме Lorenz A.G. д-ром Е. Крамаром приборе для посадки самолетов. В 1937 г. этой фирмой был запатентован маркерный радиомаяк, в котором использовался разработанный Крамаром наземный передатчик с двумя антеннами, расположенными одна над другой (как показано, например, на рис. 2.58). Эта идея была переоткрыта и использована в США в 1940 г<sup>1</sup>.

Радиолокационная система обнаружения самолетов и наведения на них самолетов-перехватчиков обнаруживает самолет и одновременно измеряет его координаты — дальность, азимут и высоту полета. Для реализации этого метода применяют две антенны, одна из которых имеет диаграмму направленности, узкую по азимуту и широкую в вертикальной плоскости, а другая — диаграмму направленности такой же формы, но отклоненную от вертикальной плоскости на угол, равный 45°. При совместном вращении обеих антенн азимут и дальность объекта определяются посредством первой антенны, а высота — по промежутку времени, через который объект фиксируется второй антенной [85].

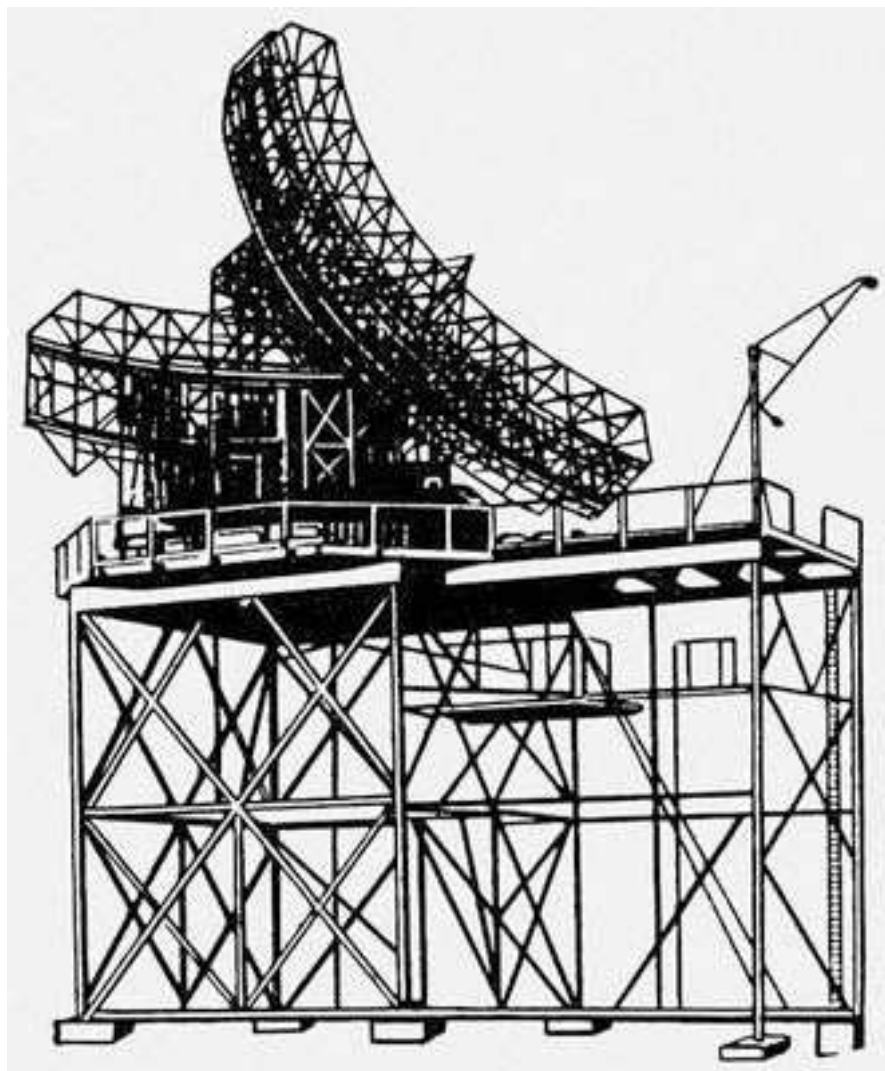
В Англии организатором разработки радиолокационного оборудования стал британский физик Роберт Уоттсон-Уатт. Первый практически применимый радар был создан им в 1935 г. К 1939 г. в Англии была организована цепь радиолокационных станций вдоль южного и восточного побережья для обнаружения агрессора в воздухе и на море<sup>2</sup>. Эта цепь, состоявшая первоначально из пяти РЛС, разнесенных на 40 км друг от друга, сыграла важнейшую роль в начальном периоде войны для защиты Англии от нападения германских самолетов и кораблей.

Перед Уотсоном-Уаттом, возглавлявшим отдел радио в Национальной физической лаборатории, «стояла та же важная проблема, что и перед американцами: как модулировать импульсами передатчик большой мощности. Ему удалось решить ее, и технические характеристики первого же варианта оборудования, разработанного в его лаборатории, оказались настолько хорошими, что после успешной демонстрации в начале 1935 г. Уоттсон-Уатт получил денежные средства, позволившие ему организовать опытное производство».

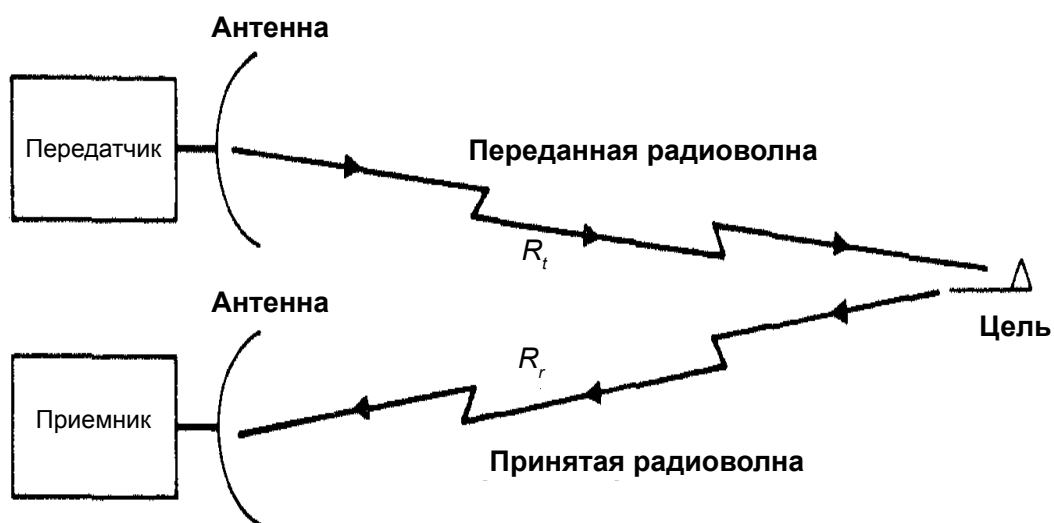
---

<sup>1</sup> History of radio flight navigation systems. — <http://www.radarworld.org/flightnav.pdf>

<sup>2</sup> Alfred Lee Loomis. — <http://www.ob-ultrasound.net/loomis.html>



а)



б)

**Рис. 2.58.** Наземная РЛС обнаружения и наведения самолетов с двумя антеннами: а – внешний вид; б – структурная схема

В дальнейшем лаборатория под его же руководством была переименована в Научно-исследовательский институт радиолокации Великобритании. Вскоре здесь была создана пригодная для использования в военной аппаратуре и относительно технологичная для производства конструкция магнетрона [86].

«В СССР работы по радиолокации развернуты с 1933 г. по инициативе М.М. Лобанова, под руководством Ю.К. Коровина и П.К. Ощепкова. Первые практически использовавшиеся РЛС, действие которых было основано на появлении биений при пересечении самолетом линии “передатчик — приемник”, разработаны под руководством Д.С. Стогова в 1938 г. Импульсный метод был разработан в 1937 г. в Ленинградском физико-техническом институте под руководством Ю.Б. Кобзарева» [87].

В США американские изобретатели Юнг и Тейлор, сначала занимавшиеся методом биений, также переключились на импульсный метод, исходя из следующих соображений:

- электромагнитное излучение на высоких частотах можно использовать для обнаружения и определения местоположения удаленных отражающих объектов;
- излучение должно вестись импульсами длительностью в несколько микросекунд с промежутками между импульсами во много раз большими длительности самих импульсов;
- отраженные объектами импульсы можно принять и воспроизвести с помощью приемной аппаратуры, находящейся в месте излучения;
- расстояние до отражающего объекта можно определить через измерение времени, которое затрачено на распространение импульса до «цели» и обратно;
- направление на объект может быть определено с помощью остронаправленных антенн.

Работа над импульсным радиолокатором была начата 14 марта 1934 г. с закупок серийных осциллографических трубок и супергетеродинного приемника. Первый образец был введен в действие «в апреле 1936 г., а уже через три месяца началась эксплуатация радиолокатора меньших размеров с длиной волны 1,5 м и был успешно испытан антенный переключатель, что позволило использовать общую для приема и передачи антенну. Эти два быстро последовавших друг за другом усовершенствования позволили установить радиолокатор на корабле для испытаний на море, которые успешно прошли в апреле 1937 г.».

В конце лета 1940 г. американское правительство учредило Национальный научно-исследовательский комитет по вопросам обороны, который мобилизовал научные кадры на государственные



нужды в специально созданные новые исследовательские центры. Таким новым центром по радиолокационным исследованиям «стала Лаборатория излучения Массачусетского технологического института, где благодаря тесному содружеству ученых, производственников и военных была успешно проведена разработка радиолокатора на сантиметровых волнах» [88]<sup>1</sup>.

В Германии д-р Ханс Эрик Хольманн, консультант фирмы GEMA, который помогал ей создавать первые современные РЛС, зарегистрировал на свое имя более 300 патентов. Из них 76 были запатентованы в США фирмой «Телефункен», которую он также консультировал. На фирме «Телефункен» была построена РЛС «Вюрцбург», в которой были использованы главным образом изобретения Хольманна.

Работая в лаборатории высокой частоты и электромедицины этой фирмы, которая состояла из 20 ученых, Хольманн разрабатывал технику СВЧ, которая привела к созданию радара... В 1935 г. Хольманн написал первую современную книгу о микроволнах под заголовком «Физика и техника ультракоротких волн». Эта книга получила распространение и использование во всех ведущих странах мира. В его книге приводятся примеры использования микроволн [88].

Однако особо бурное развитие радиолокация переживала в период войны, поскольку она открывала совершенно новые возможности ведения боя и защиты, в особенности воздушного пространства при любых погодных условиях. «Во время Второй мировой войны благодаря РЛС можно было обнаружить и определить место нахождения врага, а существовавшие тогда навигационные системы позволяли летательным аппаратам действовать над собственной территорией и территорией противника без увеличительных приборов визуального наблюдения. Все это стало возможным благодаря почти мгновенной скорости распространения сантиметровых радиоволн. Решающее преимущество и даже превосходство военно-воздушных и военно-морских сил теперь зависело от того, у кого были лучшие радары и техника СВЧ. Поэтому к началу войны во многих странах было начато множество проектов, непосредственно служащих военным целям».

В СССР промышленный выпуск первых РЛС для армии был начат в 1939 г. «Эти станции РУС-1 с непрерывным излучением, модулированным звуковой частотой, располагались цепочкой вдоль неко-

---

<sup>1</sup> Аналогичные разработки велись перед Второй мировой войной на Украине в Харькове. Подробнее см.: *Kostenko A.A., Nosich A.I., Tishchenko I.A.* Development of the First Soviet Three-Coordinate L-Band Pulsed Radar in Kharkov Before WWII. // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2001. Vol. 43. № 3; *Nosich A.I., Poplavko Y.M., Vavriv D.M., Yanovsky F.J.* Microwaves in Ukraine // *IEEE Microwave magazine*, 2002.

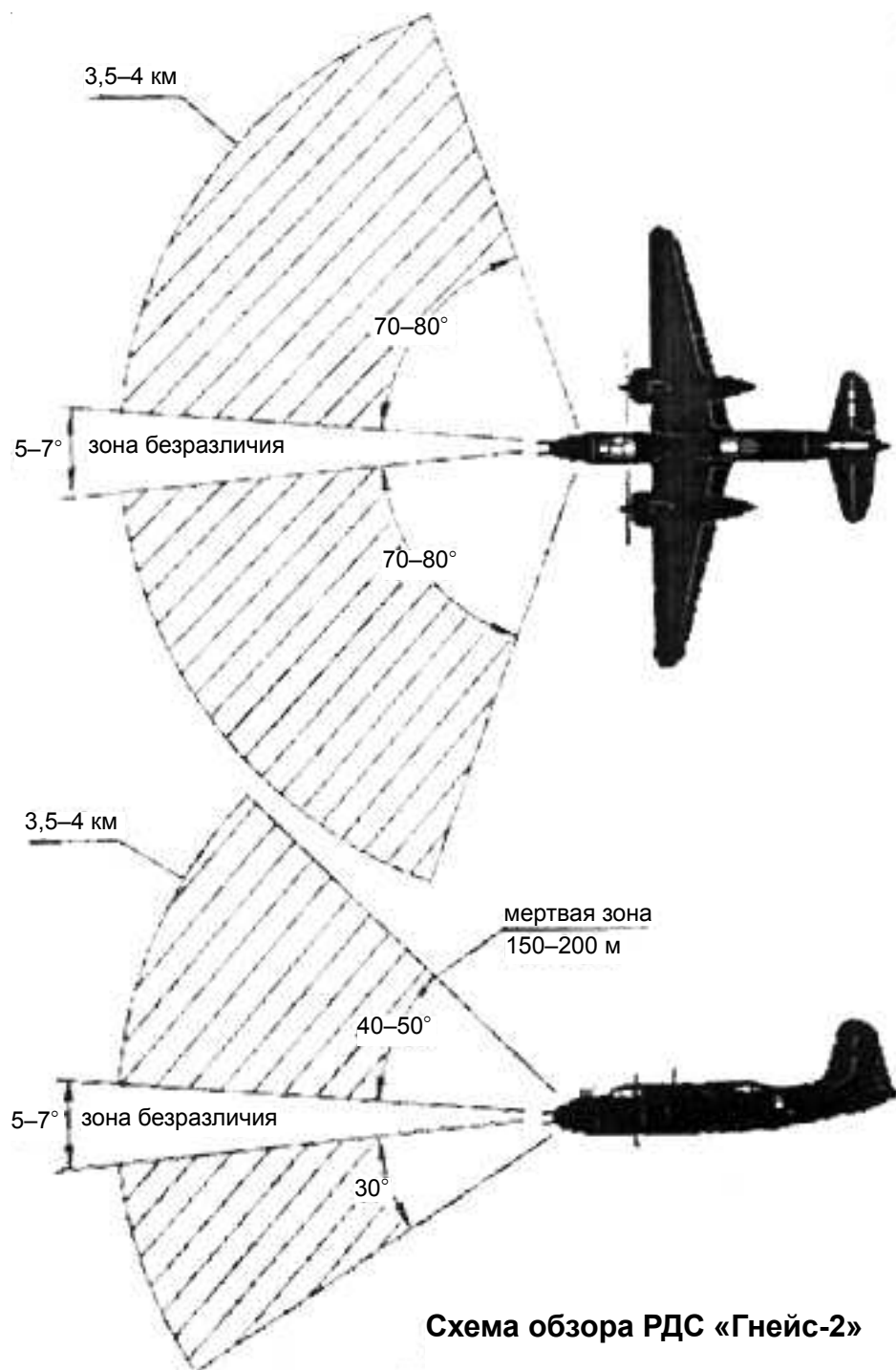
торой линии и позволяли обнаруживать самолет, пересекающий эту линию. Они были установлены на Карельском перешейке во время Советско-финляндской войны 1939–1940 гг. и на Кавказе во время Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. Первая импульсная радиолокационная установка была испытана в 1937 г. Промышленный выпуск импульсных РЛС (РУС-2, “Редут”) начался в 1940 г. Эти станции имели одну приемопередающую антенну и помещались вместе с источником электропитания в кузове автомашины» [85]<sup>1</sup>. Это были прежде всего наземные радиолокационные установки.

Разработка, изготовление и принятие на вооружение самолетных радиолокационных станций были начаты несколько позже. «Летом 1940 г. под руководством начальника группы отделов спецслужб НИИ ВВС (подразделение, занимавшееся специальным оборудованием самолетов и аэродромов)... генерала С.А. Данилина состоялось совещание, на котором рассматривались разнообразные варианты решения проблемы. Наиболее перспективной признали аппаратуру радиообнаружения. Именно станция “Редут”, разработанная в Ленинградском НИИ радиопромышленности, стала прототипом первой советской самолетной РЛС.

Установка этой станции на борту самолета потребовала значительного изменения ее конструкции. Тяжелое и громоздкое оборудование (в наземном варианте оно размещалось на трех автомашинах) не отвечало авиационным требованиям, и начальник отдела НИИ радиопромышленности А.Б. Слепушкин предложил разработать новую аппаратуру сантиметрового диапазона с импульсным режимом работы. Такое решение обещало уменьшить габариты и массу при большей точности обнаружения. Но даже в этом варианте весь комплект оборудования по расчетам весил не менее 500 кг» [89]. Эти РЛС получили кодовое название «Гнейс». К концу 1941 г. первый летный образец самолетной РЛС «Гнейс-2» (рис. 2.59) был изготовлен. Однако первые летные испытания выявили целый ряд недостатков в ее работе, поэтому лишь в 1943 г. было принято решение об оснащении этими станциями ВВС Красной Армии, но до конца войны она не нашла все же массового применения.

---

<sup>1</sup> «Научно-исследовательский институт радиопромышленности и Ленинградский физико-технический институт начали разработку радиолокатора “Редут”, в 1940 г. он был принят на вооружение. Однако к началу Великой Отечественной войны было изготовлено только 12–14 экземпляров этого радиолокатора, и в войну наша страна вступила без радиолокационных войск» (См.: *Мажоров Ю. ЦНИИРТИ 60 лет. Страницы истории // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2003. № 4).*



**Схема обзора РДС «Гнейс-2»**

**Рис. 2.59.** Принцип действия самолетной радиолокационной станции

«Радиолокация, предъявляющая к электронике куда более сложные требования по качеству компонентов и их специфике, чем гражданская связная аппаратура, начинала свое развитие в нашей стране именно при таком уровне слабосточной промышленности, поэтому, несмотря на большой восьмилетний труд многих ученых и инженеров, развернуть серийное производство радиолокационных станций к началу войны не удалось» [86].

### **2.3.3. Радиолокация как область исследования в рамках базовой научно-технической дисциплины — радиотехники**

Второй этап развития радиолокации представляет собой формирование новой области исследования в технической науке — радиотехники. Качественно иной режим функционирования РЛС на сверхвысоких частотах и импульсный режим стимулировали появление новых элементов, блоков и схем. Развитие же импульсной техники и техники СВЧ, в свою очередь, привело к необходимости изучения законов распространения радиоволн дециметрового и сантиметрового диапазонов и закономерностей изменения импульсных процессов, разработки методов расчета, анализа и синтеза новых схемных решений. В радиолокации в практической сфере на этом этапе постепенно формируются новый объект исследования и проектирования — РЛС, а в сфере теории — иные, чем в радиотехнике, структурные схемы.

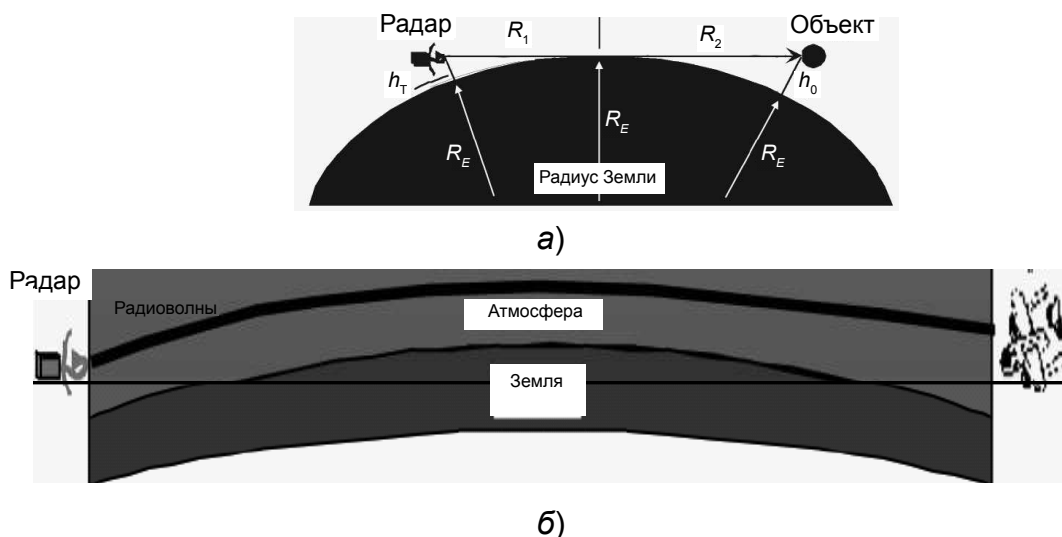
#### ***Формирование оригинальных теоретических схем радиолокации.***

Новые теоретические схемы как бы подслаиваются под схемы базовой технической теории с одновременной их модификацией и развитием. Поэтому в радиолокации имеются три вида взаимосогласующихся теоретических схем, которые могут быть условно названы электротехническими, радиотехническими и собственно радиолокационными. В радиотехнике же были развиты лишь два первых вида.

*Электротехнические* теоретические схемы связаны с исследованием тех физических процессов, протекающих внутри элементов и блоков радиотехнических и радиолокационных устройств, которые связаны с расчетом параметров и отображением процессов протекания электрических токов в стандартных электротехнических элементах: сопротивлениях, конденсаторах, катушках индуктивности. Конечно, они могут быть лишь условно электротехническими. Для описания физических процессов в новых физических элементах, таких, например, как электронные лампы или полупроводниковые приборы, используется электронная теория. Однако для расчета схем, в которые они включены, как правило, применяются традиционные их электротехнические эквиваленты (резисторы, емкости и индуктивности). Поскольку же в элементах и схемах радиолокационных устройств (клистронах, магнетронах, электронно-лучевых трубках, антенных устройствах, различных импульсных схемах и др.), работающих в новых для радиотехники режимах, протекают иные физические процессы, потребовалась модификация старых или разработка совершенно новых методов их расчета и способов представления, привлечение новых математических средств. Это стимулировалось,

кроме того, необходимостью исследования и разработки способов подавления внутренних шумов элементов радиолокационной аппаратуры (скажем, дробового эффекта в электронных лампах).

В радиолокации были трансформированы также и *радиотехнические* схемы, прежде всего за счет расширения диапазона применяемых на практике радиоволн. Изучение законов распространения электромагнитных колебаний сантиметрового и дециметрового диапазонов, стимулированное радиолокацией, позволило выявить новые аспекты электродинамической картины мира, на которую опирается радиотехника. Поскольку же для радиолокации существенным является учет шумов и помех в окружающей среде, отождествление последней со свободным пространством уже не было адекватным задачам, решаемым в радиолокации. Важно было учитывать влияние этой среды на распространение радиоволн, например рефракцию (искривление направления радиоволн, рис. 2.60), дисперсию (зависимость фазовой скорости от частоты), поглощение или рассеяние волн в разных средах и др.



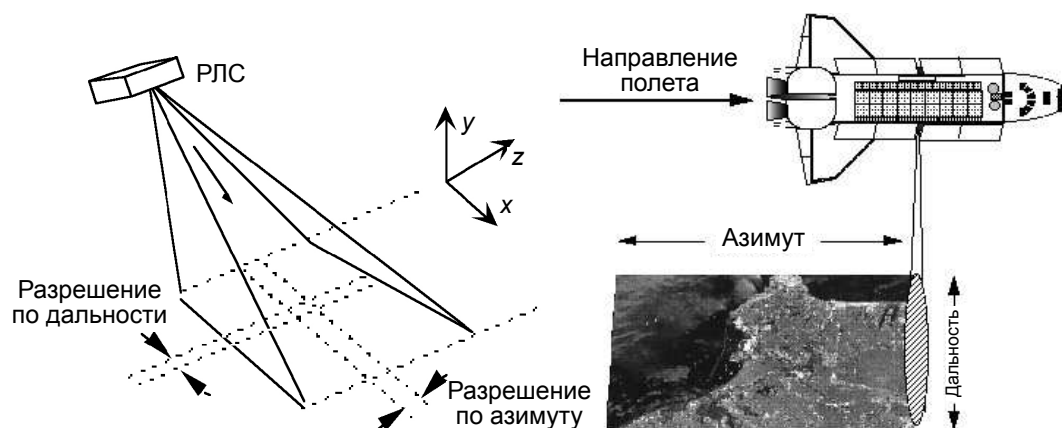
**Рис. 2.60.** Рефракция радиоволн в неоднородной атмосфере (а) и увеличение дальности действия РЛС за счет эффекта огибания Земли электромагнитными волнами (б)<sup>1</sup>

Необходимость обнаружения и опознавания «целей» по характеру влияния их на радиоволны стимулировала исследование рассеивающих свойств различных объектов — зеркальное отражение, диффузное рассеяние, резонансное вторичное излучение. Это привело к формированию новых понятий, способов графического представления данных процессов и их математического описания.

<sup>1</sup> См.: Wiesbeck W. Lecture Script «Radar System Engineering». 13th Edition WS 2006/2007. Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik, Universität Karlsruhe: [www.ihe.uni-karlsruhe.de](http://www.ihe.uni-karlsruhe.de)

Развитие импульсного метода радиолокации и импульсной радиотехники также оказало существенное влияние на формирование новых представлений импульсных процессов (разворачивание исходной радиотехнической схемы) — представлений об их распространении в окружающей среде и о методах формирования, усиления, анализа в импульсных схемах.

Создание собственно *радиолокационных* теоретических схем было связано с разработкой и систематизацией различных методов обнаружения «целей» и измерения их координат, прежде всего выявления движущихся «целей» на карте местности. Поэтому многие понятия и представления радиолокации были заимствованы из геодезии, картографии, навигации (см., например, рис. 2.61). Вводятся специальные понятия поверхности и линии положения, точечной, объемной и распределенной «цели», координат (дальности, азимута и угла места), траектории и радиальной скорости «цели», эффективной площади рассеяния, метки дальности, разрешающей способности радиолокационной станции (по дальности и угловым координатам), точности отсчета, сектора и границы обзора, телесного угла луча и т. д.



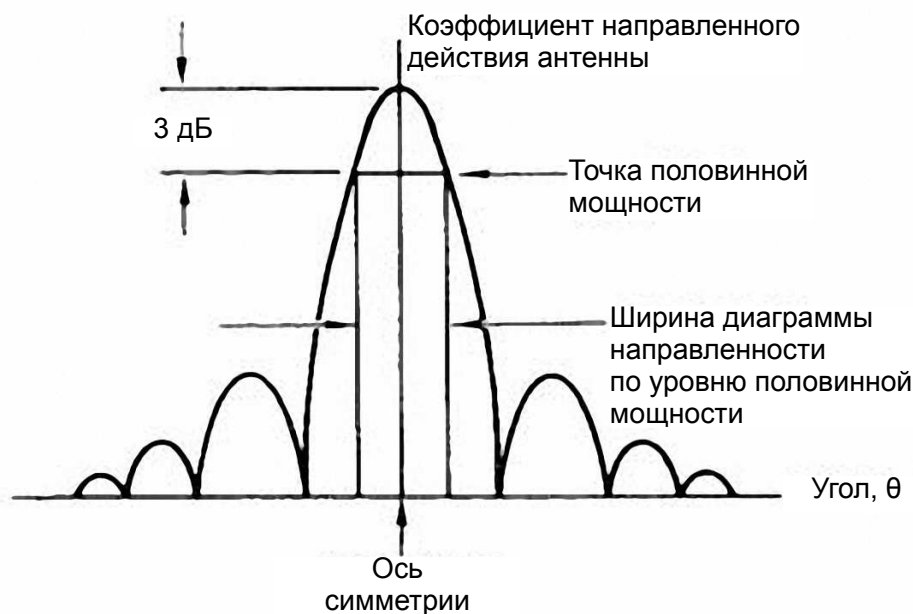
**Рис. 2.61.** Выявление «целей» на карте местности с помощью бортовой РЛС<sup>1</sup>

К данному слою теоретических схем относятся изображения направленного луча различной формы (рис. 2.62), например многолепесткового, и способов его сканирования (слежения за «целью»), основные методы определения местоположения и т. д.

Одна из важнейших задач в радиолокации — специальное исследование ошибок измерения, возникающих под влиянием помех, и методов борьбы с ними. Для решения такого рода задач разрабаты-

<sup>1</sup> См.: Freeman T. What is Imaging Radar? — <http://southport.jpl.nasa.gov/desc/imagingradarv3.html>.

ваются различные типы математических средств и соответствующие им теоретические схемы.



**Рис. 2.62.** Типичная диаграмма радиолокационной антенны<sup>1</sup>

На этапе развития радиолокации в особую область исследования в рамках радиотехники осуществляется создание первых промышленных образцов РЛС, отработка и обобщение их структурных схем. Очевидна общность структуры различных станций — РЛС могут иметь различные конструктивные формы, но все они построены по общему принципу. Одновременно РЛС — это особый тип технической системы, качественно отличный от других радиотехнических устройств<sup>2</sup>. Специфика данных систем как объекта исследования радиолокации определяется, во-первых, изменением роли старых и появлением новых блоков и, во-вторых, иным режимом их функционирования.

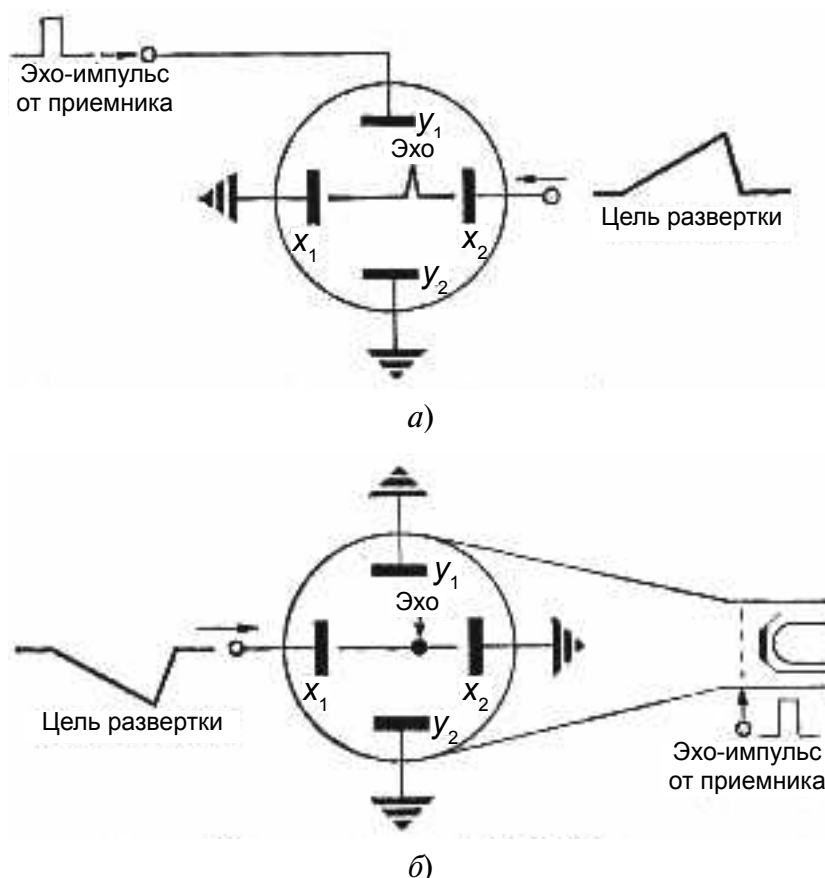
Появившиеся в РЛС новые блоки, которых раньше не было в радиотехнических системах, а также традиционные блоки приобретают совершенно новое значение. Для выполнения основной функции РЛС — обнаружения и измерения координат «целей» оператором — необходимы различного рода индикаторные устройства (прежде всего электронно-лучевые трубки). С ними связаны разнообразные технические средства и приспособления для обработки отраженного от «цели» импульса или непрерывного электромагнит-

<sup>1</sup> См.: *Hovanessian S.A.* Radar system design and analysis. Dedham: Artech House, Inc., 1984, p. 5.

<sup>2</sup> С 1941 г. входит в обиход сам термин «радиолокация» (См.: Радар: Официальная история. М.: Сов. радио, 1946, с. 16).

ного колебания, а также специальные схемы, элементы и устройства для подавления помех. Сложность управления и обеспечения слаженной работы всех блоков РЛС потребовала создания особого блока синхронизации.

Основной функцией радиолокационных теоретических схем является идентификация изображения на индикаторе радиолокационной станции с реальными объектами на фоне местности, выделение (обнаружение) «целей» и определение (измерение) их параметров. Для этого разрабатываются специальные индикаторные (рис. 2.63) и антенные устройства (рис. 2.64), прежде всего для получения определенной формы луча и вида изображения на индикаторе, а также различные методы измерения и расчета координат «целей» (методы минимума и максимума, равносигнальный метод и др.).

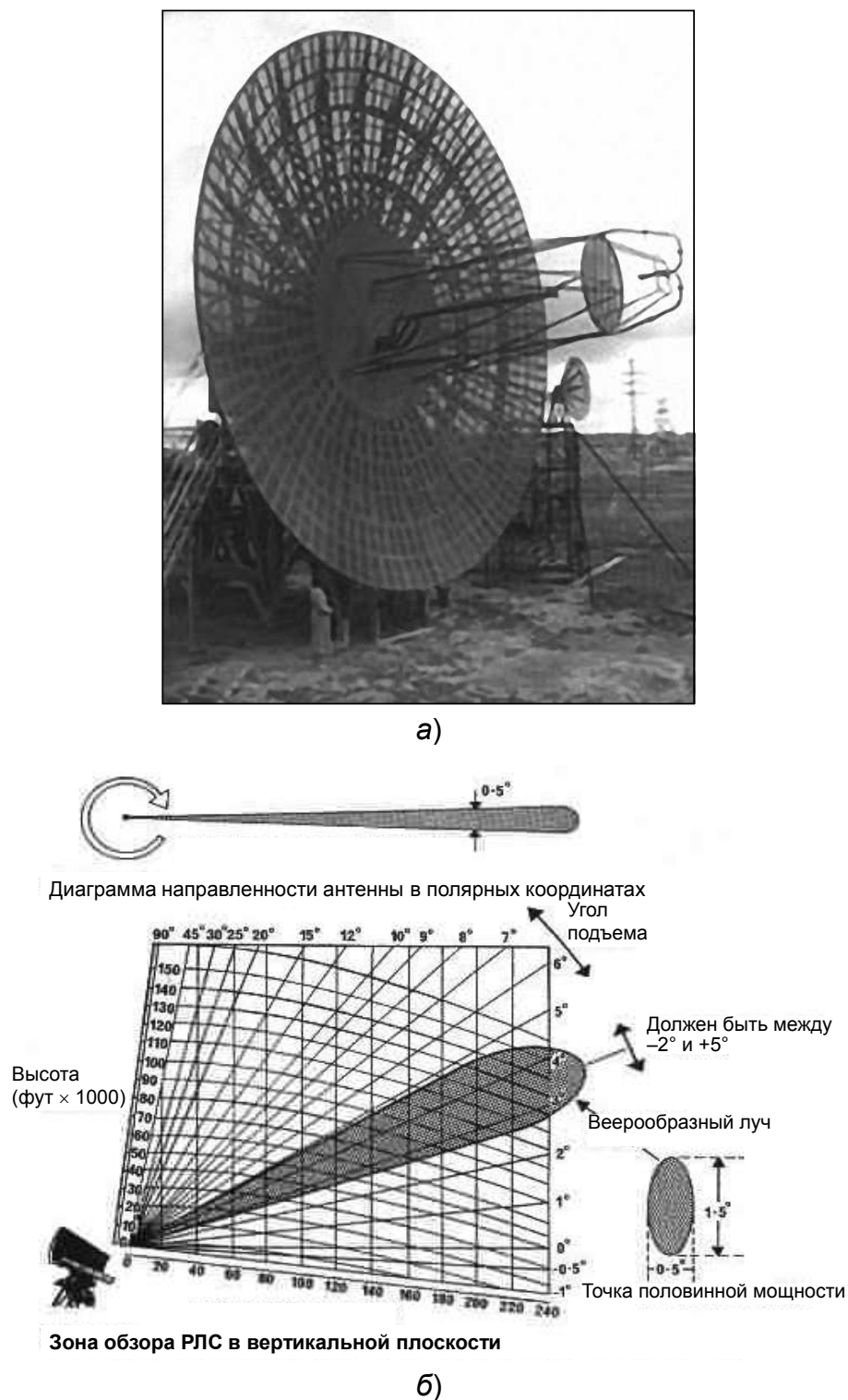


**Рис. 2.63.** Индикация цели: *а* — отклоняющаяся отметка; *б* — темная точка<sup>1</sup>

Одним из неперенных компонентов любого радиоприемника или радиопередатчика является антенна. В радиолокации антенным устройствам придается особенно важное значение. Они становятся весьма сложными и технически изощренными (рис. 2.65).

<sup>1</sup> См.: Radar Theory. — <http://www.radarpages.co.uk/theory/ap3302/sec1/ch4/sec1ch448.htm>

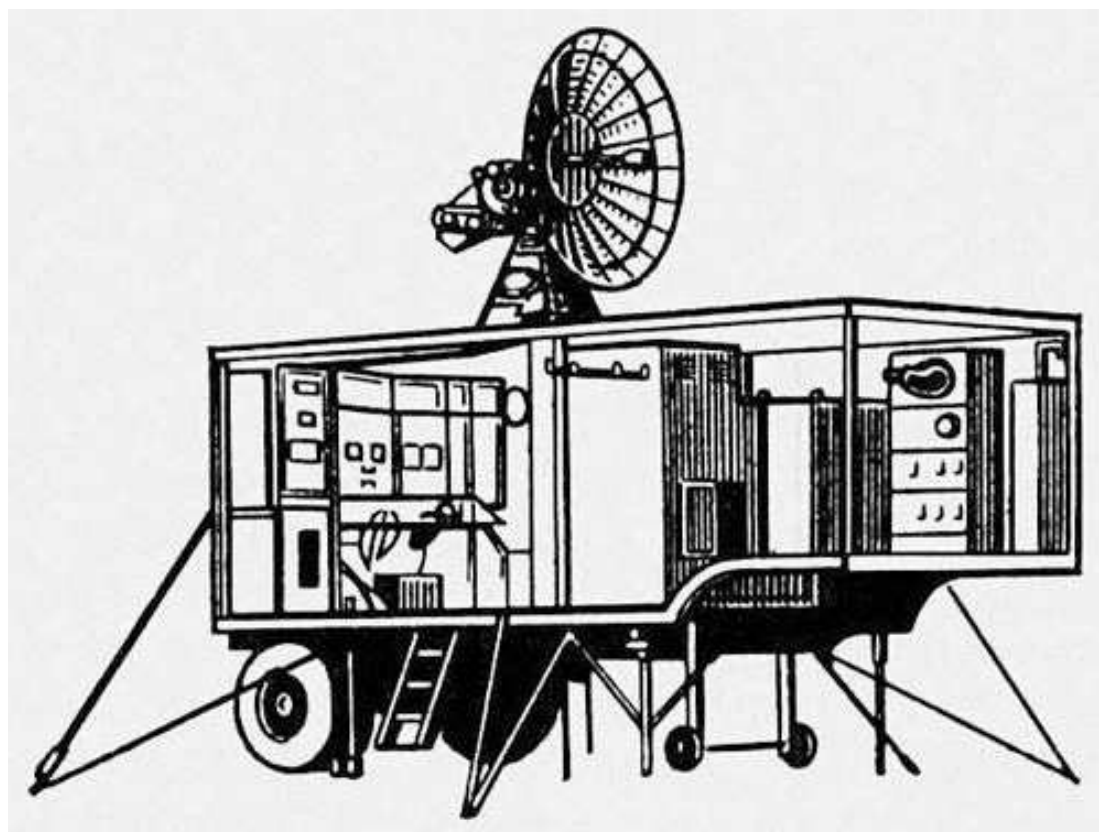




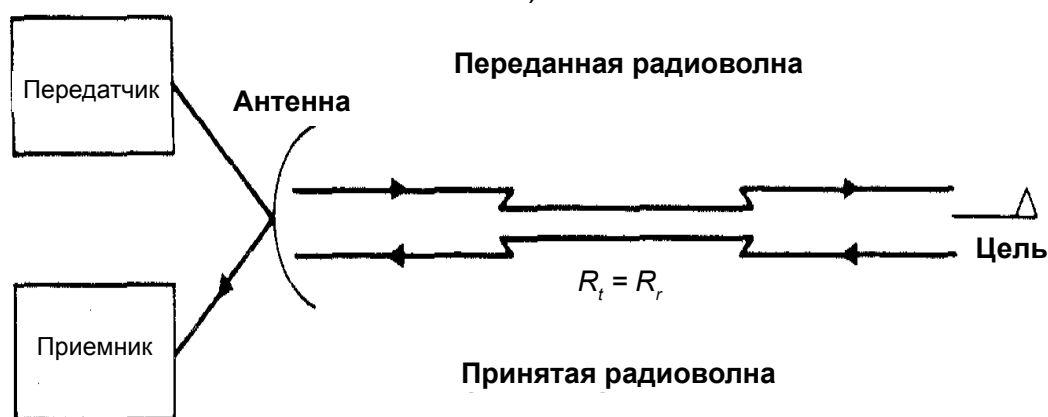
**Рис. 2.64.** Радиолокационная антенна: а — внешний вид<sup>1</sup>; б — сложная диаграмма направленности радиолокационной антенны<sup>2</sup>

<sup>1</sup> См.: Podvig P. History and the Current Status of the Russian Early-Warning System [http://russianforces.org/pdf/Podvig-History\\_and\\_the\\_Current\\_Status\\_of\\_the\\_Russian\\_Early-Warning\\_System.pdf](http://russianforces.org/pdf/Podvig-History_and_the_Current_Status_of_the_Russian_Early-Warning_System.pdf)

<sup>2</sup> См.: Radar Theory. — <http://www.radarpages.co.uk/theory/ap3302/sec1/reqpmr/reqpmr23.htm>



а)



б)

**Рис. 2.65.** Радиолокационная станция с одной антенной [85]:

а — вид внешней подземной РЛС;

б — схема обнаружения цели РЛС с одной антенной

Появляющиеся совершенно новые типы антенных устройств, как, например, фазированная антенная решетка<sup>1</sup>, требуют новых методов расчета и становятся достаточно сложным. В радиотех-

<sup>1</sup> Антенная решетка с управляемыми фазами или разностями фаз (фазовыми сдвигами) волн, излучаемых (или принятых) ее элементами (излучателями).

нических устройствах антенна обычно представляет собой кусок провода достаточной длины. Немецкий инженер Слаби, например, подвешивал антенные провода на воздушных шарах. Маркони и другие изобретатели и производители первых радиопередающих и радиоприемных устройств не имели почти никакого представления о том, какие физические процессы происходят в антенне. Благодаря исследованиям Ф. Брауна и изобретению им рамочной антенны в начале прошлого столетия стала возможной передача сообщений через океан. Но только в радиолокации антенное устройство наряду с индикаторными устройствами приобретает решающее значение.

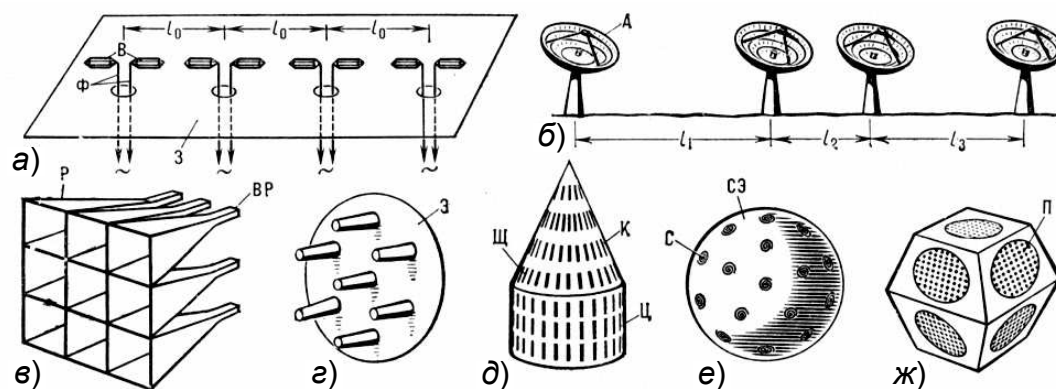
Во-первых, при работе на совмещенную антенну в импульсном режиме антенное устройство становится сложной электромеханической системой, предназначенной для слежения за «целью» и поэтому находящейся в постоянном движении. Она становится фактически сложным антенным блоком, в котором важную роль играет, например, особый антенный переключатель, обеспечивающий переход от передающего к приемному режиму и обратно.

Во-вторых, соединение ее с системами управления зенитным огнем, а затем и противоракетной обороной выдвинули перед учеными и инженерами задачи обеспечения автоматического управления их движением, что привело к развитию сначала аналоговой, а затем и цифровой вычислительной техники.

В-третьих, сама конструкция антенны стала достаточно сложной и потребовались специальные исследования для разъяснения происходящих в ней физических процессов и разработки типовых методов расчета различного рода антенных конструкций, разнообразие которых обусловлено различными типами РЛС, предназначенных для кругового обзора, прицельного бомбометания, для установки на автомобилях или же на самолетах и кораблях.

На рис. 2.66 приведены некоторые конструкции только одного типа таких антенн, что свидетельствует о их действительном многообразии и сложности.

Все эти антенны не только имели разные конструкции, но и рассчитывались по-разному, что требовало развития новых теоретических представлений. Конструирование антенного переключателя (при работе на совмещенную антенну), механических и электромеханических блоков, обеспечивающих движение антенны, отражательных зеркал, излучателей различных типов и т.д. связано с проведением специальных весьма сложных расчетов, т.е. с созданием особого блока частных теоретических схем.

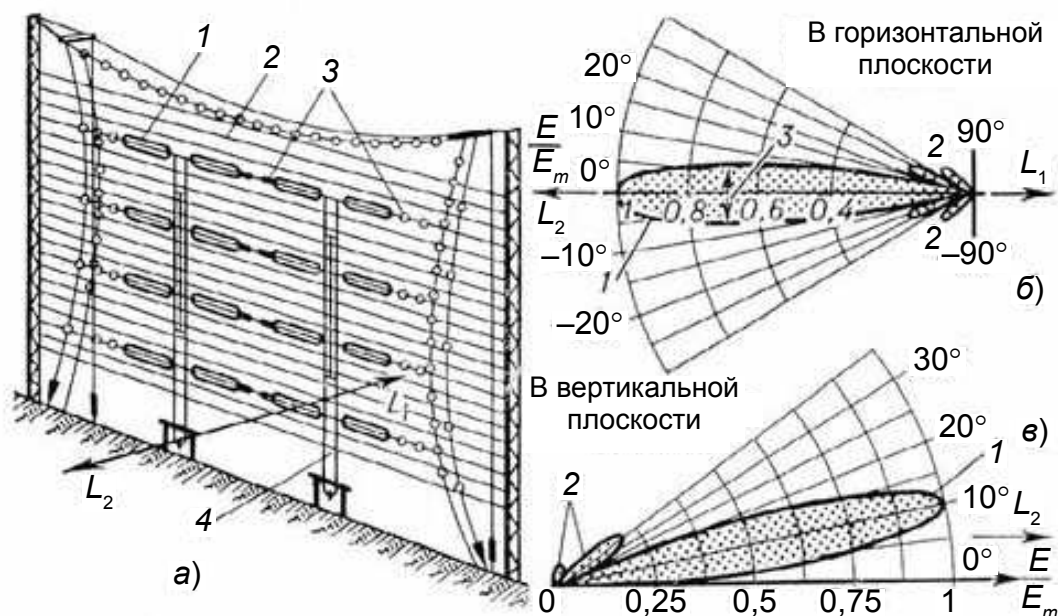


**Рис. 2.66.** Структурные схемы некоторых фазированных антенных решеток: а — линейной эквидистантной с симметричными вибраторами и общим зеркалом; б — линейной неэквидистантной с полноповоротными зеркальными параболическими антеннами; в — плоской с прямоугольным расположением рупорных излучателей; г — плоской с гексагональным расположением диэлектрических стержневых излучателей; д — конформной с щелевыми излучателями; е — сферической со спиральными излучателями; ж — системы плоских фазированных антенных решеток; В — вибраторы; Ф — линии возбуждения (фидеры); З — токопроводящее зеркало (рефлектор); А — зеркальные антенны; Р — рупоры; ВР — возбуждающие радиоволны; Э — металлический экран; Щ — щелевые излучатели; К — коническая ФАР; Ц — цилиндрическая ФАР; С — спиральные излучатели; СЭ — сферический экран; П — плоские фазированные антенные решетки (точками обозначены излучатели);  $l_0$  — расстояние между вибраторами;  $l_1, l_2, l_3$  — расстояния между зеркальными антеннами [90, 91]

Применяемое, например, в фазированных антенных решетках управление фазами позволяет: формировать (при разнообразных расположениях излучателей) необходимую диаграмму направленности (например, остронаправленную — луч); изменять направление луча неподвижной фазированной антенной решеткой и таким образом осуществлять быстрое сканирование — качание луча; управлять в определенных пределах формой диаграммы направленности — изменять ширину луча, интенсивность (уровни) боковых лепестков и т.д. Возможность применения для управления этими антеннами современных средств автоматики и ЭВМ обусловила их перспективность и широкое использование в радиосвязи, радиолокации, радионавигации, радиоастрономии и др. [90].

Другой пример — синфазная антенна, т.е. антенна в виде решетки из излучателей — чаще всего симметричных или щелевых вибраторов, возбуждаемых высокочастотными токами одинаковой фазы, демонстрирует особенность связанных с антенными устройствами теоретических представлений. В направлении, перпендикулярном плоскости решетки, интенсивность излучения максимальна, так

как поля всех излучателей в этом направлении складываются синфазно. Диаграмма направленности синфазной антенны в любой плоскости, перпендикулярной плоскости решетки, состоит из главного лепестка и множества боковых, ширина которых зависит от линейных размеров антенны (рис. 2.67) [92].



**Рис. 2.67.** Синфазная антенна коротких волн: *а* — схема (1 — излучающий элемент в виде диполя Надененко; 2 — аperiодический рефлектор; 3 — изоляторы; 4 — линия питания (снижения), идущая к передатчику); *б* — диаграмма направленности в горизонтальной плоскости (1 — основной лепесток; 2 — боковые лепестки; 3 — ширина диаграммы направленности на уровне 0,7 от максимального); *в* — диаграмма направленности в вертикальной плоскости при идеальной проводимости земли (1 — основной лепесток; 2 — боковые лепестки;  $E$  — напряженность поля;  $E_m$  — максимальная напряженность поля)

Стремительный рост промышленности, развитие массового производства стимулировали унификацию и стандартизацию аппаратуры и схемных решений, а также технической документации. Это оказало сильное влияние на совершенствование структурных схем теоретической радиолокации, формирование в ней нового однородного идеального объекта, облегчающего теоретический анализ и синтез различных технических систем типовыми методами, — идеальной РЛС [93, р. 156].

**Развитие организационных основ радиолокации в военных условиях.** Для формирования научно-технических дисциплин большое значение имеет серийное и массовое производство данного типа технических систем (в случае радиолокации — РЛС), влияющее на развитие слоя структурных схем технической теории, их стандар-

тизацию и унификацию. В рассматриваемый период становления радиолокации как новой области исследования радиотехники начинается тиражирование РЛС различных типов и повсеместное их использование. Тиражирование непосредственно связано с разработкой и совершенствованием технологии изготовления аппаратуры для РЛС, освоением новых технологических приемов, связанных, например, с созданием металлокерамических ламп, повышением качества комплектующих изделий РЛС.

Первые специализированные радиолокационные заводы появляются во время Второй мировой войны: происходит переключение старых радиотехнических заводов на выпуск новой продукции и организация новых заводов и фирм. Однако этот процесс осложнялся тем, что довоенная радиопромышленность в основном выпускала радиовещательную аппаратуру, для чего не требовалось больших производительных и людских затрат. С появлением же радиолокации положение изменилось: во-первых, возникла необходимость параллельной организации сопутствующих и вспомогательных производств, например крупносерийного производства электровакуумных приборов; во-вторых, потребовалась более четкая, чем раньше, кооперация научных исследований, промышленного производства и сферы эксплуатации РЛС, включая ремонт и техническое обслуживание, а также постоянную оценку их работы, выявление и устранение недостатков.

«Техника развивалась так быстро, что производственники часто были принуждены делать серьезные изменения в структуре станций в процессе (уже налаженного. — *Прим. В.Г.*) производства для того, чтобы поспеть за новыми открытиями и учесть уроки боевых испытаний. Инженеры, проводившие испытания станций, часто находились непосредственно в зоне боев и работали совместно с представителями армий, решали задачи ремонта и обслуживания аппаратуры» [68, с. 17].

Производство первых самолетных РЛС было налажено в Англии уже в 1939 г. От нее не отставали и США. «Радиационная лаборатория Массчусетского технологического института, работавшая в этом направлении с 1940 по 1945 г., обеспечила успех союзническим войскам, сделав фундаментальный вклад в проектирование и развертывание микроволновых радиолокационных систем»<sup>1</sup>. И хотя в начале войны германская техника в этой области лидировала, США и Англия к 1942 г. догнали немцев прежде всего благодаря массовой финансовой государственной поддержке развития радиолокационной науки и техники. Одна только Радиационная

---

<sup>1</sup> Robert Hanbury Brown 1916–2002. Radar Personalities. — [http://www.radarpages.co.uk/people/hanbury\\_brown/hanbury\\_brown.htm](http://www.radarpages.co.uk/people/hanbury_brown/hanbury_brown.htm)

лаборатория Массачусетского технологического института получила более двух миллиардов долларов в течение пяти военных лет. Лишь затраты на разработку атомной бомбы в течение Второй мировой войны могут приблизительно быть сравнимыми с финансированием радиолокации [94, р. 52]. Микроволновый комитет Национального исследовательского комитета обороны принял решение о создании специальной лаборатории — Радиационной лаборатории, укрупнив ее штатом физиков из различных университетов и передав в административное управление Массачусетскому технологическому институту, в ноябре 1940 г. Эта лаборатория сконцентрировала свое внимание на разработке радиолокационных систем [95, р. 16]. К началу войны большинство ее проектов имели военную направленность.

Интересной и важной фигурой в период начального развития радиолокационных исследований в США был известный ученый и предприниматель А. Лумис, создавший в своем поместье (Tuxedo Park) недалеко от Нью-Йорка частную лабораторию, где работал сам и приглашал готовых к сотрудничеству с ним ученых для совместных исследований, в частности для разработки микроволнового генератора. Альберт Эйнштейн назвал эту лабораторию дворцом науки. Узнав, что британские ученые приехали в США для проведения совместных исследований в области радиолокации, Лумис пригласил их в свою лабораторию. Ознакомившись с их последней разработкой — магнетроном, он сразу же оценил его огромное значение для дальнейшего развития радиолокации в военных целях. Пятнадцать физиков, часть из которых была рекрутирована из американских университетов и с которыми Лумис имел уже до этого хорошие рабочие контакты, были привлечены им для участия в начальной фазе нового проекта, которую профинансировал лично, а именно покупку оборудования для новой лаборатории и переезд в новое здание. Это и положило начало известной Радиационной лаборатории Массачусетского технологического института.

Целью данного проекта стала разработка бортовой РЛС перехвата, защищенной от нападения с воздуха системы наведения зенитных орудий и навигационной системы дальнего обнаружения<sup>1</sup>. «Правительство США, понимая значение электроники в начавшейся войне, переключило на военные нужды всю американскую радиоэлектронную промышленность, насчитывающую в то время более 110 тыс. работающих. 27 июня 1940 года был создан Национальный исследовательский комитет по вопросам обороны. Из мобилизован-

---

<sup>1</sup> См.: Alfred Lee Loomis: <http://www.ob-ultrasound.net/loomis.html>; Die Tizard Mission. Radarentwicklung — [http://www5.in.tum.de/lehre/seminare/math\\_nszeit/SS03/vortraege/radar/tizardmission.html](http://www5.in.tum.de/lehre/seminare/math_nszeit/SS03/vortraege/radar/tizardmission.html)

ных по всей стране ученых и инженеров формировались исследовательские центры, работавшие на военные цели. На это же были переориентированы крупнейшие американские университеты».

Электронная промышленность США за военный период превратилась в мощную отрасль. В истории американского Комитета по военному производству приводятся красноречивые цифры: «Если в 1941 году общий объем заводских продаж для основных 55 изготовителей радиоаппаратуры составлял 240 млн долл., то в 1944 году объем продаж аппаратуры радиосвязи и радиолокации с учетом производства деталей (электронных приборов) достиг 4,5 млрд долл., что составило рост в 1875%. Число работающих в отрасли достигло 550 тысяч» [96]. «Еще до окончания 1940 года работа американских и британских радиолокационных лабораторий была скоординирована в результате соглашения между правительствами этих двух стран об обмене информацией в военной сфере. Британская техническая миссия<sup>1</sup> в сентябре 1940 г. прибыла в Вашингтон и с этого времени началось взаимное раскрытие британских и американских достижений в области радиолокации. Члены британской миссии посетили Военно-морскую исследовательскую лабораторию, лабораторию войск связи и Радиолобораторию военно-воздушных сил США, а также производственные предприятия, вовлеченную в работу по созданию радара. Они же продемонстрировали свою версию много-резонаторного магнетрона и снабдили (американцев. — *Прим. В.Г.*) проектной документацией, которую промышленные предприятия США смогли сразу же скопировать» [95, р. 15].

10 февраля 1942 г. вышло Постановление ГКО СССР «О промышленной базе для производства приборов радиообнаружения и пеленгации самолетов». В результате в Москве было создано новое предприятие, способное вести новые разработки и выпуск радиолокационной аппаратуры. Сюда же из Ленинграда доставили оборудование для полного цикла производства электровакуумных приборов<sup>2</sup>. «В восьмимесячный срок были созданы два опытных образца СОН-2от — отечественных аналогов английской станции орудийной

---

<sup>1</sup> Эта британская миссия получила название миссии Тризарда по имени ее руководителя (Sir Henry Thomas Tizard). См: *Snow C.P. Science and Government*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1961. — [http://www5.in.tum.de/lehre/seminare/math\\_nszeit/SS03/vortraege/radar/tizard.html](http://www5.in.tum.de/lehre/seminare/math_nszeit/SS03/vortraege/radar/tizard.html).

<sup>2</sup> Из блокадного Ленинграда в октябре 1941 г. была вывезена в Москву группа специалистов НИИ-9 во главе с М.Л. Слиозбергом. 10 февраля 1942 г. на основе этой группы был создан завод № 465 с целью воспроизводства и изготовления аналога СОН GL-МК II. К ноябрю 1942 г. разработку завершили, при этом под руководством Н.Д. Девяткова было воспроизведено около 30 типов электровакуумных приборов — основы СОН.



наводки... Постановлением ГКО от 20 декабря 1942 г. СОН-2от была принята на вооружение и поставлена на серийное производство. В Новосибирске продолжались разработки радиолокационной техники и выпуск небольших серий радиолокационных станций типа РУС-2 и ее модификаций НИИ-20<sup>1</sup>. Довольно успешно шла здесь разработка авиационного радиолокатора. Самолетная станция «Гнейс-2»... была принята на вооружение Постановлением ГКО от 16 июня 1943 г. Чтобы создать условия для изготовления институтом большой партии станций, было принято решение возратить его из эвакуации».

**Совет по радиолокации.** 4 июля 1943 г., за день до начала битвы на Курской дуге, председатель Государственного комитета обороны Иосиф Сталин подписал Постановление «О мероприятиях по организации производства радиолокационной аппаратуры», в соответствии с которым был образован Совет по радиолокации, приступивший к созданию радиолокационной промышленности СССР, начато создание Всесоюзного института по радиолокации, Всесоюзного электровакуумного института, Центрального проектно-конструкторского бюро [97]. Главной стратегической задачей Совета по радиолокации было создание промышленной базы для оснащения армии и флота радиолокационной аппаратурой. «В условиях тяжелой войны, при совершенно неразвитой электронной промышленности и слабом приборостроении решением задач концентрации и специализации военных, научных и промышленных предприятий и организаций разных ведомств, выработкой и воплощением в жизнь неординарных организационных мер мог заниматься только такой орган, каким стал Совет по радиолокации при ГКО... В итоге в сентябре 1943 года ГКО было принято развернутое постановление об организации выпуска средств радиолокации на некоторых заводах авиационной и судостроительной промышленности, о создании новых научно-исследовательских институтов, КБ, главного управления в НКЭП (радиолокационного) и по ряду других, относившихся к радиолокации вопросов».

Это постановление положило начало развертыванию производства радиолокационной техники и очень скоро сказалось на увеличении выпуска РЛС и дополнительно вовлекло в сферу их разработок значительный круг научных, инженерных и производственных

---

<sup>1</sup> «НИИ-20 Министерства электропромышленности, затем — Министерства промышленности средств связи в 1954 г. был переименован в НИИ-244 Министерства радиотехнической промышленности, ныне это — Всероссийский НИИ радиотехники» (см.: *Первов М.А.* Зенитное ракетное оружие противовоздушной обороны страны. Интернет-изд. М.: Изд. Дом «АвиаРус-XXI», 2003. — <http://www.aviarus-21.com/books/pvo/rus>).

кадров. Становилось ясно, что без повышения технического уровня элементной базы и роста мощностей по ее производству, организовать выпуск радиолокационной аппаратуры в количествах, необходимых армии, будет невозможно. «Для решения всех этих задач необходимо было резко увеличивать число проводимых НИОКР по созданию аппаратуры и готовить промышленность к ее выпуску. Для этого требовалась продукция той отрасли промышленности, которая в Советском Союзе практически (именно как промышленность) отсутствовала — электронной»<sup>1</sup>.

В Постановлении Государственного комитета обороны, в частности, было записано:

«Возложить на Совет по радиолокации при ГОКО следующие задачи:

а) подготовку проектов военно-технических заданий ГОКО для конструкторов по вопросам системы вооружения средствами радиолокации Красной Армии и Военно-Морского флота;

б) всемерное развитие радиолокационной промышленности и техники, обеспечение создания новых средств радиолокации и усовершенствования существующих типов радиолокаторов, а также обеспечение серийного выпуска промышленностью высококачественных радиолокаторов;

в) привлечение к делу радиолокации наиболее крупных научных, конструкторских и инженерно-технических сил, способных двигать вперед радиолокационную технику;

г) систематизацию и обобщение всех достижений науки и техники в области радиолокации, как в СССР, так и за границей, путем использования научно-технической литературы и всех источников информации;

д) подготовку предложений для ГОКО по вопросам импорта средств радиолокации» [96].

«Постановление фактически создавало новую для страны комплексную отрасль промышленности — радиоэлектронику. Речь шла именно о создании новой отрасли как единой структуры — отдельные НИИ, КБ, заводы существовали и ранее. Теперь же в одном Главном управлении наркомата электропромышленности объединялись системный Радиоэлектронный институт ВНИИ-108, Электровакуумный институт НИИ-160, Проектно-конструкторское бюро ПКБ-170 (последние два образованы Постановлением), а также пять уже существующих заводов №№ 465, 747, 498, 208 и 830. Впервые были объединены два традиционных направления электроники — компоненты и аппаратура» [Там же].

---

<sup>1</sup> Совет по радиолокации при ГКО. — [http://www.kbpm.ru/Book/Part\\_1/07\\_Sovet\\_RadioLocation.htm](http://www.kbpm.ru/Book/Part_1/07_Sovet_RadioLocation.htm)

Значимость и эффективность работы этого органа управления объяснялась тем, что постоянными его членами стали народные комиссары оборонных отраслей промышленности. «Заместителем председателя Совета был утвержден Аксель Иванович Берг<sup>1</sup>, который и осуществлял каждодневное научное и организационное руководство. До октября 1944 г. Аксель Иванович, оставаясь в должности замнаркома, осуществлял руководство всей радиопромышленностью, которая входила в Наркомат электропромышленности. В аппарате Совета постоянно работали специалисты высокого класса, их авторитет в среде советских радиоинженеров был общепризнан» [98].

Становление радиолокации как новой области исследования в рамках радиотехники может быть охарактеризовано следующим образом. Если на стадии формирования исследовательского направления радиолокацией занимались лишь отдельные разрозненные исследовательские группы и лаборатории, то в рассматриваемый период происходит стремительный количественный рост числа исследователей и разработчиков РЛС. Разработки, которые проводились ранее, характеризовались тем, что они осуществлялись разрозненными группами инженеров в различных странах, относительно изолированных друг от друга. С ростом их числа возникает необходимость централизованной координации проводимых ими исследований и разработок (по крайней мере в национальном масштабе).

В США уже в 1940 г. организуется Научно-исследовательский комитет обороны (National Defense Research Committee – NDRC), в задачу которого входит координация исследовательской работы по механизмам и устройствам военного применения. В 1941 г. был переименован в Управление научных исследований и разработок (Office of Scientific Research and Development – OSRD). Управление – это федеральная служба правительства США, специально созданная в мае/июне 1941 г. для координации научных исследований в оборонных целях в течение Второй мировой войны и распущенная в декабре 1947 г. Оно имело почти неограниченный доступ к капиталам и ресурсам под покровительством В. Буша, который бы подотчетен только лично президенту Ф. Рузвельту. В 1940 г. учреждается также Микроволновый комитет для изучения и применения микроволн в радиолокации.

---

<sup>1</sup> Аксель Иванович Берг – наиболее знаменательная фигура в истории радиолокации и радиотехники в целом: глубокий ученый и прекрасный администратор, действительный член Академии наук СССР и адмирал, заместитель председателя Совета по радиолокации, министр и в то же время директор ведущего НИИ. Его учебник «Общая теория радиотехники» был одним из первых в России.

В сентябре 1943 г. был создан Всесоюзный научно-исследовательский институт радиолокации (НИИ-108 — ныне ЦНИРТИ), который непосредственно подчинялся Совету по радиолокации. Его директором стал А.И. Берг. «В 1944 году в институт перевели 29 сотрудников из ОКБ при Всесоюзном энергетическом институте, создателей первого импульсного радиолокатора П.А. Погорелко и Н.Я. Чернецова, группу ученых МГУ, академиков Б.А. Введенского и В.А. Фока, а также член-кор. АН СССР М.А. Леонтовича, доктора физ.-мат. наук С.Г. Калашникова и других специалистов-радиотехников. К 1 декабря 1944 года в институте числилось уже 542 сотрудника, из них 247 — инженерно-технического состава... С 1943 по 1945 год в институте было выполнено 64 НИР и ОКР» [97]<sup>1</sup>.

Таким образом, в этот институт были собраны «видные ученые и инженеры, имевшие за плечами опыт научных исследований и разработок в области радиофизики и радиотехники высоких частот. Их силами велись работы в области распространения, генерирования и приема ультракоротких волн, исследовались и разрабатывались элементы радиоаппаратуры, начиная от антенных устройств и кончая источниками питания, создавалась радиоизмерительная техника, испытывались новые образцы. Шла также интенсивная работа в области электроники, а впоследствии и полупроводников».

Для выработки научно-технической программы развития радиолокации было необходимо изучать зарубежный опыт. «Использовались как возможности изучения техники, поступавшей от союзников по лендлизу, так и работа научно-технической разведки... От нескольких агентов из числа инженерно-технического персонала, занимавшего руководящие должности на заводах и в лабораториях компаний RCA, Western Electric, Westinghouse, General Electric США советская разведка получила более двадцати тысяч страниц секретной документальной научно-технической информации по электронике,

---

<sup>1</sup> Решением Совнаркома СССР от 25 ноября 1943 г. в НИИ-108 была переведена лаборатория ЛФТИ Юрия Кобзарева. Здесь же разместилось Центральное проектно-конструкторское бюро, которому была поручена разработка общих систем применения радиолокационной техники. Основными задачами НИИ-108 стали: разработка образцов новых РЛС, освоение техники сантиметровых волн и разработка аппаратуры, работающей на этих волнах, проведение научно-теоретических и экспериментальных работ по изучению распространения, отражения и рассеивания ультракоротких и сантиметровых волн, изучение всех процессов, происходящих в радиолокационных устройствах, и разработка теоретических основ и методов расчетов, освоение дециметровой и сантиметровой вакуумной техники (См.: *Первов М.* Зенитное ракетное оружие противовоздушной обороны страны. — <http://www.aviarus-21.com/books/pvo/rus/017.htm>).

в том числе по новейшим в то время типам радаров, гидролокаторам, системам наводки, радиовзрывателям, компьютерам и многим другим устройствам. Были получены секретные материалы о технологии производства и образцы клистронов, магнетронов и других электровакуумных приборов... Материалов, полученных по открытым и закрытым каналам, было так много, что для их обработки при Совете был создан специальный отдел, после войны преобразованный в Бюро новой техники. В начале 1945 года был также создан Научно-технический совет, главной задачей которого было определять научно-техническую политику в развитии радиолокации, отвечавшую, с одной стороны, нуждам армии и флота, а с другой — возможностям науки, техники и промышленности» [99]<sup>1</sup>.

К середине 1940-х гг. решается также задача систематической подготовки кадров для радиолокации, главным образом операторов и технического обслуживающего персонала. Были созданы кафедры радиолокации в различных высших учебных заведениях.

Ю.Б. Кобзареву, возглавившему научный отдел Совета по радиолокации при ГКО, летом 1943 г. было поручено организовать на радиотехническом факультете Московского энергетического института учебную кафедру по радиолокации. Ю.Б. Кобзарев<sup>2</sup> — один из основоположников отечественной радиолокационной техники — заведовал этой кафедрой в 1944—1955 гг., был создателем ее центрального курса — «Теоретические основы радиолокации».

В 1944 г. была организована кафедра радиолокации в МАИ, ее заведующим стал А.Г. Сайбель. В сентябре 1945 г. была организована кафедра радиолокации (сейчас — кафедра радиосистем) в Ленинградском электротехническом институте (ЛЭТИ). Первым заведующим кафедрой стал В.А. Гуров, а первый учебный план по специальности кафедры был подготовлен профессором И.В. Бреневым, который внес большой вклад в становление и развитие этой кафедры.

---

<sup>1</sup> Совет по радиолокации при ГКО. — [http://www.kbpm.ru/Book/Part\\_1/07\\_Sovet\\_RadioLocation.htm](http://www.kbpm.ru/Book/Part_1/07_Sovet_RadioLocation.htm). «Совет по радиолокации сводил в единый план заявки заказчиков на исследования и разработки, оставляя в нем наиболее важные, одобренные Научно-техническим советом (НТС), и определял научно-техническую политику развития радиолокации, отвечавшую, с одной стороны, нуждам армии и флота, а с другой — возможностям науки, техники и промышленности».

<sup>2</sup> Юрий Борисович Кобзарев — один из основоположников отечественной радиолокационной техники. С 1950 по 1960 г. работал начальником отдела в НИИ-20. В 1954 г. в его лаборатории была разработана первая в стране когерентная радиолокационная станция дальнего обнаружения с защитой от пассивных помех (РЛС «Тропа»), которая находилась на вооружении армии до 1980 г.

Однако действительная организация подготовки исследователей и разработчиков относится к следующему этапу развития радиолокации как самостоятельной научно-технической дисциплины.

#### **2.3.4. Радиолокация как самостоятельная научно-техническая дисциплина**

К началу 1950-х гг. сформировалось целое семейство научно-технических дисциплин, ориентированных на электродинамическую картину мира. «В начале 50-х годов получил всеобщее признание термин “радиоэлектроника”... Радиоэлектроника объединяет комплекс многих отраслей знания, родившихся из радиотехники и электроники. К радиотехнике относят радиосвязь во всех ее видах: радиовещание, телевидение, радионавигацию, инфракрасную сигнализацию, радиоастрономию, радиометеорологию, радиоспектроскопию, радиотелемеханику, промышленную электронику, ЭВМ, электровакуумную и полупроводниковую технику и т. д.» [100, с. 645–646]. Именно в рамках радиоэлектроники и сформировалась радиолокация как новая научно-техническая дисциплина.

Наиболее важным достижением данного этапа является развитие специфического математического аппарата — статистической радиолокации. Потребность в создании теории радиолокации, которая устанавливала бы основные закономерности и критерии качества любых радиолокационных станций, привела к развитию вероятностного подхода к решению ее задач, к разработке на ее основе новых методов обработки и синтеза сигналов. Задача выделения сигнала в шумах является статистической и может быть решена только методами теории вероятностей. Прием сигналов стал рассматриваться как статистическая задача сначала в радиолокации, а затем и в радиотехнике. В теоретической радиолокации были сформулированы статистические критерии обнаружения, а для описания свойств радиолокационных целей стали использоваться статистические методы [101–107].

Главный вклад в развитие статистической радиолокации внесли американский ученый К. Шэннон и советский ученый В.А. Котельников.

В 1948 г. Шэннон опубликовал свою знаменитую книгу по математической теории коммуникаций. Исследования в этой области он начал с рассмотрения фундаментальной проблемы — как возможно точно или приблизительно воспроизвести в одном пункте приема

сообщение, высланное из другого пункта. Построенная им теория нашла непосредственное применение у инженеров и стимулировала развитие современных коммуникационных технологий, с которыми мы связываем развитие современного информационного общества. Наиболее важное значение эта задача приобрела в связи с необходимостью отделения полезного сигнала от шума в процессе работы радиолокационных станций и обнаружения целей на фоне помех. Естественно, что многие теоретические проблемы, рассматриваемые в это время Шэнноном, были связаны с практическими задачами военного времени организации надежной и недоступной противнику связи<sup>1</sup>.

Аналогичные задачи решал и В.А. Котельников в СССР. «В этот период он разрабатывает методы борьбы с помехами в системах радиосвязи и вносит существенные усовершенствования в методы приема слабых сигналов. Результаты этих исследований и развитые им новые идеи в области приема радиосигналов были обобщены им еще в 1947 г. в докторской диссертации, в которой были развиты ставшие классическими представления и основополагающие идеи по теории помехоустойчивости. Котельников первый ввел понятие “потенциальная помехоустойчивость”. Теория потенциальной помехоустойчивости определяет предельные возможности приема сигналов при наличии шумов, она раскрывает природу физических ограничений на чувствительность приемных устройств и сегодня является одним из основополагающих трудов при разработке новых помехоустойчивых средств радиосвязи, систем радиолокации, телеуправления и других радиоустройств»<sup>2</sup>.

В.А. Котельников один из первых применил теорию вероятностей для решения практических задач радиолокации (например, исследования эффективности систем разнесенного приема сигналов в многолучевом канале). Один из фундаментальных разделов современной теории связи основан на классической работе В.А. Котельникова «Теория потенциальной помехоустойчивости». Эта работа была представлена в декабре 1946 г. в Ученый совет МЭИ в виде докторской диссертации и успешно защищена в январе 1947 г. Ее рукопись находилась в библиотеке НИИР с момента образования института (1949 г.) [108]. В широкой печати на русском языке она была опу-

---

<sup>1</sup> Кроме того, Шэннон опубликовал в 1949 г. статью под названием «Communication Theory of Secrecy Systems». Эту работу рассматривают сегодня как основополагающую с точки зрения превращения криптологии из искусства в науку.

<sup>2</sup> Гуляев Ю.В. Краткая научная биография академика В. А. Котельникова — <http://www.cplire.ru/koi/Kotelnikov/index.html>

бликована лишь в 1956 г., а на английском — в 1959 г. [106]<sup>1</sup>. В этой же работе предлагался совершенно новый для инженеров подход к созданию техники — в нем использовался математический аппарат теории вероятности.

Одним из разделов была теория оптимальной оценки параметров передаваемых сигналов. В.А. Котельниковым была показана принципиальная возможность повышения помехоустойчивости приема сигналов без увеличения их энергии, длительности и ширины спектра. Он дал геометрическое толкование полученных им результатов и сделал весьма важный в теоретическом и практическом отношении вывод, что при любых видах модуляции «...чрезмерное увеличение помехоустойчивости для малых помех без увеличения удельной энергии сигнала, ширины его спектра и длительности должно обязательно сопровождаться увеличением вероятности аномальных ошибок...» [109].

Таким образом, к этому времени в теоретической радиолокации сформировались два слоя взаимно скоррелированных теоретических схем, отражающих соответственно электродинамические процессы и их статистические модели (математические схемы). В первом случае изучаются законы вторичного излучения конкретных излучателей в зависимости от соотношения их размеров и длины волны, поляризации облучающего поля, ориентации относительно радиолокатора, геометрической формы и материала облучаемой поверхности. Во втором случае исследуются статистические характеристики поля вторичного излучения при случайной ориентации одного или совокупности вторичных излучателей с учетом особенностей их движения. Эти характеристики существенно влияют на статистическую оценку предельной дальности изменения координат и параметров движения цели [110, с. 24].

Скажем, так называемая «рэлеевская цель», с одной стороны, представляет собой объект математической статистики (т.е. определенную математическую схему, в соответствии с которой дается классификация различных «целей»), адекватный определенному виду вероятностного распределения — распределению Рэля, а с другой — имеет четкий электродинамический коррелят. Физически такую цель можно представить в виде одного большого рефлектора,

---

<sup>1</sup> В 1959 г. в США был издан перевод книги В. А. Котельникова «Теория потенциальной помехоустойчивости». В рецензии на нее профессор Стенфордского университета Н. М. Абрамсон отметил приоритет Котельникова в создании теории оптимального приема сигналов, в применении методов многомерной геометрии для интерпретации проблем, связанных с приемом сигналов на фоне шума, а также в исследовании проблем нелинейной фильтрации сигналов на фоне шума с неравномерным спектром» [109].



дополненного другими небольшими объектами, отраженные сигналы от которых взаимодействуют с основным отраженным сигналом, усиливая или ослабляя его. Рэлеевскую цель можно представить как бы состоящей из большого количества отражающих элементов сравнимых размеров [93, с. 32]. Точно так же строятся математические модели ошибок и шумов. Скажем, «нормальный шум» используется в качестве основной модели помехи в силу простоты его математического описания.

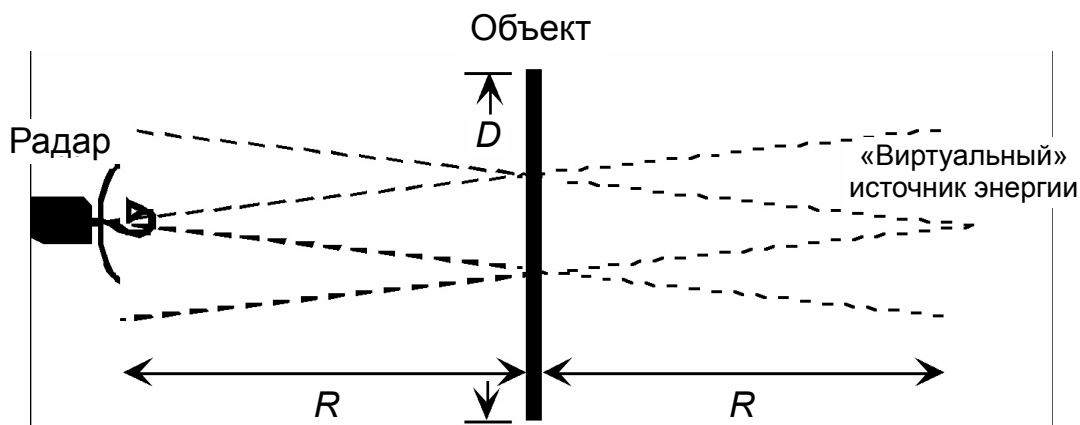
В рассматриваемый период в теоретической радиолокации были разработаны процедуры анализа и синтеза теоретических схем РЛС. Задача анализа качества работы различных конкретных видов радиолокационных устройств сводится к исследованию сложных процессов их функционирования при воздействии на них сигнала, смешанного с шумами и помехами. Задача синтеза радиолокатора сводится к нахождению оптимальной с точки зрения того или иного применяемого статистического критерия математических операций над принимаемым сигналом и к построению функциональной схемы, выполняющей эти операции [105, с. 3]<sup>1</sup>. Например, для характеристики зондирующего сигнала часто используется функция автокорреляции, которая позволяет выбрать его параметры и методы обработки. Разработка методов анализа и синтеза многопараметрических РЛС осуществляется на основе обобщенной функции неопределенности.

Примененные в радиолокации методы позволили сравнивать РЛС, отличающиеся по назначению, параметрам и конструктивному оформлению с единых позиций. С этой целью строится однородный абстрактный объект радиолокации — «идеальная РЛС», относительно которой формулируются основное уравнение дальности радиолокации, а также уравнения, определяющие ее рабочие характеристики. Данный шаг в развитии технической теории является очень важным.

Основное уравнение дальности радиолокации, как правило, сначала формулируется для точечной цели, которая является одной из важнейших идеализаций теоретической радиолокации. Точечной целью называется такая цель, которая намного меньше, чем облучаемая радаром поверхность. Однако затем основное уравнение радиолокации формулируется относительно расширенной цели или их группы (рис. 2.68).

---

<sup>1</sup> Например, В.А. Котельниковым в его докторской диссертации была поставлена и решена совершенно новая для теории связи проблема синтеза оптимального устройства приема (которая заключается в нахождении оптимального алгоритма обработки принимаемого сигнала) исходя из известной формы переданного сигнала и статистических характеристик воздействующих на прием шумов [109, с. 43].



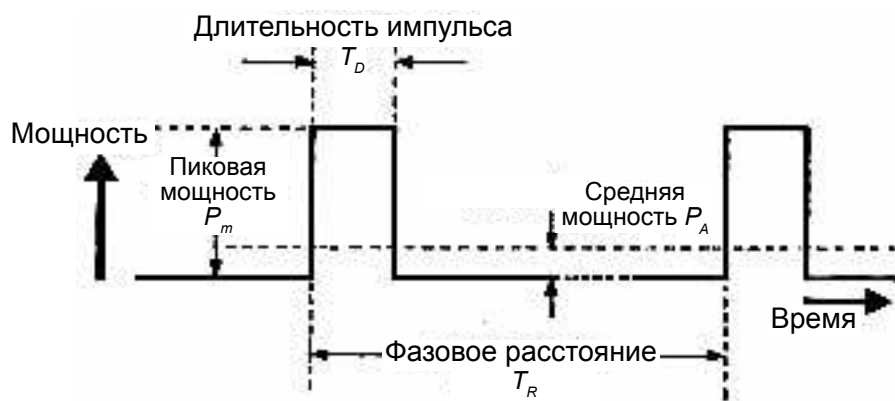
**Рис. 2.68.** Отражение от поверхности расширенной цели. Зеркальное отражение является отношением «виртуального» источника энергии к расстоянию  $R$  за пределами цели [111]

С помощью посланного от радара сигнала или серии сигналов может быть получена следующая информация: расстояние или дальность до цели, вектор скорости или скорость ее движения, направление движения цели, азимут и изменение азимута во времени, размер цели и т. д. Измерение этих параметров осуществляется различными методами. Например, дальность измеряется по временному сдвигу между эхо-сигналом и эталонным сигналом. В качестве эталона берется маркированный сигнал от передатчика, время посылки которого запоминается в приемнике [111, р. 13–19]. Уравнение дальности РЛС для активной радиолокации является математическим выражением таких отношений параметров РЛС в их базисной форме, как мощность передатчика, коэффициент усиления антенны, длина волны, эффективная площадь отражения цели, расстояние до цели и выходная мощность приемника. Основное уравнение радиолокации может быть модифицировано с учетом и других факторов, таких как чувствительность приемника, обработка сигнала, затухание из-за обтекателя антенны, затухание из-за атмосферных потерь или выпадения осадков, а также различных иных потерь и эффектов распространения энергии [112].

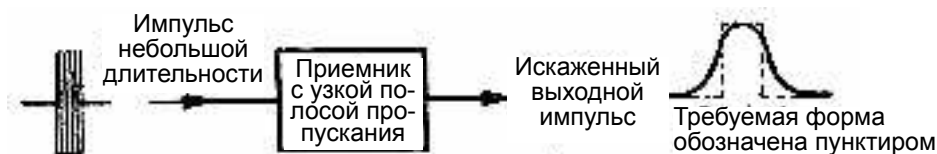
Еще одной важной идеализацией в теоретической радиолокации является идеализированное представление сигнала. В импульсной РЛС выходной импульс всегда искажен. Теоретическая радиолокация исходит из необходимости компромисса с инженерной практикой, что вообще характерно для технических наук. «Большая дальность действия РЛС является несовместимой с ее хорошей разрешающей способностью по дальности, высокой точностью и высокой скоростью сканирования. Крутизна и малая длительность импульса являются необходимыми, но это одновременно означает увеличение

ширины полосы пропускания и возрастания фактора шума. Если же сузить полосу пропускания, то это приведет к искажению импульса. Все эти конфликтующие между собой требования рассматриваются в процессе проектирования РЛС. В результате РЛС, спроектированная для выполнения одной роли, имеет мало ценности для исполнения другой.

Каждое приложение требует различных вариаций всех изменяемых факторов... Форма сигнала, показанная на рис. 2.69, является «идеальной», т.е. имеет нулевое время нарастания и затухания. На практике любой импульс имеет несколько закругленную форму, поскольку у него конечное время нарастания и затухания» (рис. 2.70). Однако идеальная форма сигнала является адекватной для целей теоретического представления и проведения математических расчетов<sup>1</sup>.



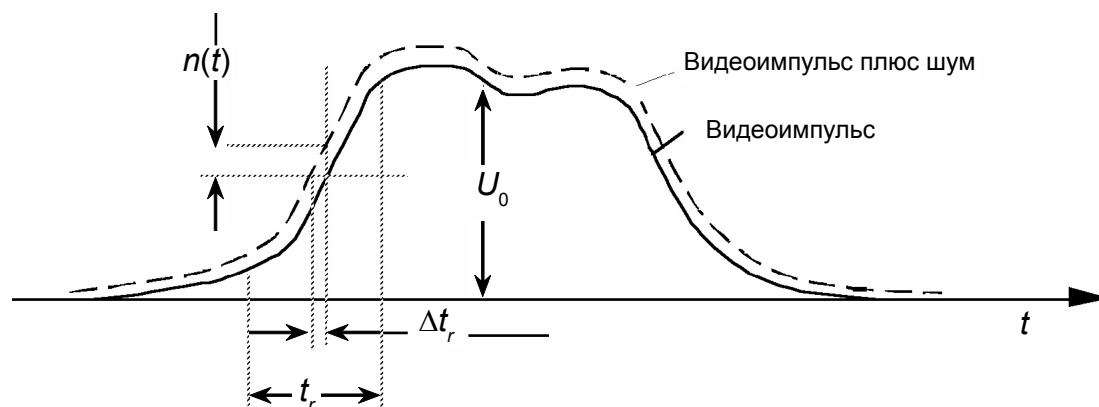
**Рис. 2.69.** Идеальная форма сигнала («идеальный импульс»)



**Рис. 2.70.** Реальный импульс имеет несколько закругленную форму сигнала

Но уже в теории радиолокации очень важно рассчитывать шумы радиоприемника (термический или омический шум его электрических цепей, космические и фоновые шумы в форме плоской волны из космического пространства, атмосферное поглощение и индустриальные шумы). Для расчета точности измерения дальности гармоническую волну заменяют видеоимпульсом, как показано на рис. 2.71 [111, p. 25].

<sup>1</sup> Radar Theory. — <http://www.radarpages.co.uk/theory/ap3302/sec1/ch3/sec1ch340.htm>



**Рис. 2.71.** Видеопульс и вносимый шум

Принимая во внимание различные потери, имеющие место в реальных условиях, такого рода базовые математические представления (математические расчеты для идеальной РЛС) дают возможность быстро оценить параметры существующих РЛС и дать ее (РЛС) операционное описание, позволяющее различить в ней фиксированное количество стандартных блоков (умножитель частоты, интегратор, пороговое устройство, согласованный фильтр, временной селектор и др.), соответствующих определенным математическим операциям<sup>1</sup>. Все эти блоки являются в то же самое время операциями над сигналом (в данном случае импульсной формы).

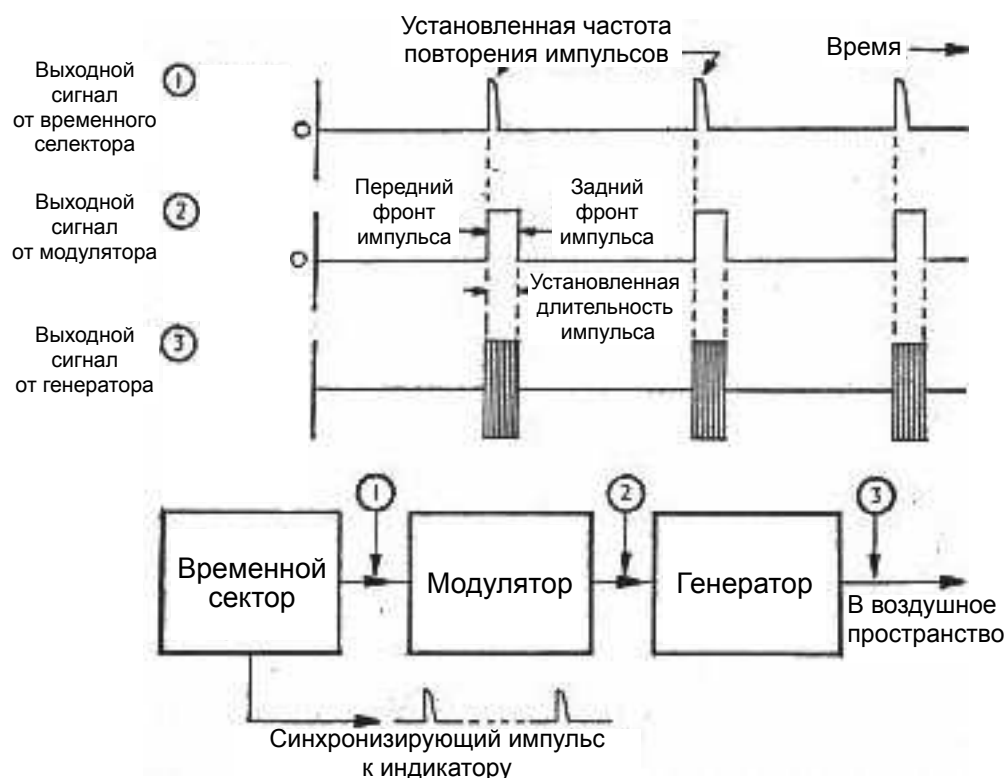
На рис. 2.72 показаны виды сигналов, получающихся на выходе: временного селектора (1), одновременно направляющего синхронизирующий импульс на индикаторное устройство — слева внизу; модулятора (2)<sup>2</sup> и генератора (3), направляющего модулированный импульс к антенне.

В соответствии с правилами, разработанными в теории радиолокации, эти блоки могут использоваться для построения различных структурных схем РЛС и реализовываться в самых разнообразных типах реальных радиолокационных станций (см., например, такую

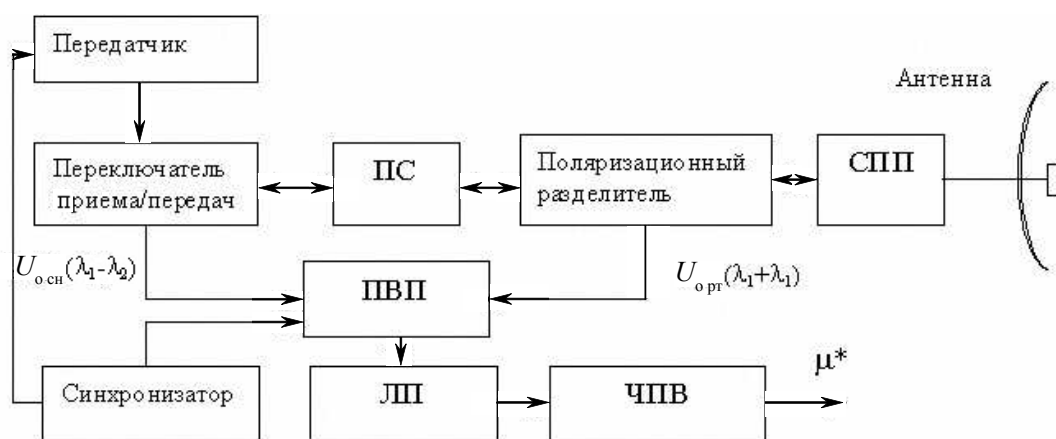
<sup>1</sup> Обработка сигнала с целью получения требуемых данных о цели является одной из важнейших функций любых РЛС и включает в себя целый ряд таких основных операций над сигналом, как детектирование, измерение и распознавание. Элементы РЛС, выполняющие эти операции, получили наименование процессора обработки сигналов (см. [112]).

<sup>2</sup> Из-за высокой скорости переключения (несколько сотен импульсов в секунду) и очень короткого временного интервала между ними работа передатчика не может управляться нормальными переключателями или реле. Для этой цели используется специальная электронная схема, называемая модулятором, продуцирующая импульсы регулируемой длительности, которые повторяются через точные интервалы времени, задаваемые синхронизирующим устройством, и используются для того, чтобы включать и выключать передатчик [54].

структурную схему на рис. 2.73) [84]. Блоки общей структурной схемы РЛС могут быть реализованы по-разному, но выполняют одну и ту же функцию.

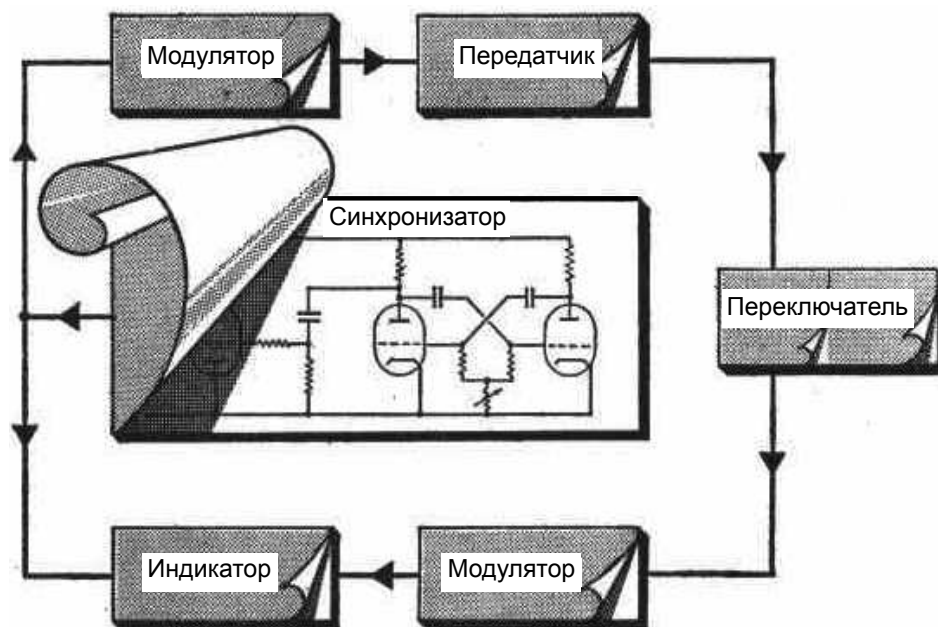


**Рис. 2.72.** Виды сигналов на выходе основных блоков РЛС, осуществляющие различные операции над сигналами [54]



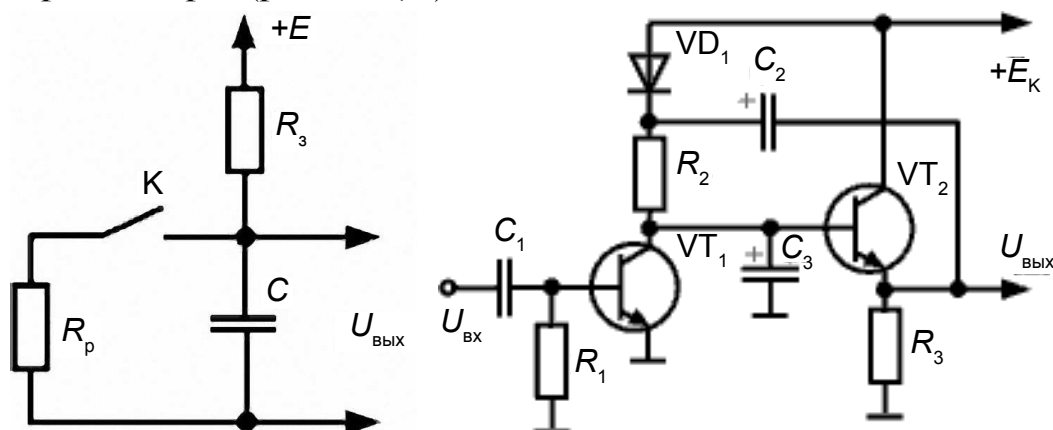
**Рис. 2.73.** Общая структурная схема РЛС [84]: ПС – переходная секция с прямоугольного волновода на круглый; СПП – совмещенный преобразователь поляризации; ПВП – переключатель видов поляризации; ЛП – приемное устройство с логарифмической характеристикой; ЧПВ – устройство череспериодного вычитания (компенсации)

На рис. 2.74 наглядно показан переход от блочной структуры радиолокационной системы, включающей стандартный набор блоков — модулятор, передатчик, приемник, индикатор, антенный переключатель и синхронизатор, к реализующим их электрическим цепям. В РЛС используются самые различные типы электронных схем.



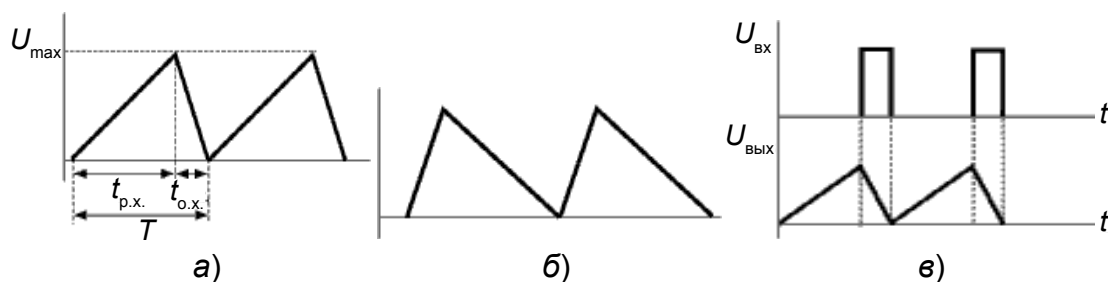
**Рис. 2.74.** Переход от блочной структуры радиолокационной системы к реализующим их электрическим цепям

Например, генератор линейно изменяющегося (пилообразного) напряжения, который применяют, в частности, для развертки электронного луча в электронно-лучевых трубках радиолокационных устройств, может быть выполнен в виде простейшей схемы (рис. 2.75, а), состоящей из конденсатора  $C$  и сопротивления  $R_3$  (через которое конденсатор заряжается при разомкнутом ключе  $K$ ) и  $R_p$  (через которое конденсатор разряжается при замкнутом ключе  $K$ ), или же на транзисторах (рис. 2.75, б).



**Рис. 2.75.** Генератор пилообразного напряжения:  
а — простейший; б — на транзисторах

Принцип получения пилообразного напряжения заключается в медленном заряде (или разряде) конденсатора через большое сопротивление во время прямого хода и в быстром его разряде (или заряде) через малое сопротивление во время обратного хода. Пилообразное напряжение может быть линейно нарастающим (рис. 2.76, а) или линейно падающим (рис. 2.76, б).



**Рис. 2.76.** Линейно изменяющееся нарастающее (а), падающее (б) напряжение и обратный ход пилообразного напряжения (в)

Схема на рис. 2.76, а не позволяет получить напряжения высокой линейности, поскольку при повышении напряжения на конденсаторе уменьшается зарядный ток. Чтобы получить его, строится схема на транзисторах (рис. 2.76, б). Транзистор  $VT_1$  представляет собой электронный ключ, который управляется импульсами положительной полярности, а транзистор  $VT_2$  является следящей связью. В исходном состоянии, когда на входе отсутствует прямоугольный импульс, транзистор  $VT_1$  закрыт, конденсатор  $C_3$  заряжается и формируется рабочий ход пилообразного напряжения. При воздействии входного импульса транзистор  $VT_1$  открывается и конденсатор  $C_3$  быстро через него разряжается. Формируется обратный ход пилообразного напряжения (рис. 2.76, в)<sup>1</sup>.

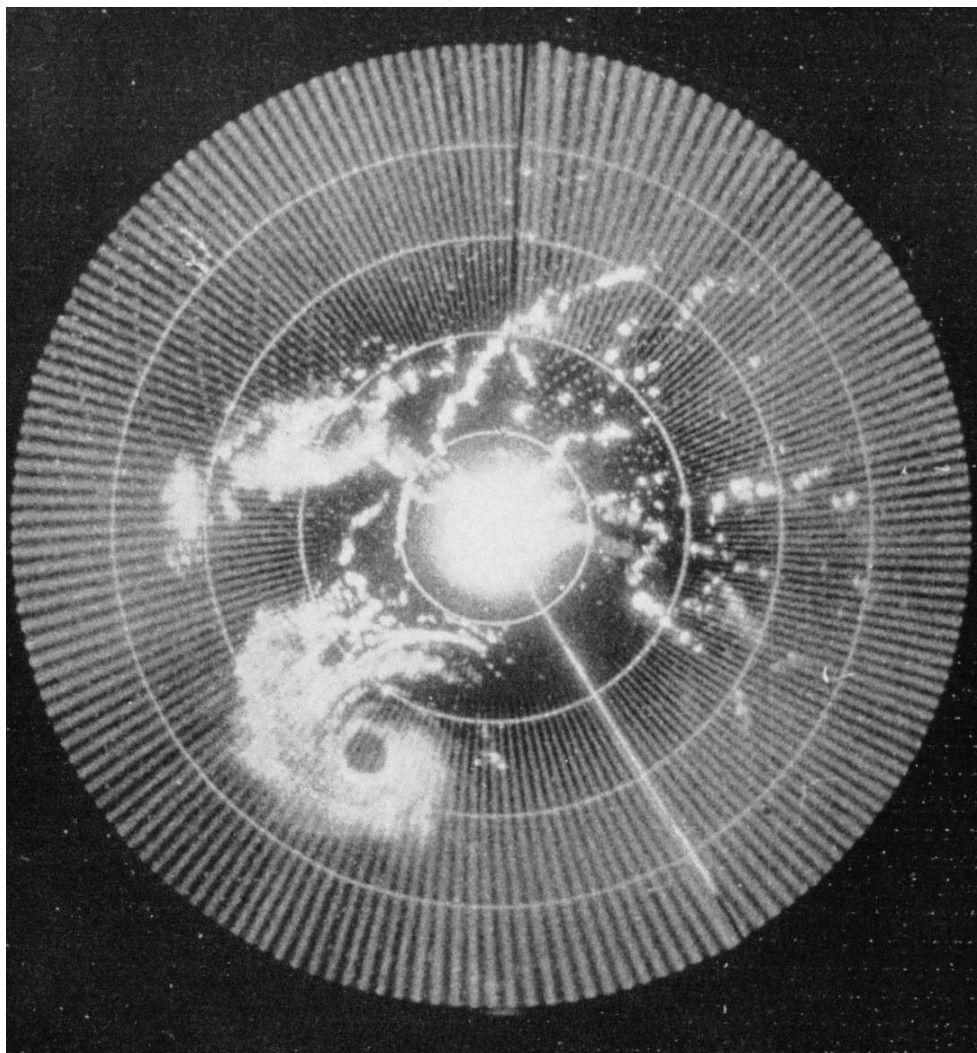
Рассматриваемый этап развития радиолокации может быть охарактеризован следующими показателями. Прежде всего в 1950-е гг. наблюдается стремительный рост литературы по радиолокации: выходит в свет целый ряд учебников и монографий, в которых развиваются ее теоретические основы. Налаживается планомерная и систематическая подготовка специалистов — разработчиков и исследователей — в данной области. В то же время уже организованы не только специальные курсы по радиолокации, но и специальные кафедры в технических вузах.

Радиолокация формируется как новая научно-техническая дисциплина, тесно связанная с нуждами и запросами инженерной практики и промышленного производства. На этом этапе происходит расширение сферы применения радиолокации как в военной технике,

<sup>1</sup> <http://naf-st.ru/main/generator/?glin>

так и в радионавигации, радиоастрономии, геодезии и т. д. В самой же радиолокации все более четко выделяются отдельные области исследования: активная и пассивная локация, анализ радиолокационных сигналов, разработка систем автоматического управления РЛС и др.

Кроме того, развитие радиолокации стимулировало появление некоторых смежных научно-технических дисциплин, например теории антенно-фидерных устройств. Разработанные в период прошедшей войны радиолокационные устройства находят все больше практическое применение в мирных целях, например для получения экологических или метеорологических данных из космоса (рис. 2.77), а также для определения характера и конфигурации залегания полезных ископаемых. Радиолокация способствовала также быстрому и массовому распространению телевидения.

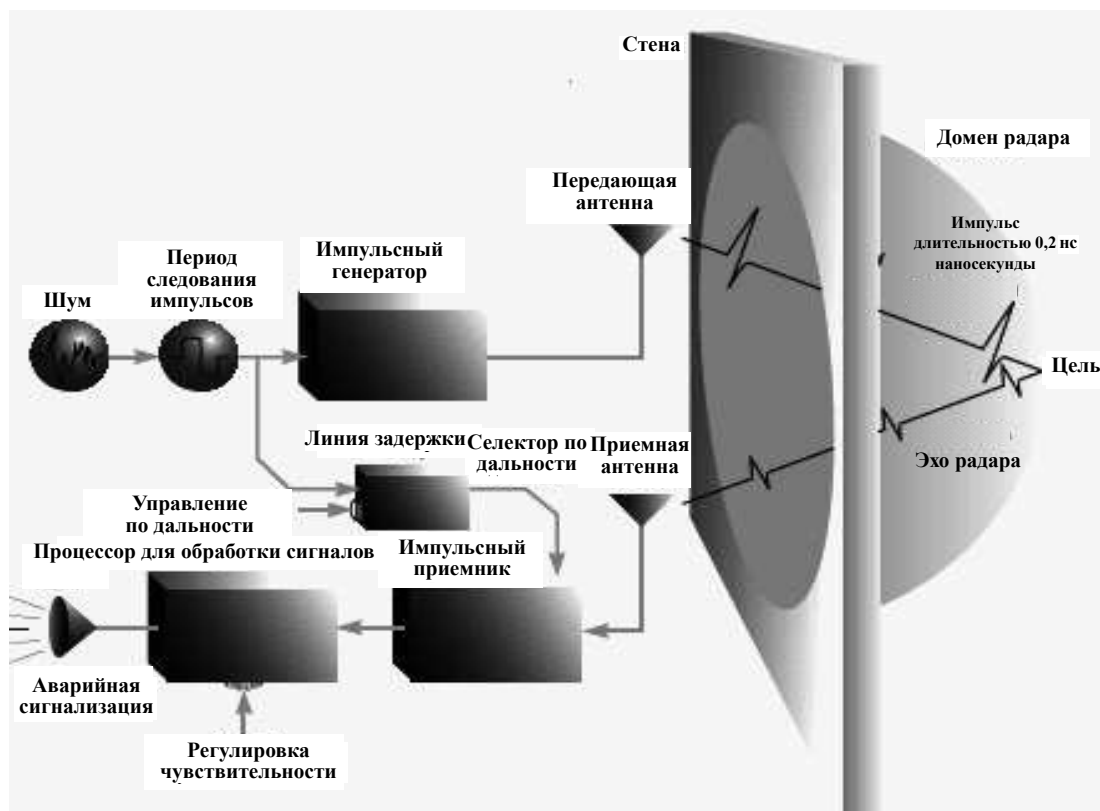


**Рис. 2.77.** Радиолокационное изображение тропического циклона 15 июля 1960 г. (фото военно-морских сил США)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> <http://www.radarpages.co.uk/theory/ap3302/sec1/ch4/sec1ch448.htm>; см. также: Basic Radar Theory. — <http://snrs.unl.edu/amet451/marsh/theory.html>



Еще одним интересным применением радиолокационной техники в нашей повседневной жизни является показанная на рис. 2.78 радиолокационная система, позволяющая осуществлять наблюдение за объектами, находящимися вблизи некоторой поверхности или за ней, например за стеной дома, а также определять расположение и состояние коммуникаций под асфальтом. Малые размеры и низкая цена делают этот прибор доступным для индивидуального потребителя.



**Рис. 2.78.** Маломощный импульсный радар для исследования пространства под поверхностью образцов, асфальта или через стену<sup>1</sup>

Использование в радиолокации статистических методов стало основой неклассического этапа в ее развитии, который означал также использование в ней методов и представлений неклассической физики (прежде всего квантовой механики). Это привело к развитию лазерной техники и лазерной локации. Однако главным результатом явилось развитие радиолокационной системотехники, подробному рассмотрению которой посвящен разд. 3.3.

<sup>1</sup> Azevedo S.G., Mcewan T.E. Science & Technology Review January/February 1996. — [https://www.llnl.gov/str/pdfs/01\\_96.2.pdf](https://www.llnl.gov/str/pdfs/01_96.2.pdf)

## Литература

1. *Стёпин В.С.* Теоретическое знание. Структура, историческая эволюция. М.: Прогресс-Традиция, 2000.
2. *Максвелл Д.К.* Доклад математической и физической секции Бринасской ассоциации (О соотношении между физикой и математикой) // Джемс Клерк Максвелл. Статьи и речи. М.: Наука, 1968.
3. *Максвелл Д.К.* О действиях на расстоянии // Джемс Клерк Максвелл. Статьи и речи. М.: Наука, 1968.
4. *Tepe R.* Elektrodynamik im 19. Jahrhundert. In: Heinrig Hertz: Festschr. Anlässl. D. Erforschung d. elektromagnet. Wellen vor 100 Jahren. Berlin: Heinrich-HertzßInst., 1988.
5. *Булюбаиш Б.В.* Максвелл и электродинамика Вебера // Максвелл и развитие физики XIX и XX веков. М.: Наука, 1985.
6. *Максвелл Д.К.* Атом // Джемс Клерк Максвелл. Статьи и речи. М.: Наука, 1968.
7. *Максвелл Д.К.* Фарадей // Джемс Клерк Максвелл. Статьи и речи. М.: Наука, 1968.
8. *Verschuur G.L.* Hidden Attraction. The History and Mystery of Magnetism. N.Y.-Oxford: Oxford University Press, 1993.
9. *Кляус Е.М.* Джемс Клерк Максвелл // Джемс Клерк Максвелл. Статьи и речи. М.: Наука, 1968.
10. *Фарадей Михаил.* Экспериментальные исследования по электричеству // 50 лет радио. Вып. 1. Из предыстории радио: Сборник оригинальных материалов. М.-Л.: Мысль, 1948.
11. *Максвелл Д.К.* Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехиздат, 1954.
12. *Стёпин В.С.* Становление научной теории. Минск: Наука, 1976.
13. *Пул-мл. Ч., Оуэнс Ф.* Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2006.
14. *Song Li, Zhao Y., Sun L., Xie S.* Water filled in single-walled carbon nanotubes. NIM workshop «Interactions in Hybrid Nanosystems». Frauenwörth, 2008.
15. *Эйнштейн А.* Влияние Максвелла на развитие представлений о физической реальности // Максвелл Джемс Клерк. Статьи и речи. М.: Наука, 1968.
16. *Hertz H.* Über die elektrodynamische Wellen im Luftraume und deren Reflexion // Annalen der Physik und Chemie. Neue Folge. Band XXXIV. № 8.
17. *Герц Г.* Силы электрических колебаний, рассматриваемые с точки зрения теории Максвелла // 50 лет волн Герца. М.-Л.: АН СССР, 1938.
18. *Mandelstam L., N. Papalexi L.* Ferdinand Braun zum Gedächtnis // Die Naturwissenschaften. 1928. № 32.
19. Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894). A Collection of Articles and Addresses / ed. by Josef F. Mulligan. N.Y. & L.: Garland Publishing, Inc., 1994.
20. *Планк М.* Джемс Клерк Максвелл и его значение для теоретической физики в Германии // Джемс Клерк Максвелл. Статьи и речи. М.: Наука, 1968.

21. Heinrich Hertz: Festschr. anlassl. d. Forschung d. elektomagnet. Wellen vor 100 Jahren. Berlin: Heinrich-Heinz-Institut, 1988.
22. Untersuchungen ueber die Ausbreitung der elektrischen Kraft. Leipzig: Jochan Ambrosius Barth, 1872.
23. *Friedburg H.* Funkensprünge. Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen // Baden-Württemberg, Themenheft «Funkensprünge. 100 Jahre Radiowellen. Heinrich Hertz», 1988. № 1.
24. *Hertz H.* Über Strahlen elektrischer Kraft // Annalen der Physik und Chemie. Neue Folge. B. XXXVI. № 4.
25. *Alù A., Engheta N.* A Hertzian Plasmonic Nanodimer as an Efficient Optical Nanoantenna. Physical Review B, 2008. Vol. 78. Is. 19.
26. *Kaiser W.* Die Entwicklung der Elektrotechnik in Ihrer Wechselwirkung mit der Physik // Naturfassungen in Philosophie, Wissenschaft, Technik. L. Schäfer, E. Ströcker (Hrsg.). Bd. III. Aufklärung und späte Neuzeit. Freiburg/München: Verlag Karl Alber, 1995.
27. *Бонч-Бруевич М.А.* Основы радиотехники. М.: Связьиздат, 1936.
28. *Григорьян А.Т., Вальцев А.Н.* Генрих Герц. М.: Наука, 1968.
29. *Aitken H.G.J.* Syntony and spark — the origin of radio. N.Y.: John Willey & Sons, 1976.
30. *Föppl A.* Einführung in die Maxwellsche Theorie der Elektrizität. Leipzig: Druck und Verlag von B.G. Teubner, 1904.
31. 50 лет радио. Вып. 1. Из предыстории радио: сб. ориг. ст. и мат. М.-Л.: Мысль, 1948.
32. *Hars F.* Ferdinand Braun (1850–1918). Ein wilhelminischer Physiker. Berlin; Diepholz: Verlag für Geschichte der Naturwissenschaft und Technik, 1999.
33. *Pool Ch.P., Owens F.J.* Introduction to Nanotechnology. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
34. *Nesper E.* Die ersten deutschen Versuche mit Funkentelegraphie 1897 // Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie. Zeitschrift für Hochfrequenztechnik, 1922. Bd 19. № 2.
35. Reich der Erfindungen H. Gamter (Hg.). Reprint von 1901. Bindlach: Gondrom, 1998.
36. *Kurz P.* Weltgeschichte des Erfindungsschutzes. Köln, Berlin u. a.: Carl Heymanns Verlag KG, 2000.
37. Alexander Stepanowitsch Popow — [http://de.wikipedia.org/wiki/Alexander\\_Stepanowitsch\\_Popow](http://de.wikipedia.org/wiki/Alexander_Stepanowitsch_Popow)
38. *Остроумов Б.А.* Организация первых исследований в Нижегородской радиолаборатории // Из истории электроники, энергетики и связи. М.: Наука, 1972. Вып. 2.
39. *Frick G.* Ferdinand Braun (1850–1918). Nobelpreisträger der Physik (1909). Straßburg: GNT Verlag, 1997.
40. *König W.* Technikwissenschaften. Die Entstehung der Elektrotechnik aus Industrie und Wissenschaft zwischen 1880 und 1914. Chur, Schweiz: G+B Verlag Fakultas.

41. *Климин А.И., Уралов В.А.* Фердинанд Браун — лауреат Нобелевской премии в области физики. Электросвязь. 2000. № 8.
42. *Leider P., Klier J.* Electron Transport in Nanostructures on Helium Films // Nanotechnology – Physics, Chemistry, and Biology of Functional Nanostructures. Results of the first research programme Kompetenznetz «Funktionelle Nanostrukturen» (Competence Network on Functional Nanostructures). Th. Schimmel et al. Stuttgart: Landesstiftung Baden-Württemberg, 2008.
43. *Röthe H.* Heinrich Hertz, der Entdecker der elektromagnetischen Wellen // Elektrotechnische Zeitschrift. 1957. №. 7.
44. *Колосов А.А.* Резонансные системы и резонансные усилители. М.: Гос. изд-во лит. по вопросам связи и радио, 1949.
45. *Herzog J., Feldmann C.* Die Berechnung Elektrischer Leitungsnetze in Theorie und Praxis. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1921.
46. *Mathis W.* Theorie nichtlinearer Netzwerke. Berlin, Heidelberg u. a.: Springer-Verlag, 1987.
47. *Buchheim G., Sonnemann R.* (Hg.). Geschichte der Technikwissenschaften. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag, 1990.
48. *Huelsewede R.* Erzeugung ultrakurzer elektrischer Impulse auf nichtlinearen Leitungsstrukturen. Dissertation. Duisburg, Universität Duisburg, 1999. — <http://www.ub.uni-duisburg.de/ETD-db/theses/available/duett-09172001-120734/unrestricted/inhalt.htm>
49. *Горелик Г.Е.* Леонид Мандельштам и его школа // Вестник Российской академии наук. 2004. № 10.
50. *Печенкин А.А.* Леонид Исаакович Мандельштам. Исследование, преподавание и остальная жизнь. М.: Логос, 2011.
51. *Петровский А.А.* Научные основания беспроводной телеграфии. СПб., 1907 (1-е изд); 1913, (2-е изд).
52. Мир материалов и нанотехнологий. Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения — 2008 год. М.: Техносфера, 2008.
53. *Schiemann G.* Nanotechnology and Nature. On Two Criteria for Understanding Their Relationship // HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry. 2005. Vol. 11. № 1.
54. *Barrett D.* Radar Theory, 2000–2002.
55. *Bernstein G.H., Chua L.O., Csurgay A.I.* etc. Biologically-inspired celluar machine architectures // Managing nanobioinfocogno innovations: converging technologies in society / ed. by W.S. Bainbridge and M.C. Roco. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
56. *Burke P.J., Li S., Yu Z.* Quantitative Theory of Nanowire and Nanotube Antenna Performance — [http://arxiv.org/PS\\_cache/cond-mat/pdf/0408/0408418v1.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0408/0408418v1.pdf) — 2004.
57. *Steele B.* Making the big step from electronics to photonics by modulating a beam of light with electricity. Cornell University, 2005.

58. *Józsa C., Tombros N., Popinciuc M., Jonkman H.T., Wees B.J. van.* Graphene spintronics – injection and transport // NIM workshop «Interactions in Hybrid Nanosystems». Frauenwörth, 2008.
59. *Soentgen J.* Atome Sehen, Atome Hören // Nanotechnologien im Kontext. Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektive. Berlin: Akademische Verlagsgesellschaft Aka GmbH, 2006.
60. *Ahmed H.* Nanostructure Fabrication // Proceedings of the IEEE. 1991. Vol. 79. № 8.
61. *Kern U.* Die Entstehung des Radarverfahrens: Zur Geschichte der Radartechnik bis 1945. Stuttgart: Historisches Fakultät der Universität Stuttgart, Abteilung Geschichte der Naturwissenschaft und Technik, 1984.
62. *Winston B.* Media Technology and Society. A History: from the Telegraph to the Internet. L. and N.Y.: Routledge, 2000.
63. *Thurston R.* A History of the Growth of the Steam Engine, 1889 [Assoc. Faculty Pr Inc. 1971].
64. *Brian A.W.* The Logic of Invention. Santa Fe Institute and PARC, 2005.
65. *Türstedt O.* Über Erzsuchenmittels Elektrizitätät. Zeitschrift für praktische Geologie, 20. Jahrgang, April 1912.
66. *Лобанов М.М.* Из прошлого радиолокации: Краткий очерк. М.: Воен-издат, 1969.
67. *Лобанов М.М.* Начало советской радиолокации. М.: Сов. радио, 1975.
68. Радар в США: Официальная история. М.: Сов. радио, 1946.
69. Радар: Официальная история. М.: Сов. радио, 1946
70. *Шембель Б.К.* У истоков радиолокации. М.: Сов. радио, 1977.
71. *Page R.M.* The origin of radar. N.Y.: Anchor books douleday and Co., 1962.
72. *Skolnik M.I.* Introduction to radar systems. N.Y.: McGrow-Hill, 1962.
73. *Burns R. (ed.).* Radar Development to 1945. London: Peter Peregrinus Ltd., 1988.
74. *Kern U.* Die Entstehung der Radarverfahrens: zur Geschichte der Radartechnik bis 1945. Stuttgart: Historisches Institut der Universitat Stuttgart, 1984.
75. *Brian A.W.* The Logic of Invention. Santa Fe Institute and PARC, 2005.
76. *Brian A.W.* The Structure of Technology. 2006.
77. *Thumm M.* Historical German contributions to physics and applications of electromagnetic oscillations and waves. – <http://www.radarworld.org/history.pdf>
78. *Коваленко В.Ф.* Магнетрон // Большая Советская Энциклопедия: в 30 т. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.
79. *Kostenko A.A., Nosich A.I., Tishchenko I.A.* Development of the First Soviet Three-Coordinate L-Band Pulsed Radar in Kharkov Before WWII // IEEE Antennas and Propagation Magazhe. 2001. Vol. 43. № 3.
80. *Nosich A.I., Poplavko Y.M., Vavriv D.M., Yanovsky F.J.* Microwaves in Ukraine // IEEE Microwave magazine, 2002.

81. Коваленко В.Ф. Клистрон // Большая Советская Энциклопедия: в 30 т. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.
82. Bronwell A.B., Beam R.E. Theory & Application of Microwaves. N.Y. – L.: McGraw Hill Book Co. 1961.
83. Hovanessian S.A. Radar system design and analysis. Dedham: Artech House, Inc., 1984.
84. Лукьянов С.П. Исследование помехоустойчивости алгоритмов обработки поляризационно-манипулированных радиолокационных сигналов с помощью устройств череспериодной компенсации // Радиоэлектроника. 2001. № 1. – <http://jre.cplire.ru/mac/jan01/3/text.html>
85. Богомолов А.Ф. Радиолокационная станция // Большая Советская Энциклопедия: в 30 т. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.
86. Радиолокация (Краткая предыстория). – [http://www.kbpm.ru/Book/Part\\_1/06\\_RadioLocation\\_PredIstoria.htm](http://www.kbpm.ru/Book/Part_1/06_RadioLocation_PredIstoria.htm)
87. Богомолов А.Ф. Радиолокация // Большая Советская Энциклопедия: в 30 т. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.
88. Hans E. Dr. Hollmann, the Physicist and «Father of Modern Radar and Microwave Technology». Copyright 2001 Martin Hollmann // Radar World – <http://www.radarworld.org/hollmann.html>
89. Медведь А., Марковский В. Радиолокационные истребители ВВС Красной Армии. – <http://www.airwar.ru/history/av2ww/soviet/rls/rls.html>
90. Заксон М.Б. Фазированная антенная решётка // Большая Советская Энциклопедия: в 30 т. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.
91. Активные фазированные антенные решётки / под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004.
92. Клигер Г.А. Синфазная антенна – <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/102/473.htm>
93. Бартон Д. Радиолокационные системы. М.: Сов. радио, 1967.
94. Hерске G. The radar war. Translated into English by Hannah Liebmann. – <http://www.radarworld.org/radarwar.pdf>
95. Ridenour L.N. (ed.). Radar System Engineering. N.Y. and L.: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1947.
96. Пролейко В. О значении электроники. Военный аспект // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2003. №4.
97. Мажоров Ю. ЦНИИРТИ 60 лет. Страницы истории // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2003. №4.
98. Черток Б.Е. Ракеты и люди. – 2-е изд. М.: Машиностроение, 1999.
99. Лобанов М.М. Развитие советской радиолокационной техники. – <http://hist.rloc.ru/lobanov/index.htm>
100. Минц А.Л. Радиотехника, радиофизика, радиоэлектроника // Изв. вузов. 1974. Т. 18. № 5.

101. Вопросы статистической теории радиолокации / Б.М. Курикша, А.А. Репин, Г.П. Тартаковский и др. М.: Сов. радио, 1963.
102. Вудворт Ф.М. Теория вероятностей и теория информации с применением в радиолокации. М.: Сов. радио, 1955.
103. Пороговые сигналы: пер. с англ. / под ред. А.П. Сиверса. М.: Сов. радио, 1952.
104. Башаринов А.Е., Александров М.С. Прием импульсных сигналов в присутствии шумов. М.: Госэнергоиздат, 1960.
105. Теория информации и ее приложения / под ред. А.А. Харкевича. М.: Физматгиз, 1959.
106. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.: Госэнергоиздат, 1958.
107. Page R.M. The Origin of Radar. N.-Y.: Anchor books douleday and Co, 1962.
108. Быховский М.А., Муравчик П.Н., Сорока Е.З., Троицкий В.Н. В.А. Котельников и его влияние на научные исследования и разработки ученых НИИР // Электросвязь. 2003. № 11.
109. Быховский М.А. Жизнь, наполненная умопостижением и действием. К 95-летию Владимира Александровича Котельникова // Электросвязь. 2003. №9.
110. Теоретические основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1970.
111. Wiesbeck W. Lecture Script «Radar System Engineering». 13th Edition WS 2006/2007. Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik, Universität Karlsruhe.
112. Barton D.K., Leonov S.A. (eds). Radar Technology Encyclopedia (Electronic Edition). Boston, London: Artech House, 1998.

## **Глава 3**

# **СИСТЕМОТЕХНИКА: СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

### **3.1. Становление системотехники как новой научно-технической дисциплины**

Системотехника — это особая деятельность по созданию сложных технических систем. В этом смысле она является прежде всего современным видом инженерной, технической деятельности, но в то же время включает в себя и научную деятельность, связанную с выработкой новых знаний. В системотехнике научное знание проходит полный цикл функционирования — от его получения до использования в инженерной практике [1].

Таким образом, системотехника может быть рассмотрена и как техническая наука, и как отрасль техники, и как сфера инженерной деятельности. Этим объясняется многообразие ее определений. Одни рассматривают системотехнику как отрасль техники, подчеркивая ее направленность на систему в целом, а не на отдельные входящие в нее устройства. Другие считают, что она является ветвью инженерной деятельности по планированию, проектированию, конструированию и эксплуатации сложных технических систем. Есть и такие, которые определяют системотехнику как техническую науку об общих закономерностях создания, совершенствования и использования технических систем, требующих системного подхода к задачам их анализа и синтеза. Но все сходятся на том, что проблемы системотехники являются комплексными и находятся на стыке ряда научных и технических дисциплин, что она позволяет устранить разрыв между исследованием и проектированием, который существует при традиционных методах работы, что это — широкая сфера, игнорирующая границы, разделяющие различные академические дисциплины и отделяющие исследование от инженерной деятельности и разработок.



В данной работе будем рассматривать системотехнику преимущественно как область знания, комплексную научно-техническую дисциплину, объединяющую методы и принципы анализа и организации инженерной деятельности; средства, методы, приемы и процедуры проектирования и исследования сложных технических систем; знания и методы современных математических, технических, естественнонаучных и общественных дисциплин, используемых для исследования и проектирования сложных систем и организации инженерной деятельности.

Первые основополагающие работы по системотехнике представляли собой описание всевозможных знаний и методов, используемых при проектировании сложных технических систем, но ее специфику как комплексной научно-технической дисциплины нового типа определяют как использование и развитие системного подхода.

Первой работой по системотехнике, в которой содержится попытка систематического решения проблемы стыковки схем и представлений сложных систем и типологизации системотехнических задач, является книга Г.Х. Гуда и Р.Э. Макола «Системотехника» [2]. В ней дано обобщенное описание инженерных задач, а также научных средств, которые используются при их решении. Хотя единого языка для обобщенного описания в данной работе практически нет, известное обобщение проведено: выделены общие характеристики систем (целостность, телеологичность, сложность и др.), описаны в общем виде последовательности этапов и фаз проектирования с фиксацией за ними определенных инженерных задач и научных средств их решения, отмечено соответствие определенных частей сложных технических систем и различных теоретических дисциплин, которые используются для решения инженерных задач. Однако в этой книге не разработано теоретическое основание для объединения частных знаний и представлений сложных систем.

Аналогично в более поздней книге «Системотехника. Методика и практика» [3] дается перечень (или, как пишут сами авторы, «энциклопедия») и краткое описание знаниевых средств, необходимых для структурирования системы и управления проектированием, без попытки свести все эти методы, формулы и теории к какой-либо общей теоретической или методологической основе. Они перечисляются и описываются в книге в алфавитном порядке. В специальной таблице и тексте лишь указывается на возможность их использования на определенных этапах и фазах (рабочих областях) системотехнической деятельности в процессе решения различных проектных проблем. Авторы считают, что конкретный выбор нужных средств в каждом отдельном случае как раз и возможен на основе такого энциклопедического описания.

По нашему мнению, в системотехнике проводятся особые комплексные теоретические исследования, объединяющим фактором которых являются системный подход и компьютерное моделирование. Именно на этом аспекте системотехники и будет сконцентрировано основное внимание в этой главе.

Обычно под системотехникой понимают теорию сложных технических систем. Однако когда говорят о системотехнике, речь идет не столько о сложных технических системах, сколько о сложных, крупных проектах. В системотехнике формируются два основных направления: во-первых, это системное проектирование сложных системотехнических комплексов, во-вторых, проектирование и анализ систем управления фабрикой, заводом, фирмой и т. д. как социотехнической системой.

Одним из весьма показательных примеров такого рода крупного проекта является, наряду с атомным и ракетным проектами, развиваемый в конце и после окончания Второй мировой войны радиолокационный проект. Поэтому в данной главе мы проведем исследование истории развития радиолокационной системотехники.

Создание автоматизированных систем управления (АСУ) предприятиями или отраслями промышленности также является одним из вариантов системотехнической разработки. Истории этого направления системотехники также посвящается отдельный раздел. Часто термин «системотехника» переводят как «теория больших систем», но его следовало бы переводить как «многомерные системы», поскольку термин этот сегодня применяют по отношению к наносистемам, говоря о наносистемотехнике. В таком сочетании, конечно, речь идет о наносистемах, рассматриваемых как сложные системы на наноуровне. Поскольку нано- или микросистемотехника рассматривается сегодня как новое направление системотехники, важно кратко рассмотреть историю становления последней.

Термин «системотехника» был впервые использован в концерне «Телефонные лаборатории» в начале 40-х гг. XX в. Системотехника возникла и развивалась прежде всего в двух совершенно различных сферах: во-первых, в сфере разработки военных технических систем во время и после Второй мировой войны и космической техники; во-вторых, при решении задач перспективного планирования и проектирования предприятий в различных отраслях промышленности, в особенности нефтяной, химической и энергетической.

Можно выделить три основные причины, стимулировавшие появление системотехники:

1. Изменения в структуре инженерной деятельности. Усложнение самого процесса разработки новых технических систем, координации участвующих в нем специалистов потребовало точного описания

алгоритма самой этой разработки, призванного помочь рационально организовать сложную инженерную деятельность. Иначе говоря, объектом исследования и проектирования становится сама инженерная деятельность, также рассматриваемая теперь как сложная система. Причем процесс создания сложной технической системы становится эволюционным, т. е. не прекращается с выпуском данной системы в эксплуатацию, как это происходит в традиционной инженерной деятельности, поскольку в процессе функционирования продолжают ее совершенствование и перепроектирование в соответствии с изменившимися целями и задачами.

Таким образом, созданная и постоянно совершенствующаяся сложная техническая система вместе с деятельностью по ее созданию и совершенствованию образует новую сложную самовоспроизводящуюся социально-техническую систему с рефлексией.

2. Расширение объема научных знаний, используемых инженером для создания такого рода систем. Инженер-системотехник вынужден обращаться к самым различным областям науки и техники для получения конечного продукта своей деятельности. При проектировании такого рода сложных технических систем начинают использоваться, наряду с теорией механизмов и машин, электротехникой, радиотехникой, теорией автоматического регулирования, также инженерная и социальная психология и другие социально-гуманитарные дисциплины.

3. Появление нового типа технических систем, а именно сложных человеко-машинных систем. Это обусловлено в первую очередь тем, что сложные человеко-машинные системы представляют собой комплекс подсистем, состоящих из радиотехнических и радиолокационных, механических, оптических и других блоков автоматических и вычислительных устройств, описание которых в виде разнообразных кинематических, электрических схем, моделей теории автоматического регулирования вписываются только в более общую системно-кибернетическую онтологию.

Таким образом, во всех этих случаях делается упор на организацию междисциплинарной системотехнической команды с целью обеспечить кооперацию участвующих в ней специалистов и на выработку общего языка для коммуникации между ними. Таким языком подавляющее большинство системотехников считают системный подход.

Г. Дженкинс и П. Юль в своем определении системотехники главное место отводят сложному системному проектированию: «Термин “системотехника” по большей части используется для обозначения науки о проектировании или связывании воедино отдельных систем...

системотехникой называют деятельность планирования, проектирования, конструирования, тестирования и эксплуатации сложных систем» [4, р. 9–11]. В определении такого типа центральной частью системотехники является методология проектирования сложных систем, а наиболее важной ее целью признается соединение различных компонентов, элементов и подсистем сложных человеко-машинных и социотехнических систем. «С этой целью системотехника... определяется как *искусство проектирования и оптимизации систем, начиная с выраженной потребности и кончая полным множеством спецификаций всех элементов системы*» [5, р. 28]. В этом случае координация различных видов деятельности, методов и дисциплин, участвующих в создании сложной системы, является вторичной задачей, направленной на создание целостной системы из разнородных подсистем.

Системотехника включает в себя технический и административно-управленческий аспекты. Первый из них связан с интеграцией подсистем, а второй — с координацией разного рода деятельности в процессе создания сложной технической системы, т.е. требуется получать технические решения и достигать компромисс, регулируя и управляя усилиями отдельных экспертов и команд из различных дисциплин.

В 1990 г. был основан Международный совет по системотехнике (The International Council on Systems Engineering — INCOSE), на сайте которого дается следующее определение системотехники: «Системотехника является междисциплинарным подходом и средством, позволяющим реализовать удачные системы, концентрирующим свое внимание на определении нужд потребителя и требуемых функциональных возможностей в самом начале цикла разработки системы, требований к документации. Она связана с ее проектным синтезом и системной приемкой с точки зрения проблемы в целом: функционирование, стоимость и график работы, исполнение, тренинг и поддержка, испытание, изготовление и размещение. Системотехника интегрирует в себе все дисциплины и специальности, группируя их в единую команду, формируя структурированный процесс разработки от формулировки концепции до производственных работ».

Рассуждения о системах и системной методологии, как правило, служат введением во всех работах по системотехнике, включающим обычно: определение системы (объектов, свойств и отношений), примеры физических, понятийных, абстрактных, естественных и искусственных систем, закрытых и открытых, а также адаптивных систем, описание сложных систем (например, систем и их окружения, целостности, централизации и т.д.) и свойств нижних уровней систем (элементов и подсистем) [6, р. 127–137]. «Инженер-системотехник

является личностью, которая способна интегрировать знания из различных дисциплин и рассматривать проблемы с холистической точки зрения с помощью применения “системного подхода”» [7, р. 34].

В этом смысле важно было провести границы между системотехникой, общей теорией систем, системным анализом и системным подходом.

*Системная философия* является «переориентацией мышления и картины мира, произошедшей из-за введения “систем” в качестве новой научной парадигмы (в противовес аналитической, механистической, линейно-каузальной парадигмы классической науки)». Первой сферой системной философии или системного мышления является «системная онтология», а второй — системная эпистемология или методология [8, р. 36, 37]. Эта вторая часть и есть системный подход как совокупность методологических принципов системного исследования.

*Общие теории систем* являются метатеориями [9] соответствующего класса специальных системных теорий и моделей, «интегрирующими результаты многих специализированных наук первого порядка в оптимальную устойчивую структуру» [10, р. 13, 19–21].

*Системный анализ* — это тщательное изучение социально-экономических и социально-экологических решений проблем в неопределенных ситуациях.

*Системотехника* — это системные исследования и разработки (общий системный синтез), т. е. «построение “моделей”, с помощью которых создаются новые системы» [10, р. 298].

С нашей точки зрения, системотехнику можно понимать как организацию прежде всего самых различных инженерных и научных деятельности, а также разнообразных знаний и методов с позиций системной методологии.

Итак, системотехника — это не только способ организации научно-технической деятельности и систематизации знаний, используемых при создании сложной системы, но и конкретно-методологическая позиция, связанная с целостным представлением сложных систем и процесса их исследования, проектирования и развития, основанная на кибернетическом и системном подходах.

Возникая сначала как некий «универсальный» подход, системотехника затем специфицируется под решение задач в определенной проблемной области — сложных научных и инженерных проблем. Именно на основе такого широкого научного движения и вырастает затем новая научно-техническая дисциплина. Главная конституирующая ее идея — это изучение и проектирование систем в их целостности.

Таким образом, в системотехнике научное знание проходит полный цикл функционирования от его получения до использования в инженерной практике. Инженер-системотехник должен сочетать в себе талант ученого, конструктора и менеджера, объединять специалистов различного профиля для совместной работы. Для этого ему необходимо разбираться во многих специальных вопросах. Однако главное для него — научиться применять все полученные знания для решения двух основных системотехнических задач: обеспечения интеграции частей сложной системы в единое целое и управления процессом создания системы, т.е. фактически заниматься управленческой деятельностью. Поэтому в списке требуемых ему знаний внушительное место уделяется системным и кибернетическим дисциплинам, позволяющим ему овладеть общими методами исследования и проектирования сложных технических систем независимо от их конкретной реализации и материальной формы. Именно в этой области он является специалистом.

В настоящее время нет такой области техники, которая могла бы существовать без участия инженеров. В число инженерных функций попадают постепенно все виды технической деятельности от исследования и проектирования до производства и эксплуатации новой техники. Особым видом инженерной деятельности становится и управление всем этим сложным конгломератом деятельности и функций. Именно прогрессирующая дифференция инженерной деятельности и необходимость ее интеграции выдвинули к середине XX столетия дилемму специалистов и дженералистов.

В создании сложных технических систем, таких как космические проекты или крупные энергетические комплексы, участвует огромное множество *специалистов* из разных областей науки и техники, составляющих разнообразные подразделения, *координация* которых становится очень сложной научно-технической задачей.

Для решения этой задачи требуются особые *междисциплинарные эксперты* («дженералисты» или «генералисты»). Таковыми являются, например, генеральный конструктор, научный координатор, главный менеджер проекта и др. Эти эксперты должны иметь как представления о проекте в целом и процессе его разработки, так и специальные знания, необходимые для осуществления управления и стыковки отдельных специалистов в процессе решения стоящей перед ними общей научной и инженерной задачи. Их основная задача — координировать деятельность специалистов и направлять все задачи, решаемые в процессе создания сложной технической системы, в общее русло — разработку общего проекта.

Системотехника представляет собой комплексную бригадную деятельность, объединяющую как множество специалистов, так и дженералистов, которыми являются инженеры-системотехники. «Инженер-системотехник должен иметь представление о самых разнообразных областях, но его главная задача — действовать как *дженералист*, т.е. человек, способный при решении различных проблем мыслить в рамках целостного подхода. Чтобы реализовать эту функцию, он должен быть хорошим коммуникатором, эффективно поддерживая связь с различными специалистами, чей совет является существенным для реализации междисциплинарного подхода и стимулирует специалистов к творческой деятельности в команде. Такая системная команда содержит и специалистов, и инженеров-системотехников. Главная работа инженера-системотехника — рассортировать, *что и почему* происходит и как выполнить эти задачи лучше. Он стимулирует дискуссию о целях (данной совместной деятельности) и стремится найти консенсус для достижения этих целей. Он не останавливается на достигнутом и продолжает коммуницировать, чтобы вовлеченность тех, кто участвуют в совместной работе, возрастала. Наконец, вместе со специалистами он добивается того, чтобы поставленные цели были реализованы настолько эффективно, насколько это возможно за минимальное время и с минимальными финансовыми затратами».

Чтобы сложная техническая система работала, недостаточно довести до совершенства все ее отдельные компоненты. Гораздо важнее обеспечить слаженную работу всех ее частей, направленную на достижение общей цели. Особенно остро эта задача возникла при разработке космических проектов. «Чтобы проиллюстрировать, что мы имеем в виду под системой, рассмотрим запуск космической ракеты. Успех миссии Аполлон II был обеспечен драматически иллюстрированной искусно выполненной системотехнической частью — даже, когда цели этого проекта были подвергнуты суровой общественной критике. Почему же полезно рассматривать космическую ракету как систему? Прежде всего потому, что исключительная размерность и сложность этой задачи требовали ее осмысления в системных терминах. Отдельная ракета состоит из миллионов электронных компонентов, тысячи людей входят в команды инженеров и менеджеров и миллионы долларов составляют бюджет данного проекта. Было бы неразумно ожидать, что все эти ресурсы можно просто скомбинировать случайным образом и эффективно выполнить работу — вклад отдельных участников необходимо координировать» [4, р. 4].

Требуется достижение компромисса между оптимальностью решений, критериями и целями, преследуемыми разнообразными экспертами, участвующими в разработке сложной системы.

Выполнение этой задачи — функция координатора проекта. Однако отдельная персона не в состоянии решить ее, так как невозможно быть одинаково квалифицированным электронщиком, экономистом, эргономистом и т. д. По этой причине каждый руководитель большого проекта вынужден создавать для себя научно-координационный центр, объединяющий междисциплинарных экспертов.

Инженер-системотехник, таким образом, действует как дженералист. В Советском Союзе после Второй мировой войны был сформирован институт генеральных конструкторов, обладавших огромной властью, распоряжавшихся большими людскими и финансовыми ресурсами и имевшими прямой выход на первых руководителей страны. Одним из таких генеральных конструкторов в области космического ракетостроения был, например, Сергей Королев, а в области создания системы противоракетной обороны страны — Александр Расплетин. Но за спиной этих руководителей стояли не только специалисты, но и дженералисты, в задачу которых входило помочь генеральному конструктору собрать воедино как проектируемую систему, так и коллектив ее разработчиков. Подготовка их потребовала организации особого системно-ориентированного обучения.

Г. Рополь в своей книге «Системная теория техники. К основанию общей технологии» [11, с. 77–84] вводит понятие системы деятельности и предметной системы, а также проводит различие между чисто техническими системами, являющимися предметными, и социотехническими, представляющими собой соединение системы деятельности с предметной системой. Системотехника, по Рополу, в отличие от классической технической науки и традиционной инженерной деятельности направлена на изучение и проектирование социотехнических систем, которые как предмет системотехники распадаются на две части: создаваемую техническую систему и саму инженерную деятельность. Техническая система, создаваемая в рамках традиционной инженерной деятельности (хотя и сложная) и рассматриваемая с точки зрения кибернетических представлений, в системотехнике включается в систему еще более высокого ранга — социотехническую «систему использования», т. е. такую систему, в которой предметные технические системы выступают в качестве подсистем в более широкой системе эксплуатационной деятельности, где должны учитываться также экологические и социальные перспективы.

Сама инженерная деятельность в системотехнике также становится объектом планирования, организации и проектирования (т. е. управления) и поэтому должна также рассматриваться как особая система — планируемая система.



Иначе говоря, большие системные проекты требуют организации и управления (проектного менеджмента), а значит, системного представления и описания самой системотехнической деятельности.

### **3.2. Теоретическая системотехника: системное исследование и системное проектирование**

Главная задача теоретической системотехники — это переход от такого рода синкретического, неоднородного описания проектируемой системы к однородной абстрактной теоретической схеме. Это необходимо прежде всего для того, чтобы использовать в теоретической системотехнике соответствующий математический аппарат. Именно по этой причине теоретические схемы системотехники формулируются как возможно предельно абстрактные.

В системотехнике можно выделить два типа моделей. Модели первого типа развиты в так называемом структурном анализе сложных систем. Они включают в себя структурные схемы теории автоматического регулирования, теории электрических цепей, теории переключающих схем и т.д. Модели второго типа представлены алгоритмическими схемами, которые обычно используются в кибернетике и теории программирования и являются идеализированными представлениями функционирования сложной системы, а также для абстрактного описания самого процесса проектирования такого рода систем. Алгоритм функционирования проектируемой системы часто объединяется в таких схемах с алгоритмом проектировочной деятельности при создании автоматизированных систем управления.

Таким образом, современная техническая теория включает в себя, во-первых, моделирование структуры проектируемой системы, а во-вторых, процесса разработки. Такого рода модели строятся, например, с помощью алгоритмических языков имитационного моделирования (подробнее см. разд. 1.5) [12–15].

Современная теоретическая системотехника, в отличие от классических технических и естественнонаучных теорий, ориентируется на общенаучные, методологические понятия и представления (системные, кибернетические и др.), а также на универсальные средства компьютерного моделирования (рис. 3.1).

Одной из проблем в системотехнике является определение структуры проектируемой системы. Например, в радиолокационной системотехнике выделяются обычно три уровня анализа: «уровень электрических цепей и проектирования компонентов, уровень мате-

матического анализа и статистики и системотехнический уровень... Инженер системотехник в сфере радиолокации... проектирует, определяет или оценивает радиолокационную систему в целом как компонент более широкой системы» (см. например, приведенный выше пример создания системы противоракетной обороны страны). «Компоненты же, электрические цепи и механизмы, которые составляют радиолокационную систему, описываются только в общих чертах, с точки зрения того, каким образом их свойства будут влиять на выполнение общей роли радиолокационной системы как источника информации для системы более высокого уровня» [16, р. i].



**Рис. 3.1.** Взаимоотношения компьютерно поддерживаемой системотехники (Computer-Aided Systems Engineering – CASE)<sup>1</sup>

Для этой цели разрабатываются специальные абстрактные структурные схемы, которые помогают определить композицию подсистем и элементов, распределить функции между ними и способы взаимодействия системы с окружающей средой. При этом структура системы описывается абстрактно, т. е. без подробного рассмотрения

<sup>1</sup> *Eisner H.* Computer-aided Systems Engineering. Englewood Cliffs. N.J.: Prentice Hall, 1988, р. 8.

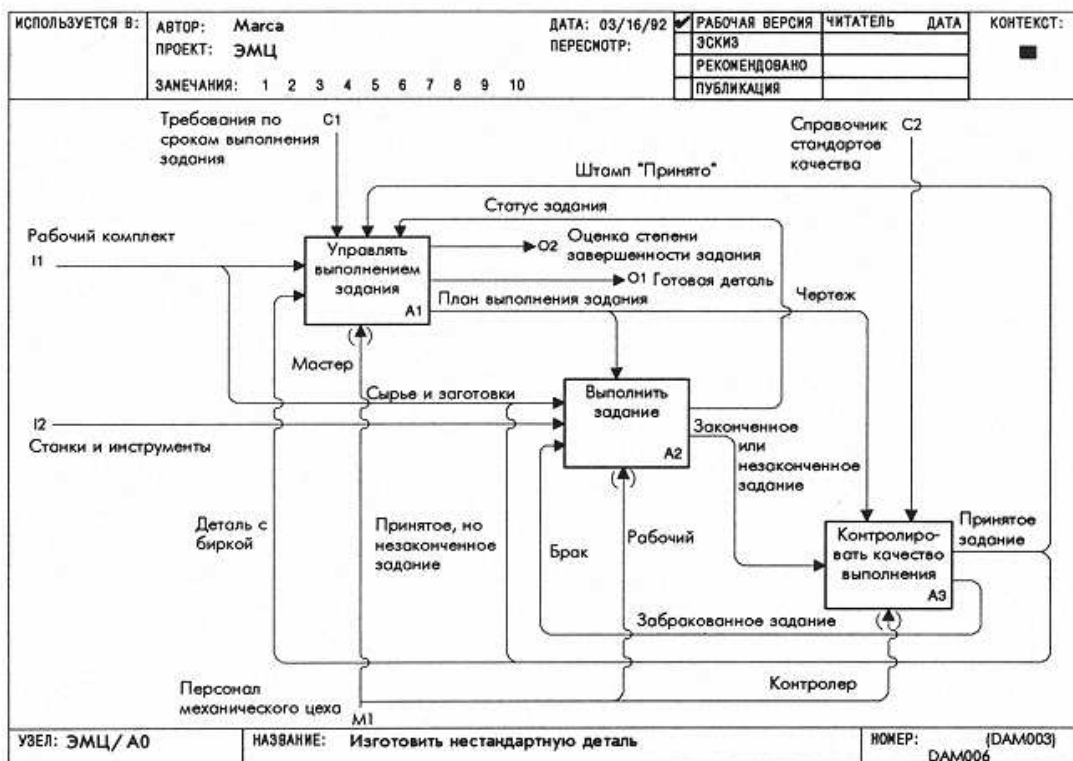
свойств каждого отдельного ее элемента. Эта структура может быть охарактеризована, например, ее топологическими свойствами, временем прохождения информации через сеть коммуникаций, а также надежностью их интеграции в единую систему.

В радиолокационной системотехнике математическое исследование таких схем основывается, к примеру, на теории графов. «Граф дает наглядное представление порядка и вида отношений между элементами двух множеств. В связи с этим он может быть использован (а вместе с этим вся последующая теория) для изображения структурных схем систем». В этом случае система представляется в форме структурной схемы, позволяющей оптимизировать ее структуру или, например, рассчитать ее надежность. «Представление структурной схемы в виде графа дается для того, чтобы упростить процесс последующего исследования». На его основе строится математическая модель структурной схемы [17, с. 14, 17].

*Абстрактные структурные схемы* (обобщенные структурные схемы) теории автоматического регулирования, теории сетей связи, теории синтеза релейно-контактных схем и логических схем вычислительных машин и др.), развиты в структурном анализе сложных систем. Они позволяют изучать объект в наиболее чистом виде, анализировать конфигурацию системы, степень связности и надежности ее элементов безотносительно к их конструктивному исполнению, единообразно исследовать различные по своей природе системы, отвлекаясь от всего вторичного [17, с. 11–12].

Одна из самых известных и широко используемых систем проектирования на основе структурного анализа – Технология структурного анализа и проектирования (Structured Analysis and Design Technique – SADT). Структурный анализ сложных систем используется для решении широкого круга проблем Программное обеспечение телефонных сетей, системная поддержка и диагностика, долгосрочное и стратегическое планирование, автоматизированное производство и проектирование, конфигурация компьютерных систем, обучение персонала, встроенное программное обеспечение для оборонных систем, управление финансами и материально-техническим снабжением – вот некоторые из областей эффективного применения SADT. На рис. 3.2 приведен пример структурного анализа сложного производственного комплекса.

На этапе системного проектирования определяются «подсистемы, компоненты и способы их соединения, задающие ограничения, при которых система должна функционировать, выбираются наиболее эффективное сочетание людей, машин и программного обеспечения для реализации системы...» [18].

Рис. 3.2. Пример структуры сложного производственного комплекса<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ross D. Structured Analysis (SA): A Language for Communicating Ideas // IEEE Transactions on Software Engineering. 1977. Vol. 3. № 1.

«С 1973 г. сфера использования SADT существенно расширились в связи с решением задач, связанных с большими системами, такими, как проектирование телефонных коммуникаций реального времени, автоматизация производства, создание программного обеспечения для командных и управляющих систем, поддержка боеготовности. Она с успехом применяется для описания большого числа сложных искусственных систем в различных областях (банковское дело, очистка нефти, планирование промышленного производства, системы наведения ракет, организация материально-технического снабжения, методология планирования, технология программирования)» [18].

Абстрактные структурные схемы в системотехнике иногда называют принципиальными блок-схемами (Schematic Block Diagram – SBD). Структурная блок-схема отображает компоненты технического и программного обеспечения и их взаимосвязи. Они описывают интерфейсы между компонентами системы и между компонентами системы и другими системами или подсистемами. Они представляют архитектуру системы [3, р. 62].

При структурных исследованиях, например, систем автоматического регулирования в них не остается иного содержания, кроме связей, их числа, дифференциального порядка, знака и конфигурации. Особое внимание уделяется выявлению взаимных связей между элементами системы. Для этого служат соответствующие блок-схемы, позволяющие, например, выделить различные каналы для оценки полученного в радиолокационной системе сигнала и синхронизировать их. В этом случае структура системы может быть описана математически с помощью теории графов в форме структурного графа. Это дает возможность оптимизировать структуру математически. Такого рода сети графов являются математическими моделями, отражающими топологию моделируемой структуры безотносительно к конкретным физическим свойствам ее элементов, которые могут быть электромеханическими устройствами, электронными блоками или же электрическими цепями (подробнее см. разд. 1.4).

Особенностью системотехники является использование в ней, наряду с абстрактными структурными схемами, что характерно и для классических технических наук, абстрактных алгоритмических теоретических схем сложных системотехнических комплексов. При этом речь может идти именно о *сложных* технических системах на макро-, микро- или даже наноуровне (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Особенности строения теоретических исследований в системотехнике

«Сложность» в данном случае состоит в способе рассмотрения (в отличие от интенции классической естественной и технической науки все свести к анализу и синтезу «простых» систем), определяемом системным подходом к исследованию и проектированию технических систем, поддержанному универсальными средствами компьютерного имитационного моделирования. В результате строится комплексная модель (конфигуроид), а компьютерная симуляция (конфигуратор) становится центральным звеном такого системного теоретического исследования и проектирования, являясь одновременно, с одной стороны, средством теоретизации и математизации, а с другой – заменителем реального эксперимента – компьютерным имитационным экспериментом системотехники.

Абстрактные алгоритмические схемы обобщены в кибернетике и описывают преобразования потока субстанции (вещества, энергии и информации) независимо от его реализации, дают идеализированное представление функционирования любой системы (в том числе и самой системотехнической деятельности, рассматриваемой как система). Они являются исходным пунктом программирования на ЭВМ. Эти схемы – результат абстрагирования от качественной определенности преобразуемого системой «естественного» процесса (который лишь в частном случае будет физическим процессом). Описанные, например, с помощью алгоритмических языков имита-

ционного моделирования такого рода схемы могут быть автоматически преобразованы в машинный код, а затем в соответствующие им математические схемы.

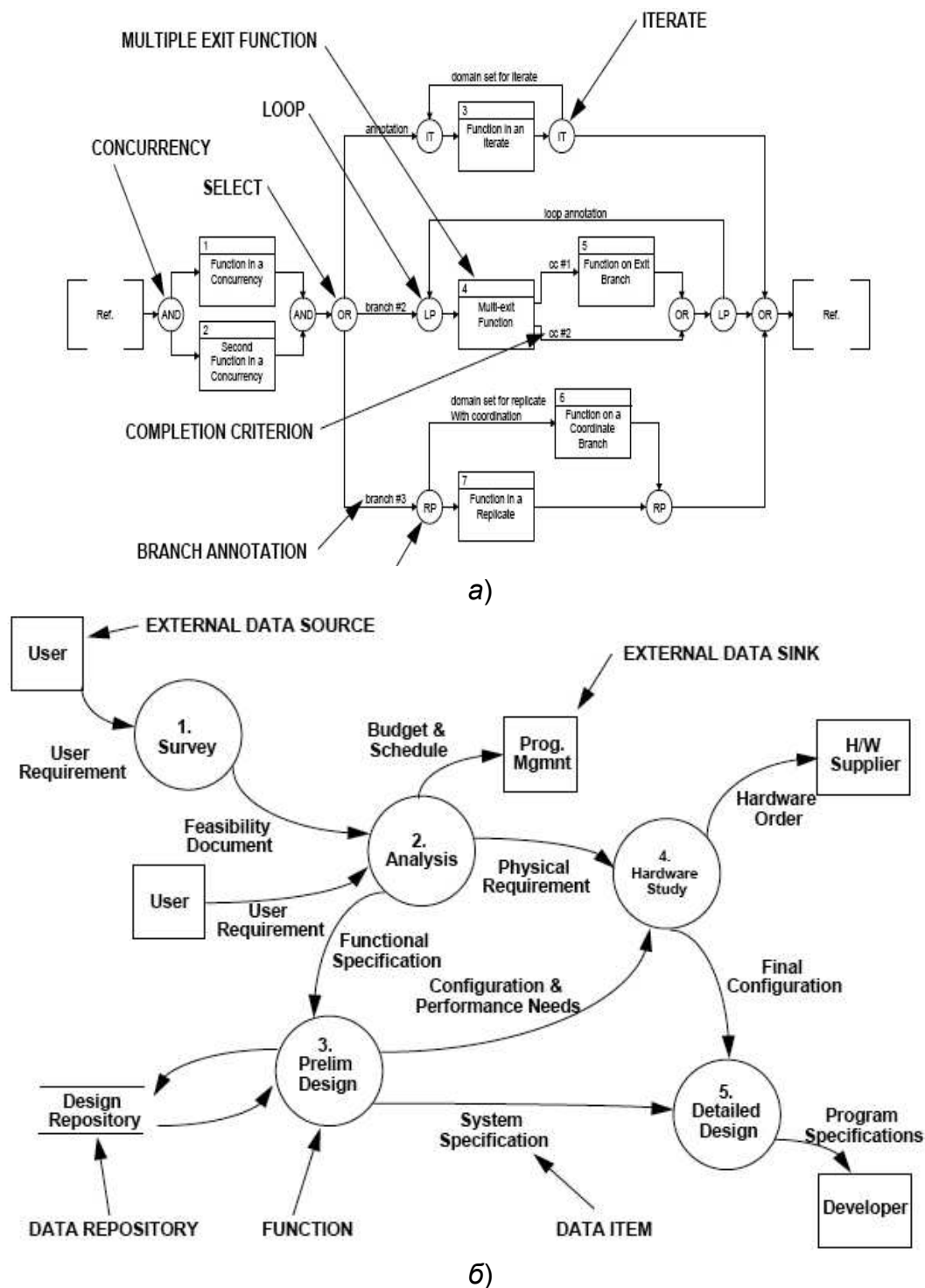
Большинство инженеров-системотехников используют сегодня графические представления систем. За последние годы в системотехнике разработано несколько способов графического представления функциональных характеристик и потоков данных в проектируемой системе. Наиболее распространенными из них являются поточные блок-схемы функционирования (Function Flow Block Diagram – FFBD), схемы потоков данных (Data Flow Diagram – DFD) и др. (рис. 3.4). Графические методы позволяют инженеру производить иерархическую декомпозицию различных моделей, используя особый графический язык, дающий возможность «увидеть» систему в целом, опуская несущественные для решения данной общей задачи детали.

«Цель поточной блок-схемы функционирования (FFBD) – описать системные требования с точки зрения функционирования (проектируемой системы. – *Прим. В.Г.*)... FFBD является функционально ориентированной, а не направленной на описание процесса принятия решений» [19, р. 1–2]. Схемы потоков данных представляют собой средство моделирования, служащее задаче «анализа, развития, реинжиниринга (т.е. перепроектирования новой системы с учетом старой. – *Прим. В.Г.*) и интеграции информационных систем» [3, р. 49].

Таким образом, если первые схемы используются для того, чтобы показать движение продукта через систему, то вторые отображают потоки данных.

Примером такого рода абстрактной алгоритмической схемы является также общецелевая система имитационного моделирования (General Purpose Simulation System – GPSS), использующая особый алгоритмический язык, специально разработанный для описания операций, производимых в сложной системе (см. разд. 1.5).

Другим примером может служить алгоритм обработки сигнала в радаре. В данном случае для анализа структуры особого типа сложного сигнала используется концептуальный и математический аппарат теории информации и кибернетики. Радиоволны же как элемент электродинамической картины мира рассматриваются тогда лишь в качестве частного случая волн произвольной природы. Сегодня в радиолокации используются инфракрасные и световые волны, гамма-излучение и др., а также механические ультразвуковые волны, проходящие через эластичные среды. Общей теоретической базой синтеза алгоритмов обработки информации в радиолокационной системотехнике является статистическая теория принятия решений.



**Рис. 3.4.** Блок-схема функционирования FFBD (а) и схема потоков данных DFD (б) [19]

Сначала математическое представление коррелируется с логической последовательностью обработки радиолокационного сигнала, затем оно коррелируется с выбранной структурой радиолокационной системы. Методы обработки информации в радиолокационной системотехнике описываются в ее специальном разделе – «Теории анализа и синтеза радиолокационных сигналов» (подробнее см. разд. 2.2).



Таким образом, в системотехнике как сами проектируемые сложные системы, так и системотехническая деятельность описываются независимо от их природы в предельно обобщенной системной онтологии.

Экспансия системотехники в самые различные области привела к выделению в ней таких различных относительно самостоятельных направлений исследования и проектирования, как, например, медицинская системотехника. В целом в ней можно сегодня выделить две основные сферы: 1) исследование и проектирование сложных технических систем (артефактов); 2) проектирование и анализ систем управления (фабрик, заводов, фирм, сложных проектов) как социотехнических систем.

В первом случае системотехника более ориентирована на инженерию и имеет целью развитие науки о проектировании или, точнее сказать, методологии проектирования, которую часто отождествляют с общей теорией проектирования. Однако в данном случае также подчеркивается тот факт, что техническая система — это всегда часть социотехнической системы (см. разд. 3.2). «Инженерное проектирование как подразделение интегрированной разработки продукта является сложным образованием. Оно является существенной деятельностью в рамках социотехнических систем... и основой (через производство) для большей части валового национального продукта любой развитой страны. Полезно исследовать сочетание факторов, которые влияют на продукт, проектирование и их содержание» [20, р. 14]. Провозглашается необходимость создания общей и даже аксиоматической теории проектирования.

Во втором случае системотехника рассматривается как деятельность по управлению сложными проектами. «Системотехника рассматривается как технология управления и инженерии, предназначенная контролировать процесс проектирования, создания и использования сложных искусственных систем... никакая сложная система не может быть создана одним человеком, поэтому системотехника сильно связана с административным управлением. Нам следует комбинировать эти две области и говорить о системотехническом менеджменте... Развитие системотехники является относительно новым. Ее возникновение обычно прослеживается в 1950-е и 1960-е гг. в связи с разработкой крупных военных и космических программ. В настоящее время, однако, она широко применяется в различных отраслях промышленности в качестве средства интеграции отдельных дисциплин и видов техники в общий сложный, но оптимизированный результат. Недавно была создана новая профессиональная организация — Международный совет по системотехнике

(International Council on Systems Engineering – INCOSE) для стимулирования и обмена знаниями в этой развивающейся и важной сфере... Системотехника включает в себя техническую и менеджерскую части...» [21, р. 113, 116]. В этом смысле «инженер-системотехник необязательно должен быть инженером, возможно вовсе не инженером или строителем системы, а более или менее только ее архитектором... Системотехника — это технология менеджмента» [7, р. 15] (см. разд. 3.3).

Оба названных выше направления рассматривают объект и процесс проектирования с системной точки зрения, и оба выделяют две основные характеристики.

1. В науке о проектировании, направленной на рационализацию инженерного проектирования [22, 23],

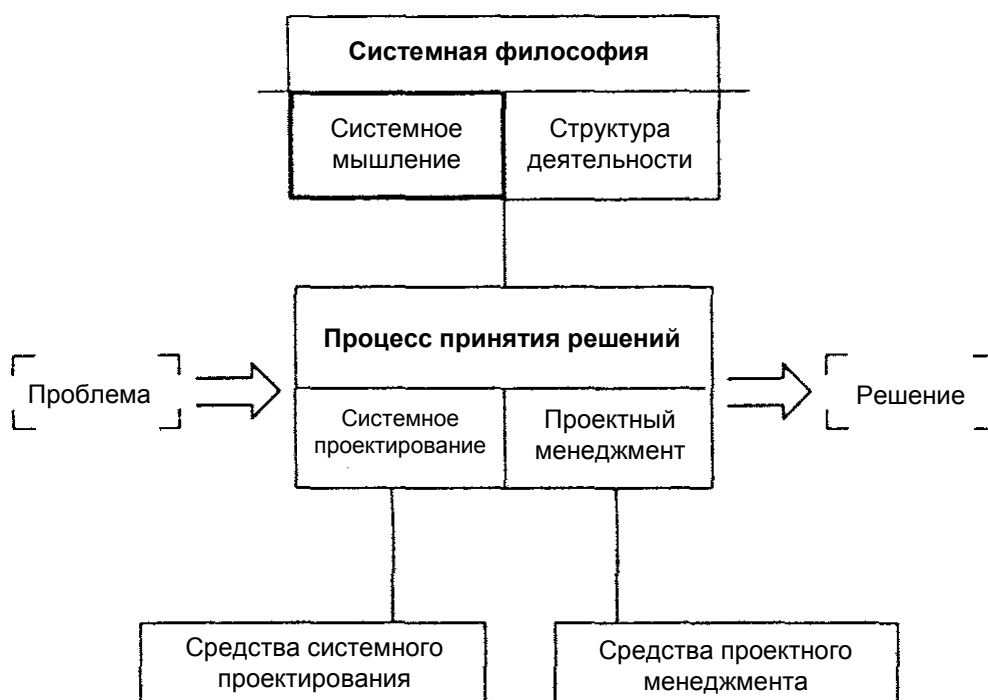
- знание о технических системах — общей теории технических систем [24, р. 103–113],

- знание о процессе проектирования — общей теории (или методологии) процесса проектирования [25, р. 723–730].

2. В системотехническом менеджменте —

- системное проектирование,

- проектный менеджмент [26] (рис. 3.5).



**Рис. 3.5.** Соотношение системного проектирования и системного менеджмента в системотехнике [26]

Именно таким образом связаны алгоритмические и структурные схемы теоретической системотехники. В технике и науке о проектировании используются два типа систем:

«1. Процессуальная система как множество и единство фаз, частичных процессов и операций, которые представляют процесс, направление деятельности или развития.

2. Реальный объект, вещь, реальная система, артефакт, образование или техническая система как множество и единство (взаимосвязей) элементов (т.е. частей, компонентов, органов, функций, процессов), из которых составлен данный объект» [20, р. 15].

Новым направлением в системотехнике, сформировавшимся за последние десятилетия, становится микро- и наносистемотехника (см. разд. 3.4).

Во введении к книге подчеркивалось, что системотехника также состоит из двух важнейших дисциплин: сферы технического знания, которыми оперирует инженер-системотехник, и системотехнического менеджмента. В нем подчеркивалось, что акцент делается на организацию процесса системотехнического исследования и проектирования [3, р. 3]. В нашей книге, напротив, анализируется структура системотехнического знания.

### **3.3. Радиолокационная системотехника как неклассическая научно-техническая дисциплина**

#### **3.3.1. Теоретические проблемы радиолокационной системотехники**

Радиолокационная системотехника явилась предтечей не только современных крупных научно-технических проектов, но и всей современной электронной промышленности, поскольку для реализации радиолокационного проекта впервые потребовалось создание совершенно новой элементной базы радиоэлектроники и обеспечение ее серийного производства. Поскольку радиолокационные станции в рамках систем противоракетной обороны (ПРО) стали рассматриваться уже как не чисто технические, а сложные человеко-машинные системы, то их разработка и практически перманентно продолжающееся совершенствование потребовали развития сопутствующей инфраструктуры, т.е. не только строительства технических объектов и связывающих их коммуникаций, разнообразных специальных транспортных путепроводов и т.д., но и создания связанной сети конструкторских бюро, научно-исследовательских институтов, заводов, армейских подразделений, осуществляющих эксплуатацию и поддержание жизнеобеспечения радиолокационных комплексов, включая поиск и подготовку соответствующих специалистов различных уровней, обеспечение их рабочих мест, а также размещение и социальное обустройство. Опыт создания системотехнических, а фактически со-

циотехнических комплексов, является особенно важным, поскольку именно благодаря этому стало возможным появление новой отрасли науки, техники и промышленности, а также системы подготовки ученых, инженеров, техников среднего звена, квалифицированных рабочих, обеспечивших дальнейшее ее успешное саморазвитие.

Учитывая, что все это осуществлялось в рамках оборонной тематики и было связано со строжайшей секретностью проводимых научных, инженерных и организационных мероприятий, многие конкретные исторические данные стали доступными только в самое последнее время.

Радиолокационная системотехника представляет собой качественно новый этап развития радиолокации, на котором происходят изменение парадигмы научного и инженерного мышления, становление неклассической научно-технической дисциплины, в которой электродинамическая картина мира замещается системно-кибернетической. Именно в этот период формируются, с одной стороны, базовые теоретические представления радиолокационной теории как неклассической науки (статистическая радиолокация), основы компьютерного моделирования и сначала аналоговой, а затем и цифровой компьютерной техники, вызванные к жизни необходимостью автоматического управления РЛС в составе сначала зенитно-ракетных, а затем и ракетно-космических комплексов, где человек-оператор не в состоянии принять и реализовать решения по управлению такого рода сложными системами просто даже в силу краткосрочности, почти мгновенности радиолокационных противоракетных действий. Это влечет за собой коренные изменения в самой структуре теоретической радиолокации — ее концептуальном и математическом аппарате, а также в теоретических схемах.

В этот период в радиолокации наряду с методами других дисциплин начинают интенсивно использоваться системотехнические методы. «Современная радиолокация использует последние достижения теории информации и кибернетики, вычислительной электроники, антенно-фидерной, приемопередающей и индикаторной техники, системотехники, автоматического управления и регулирования...» [27, с. 5]. Радиолокация попадает в новое семейство научно-технических дисциплин, имеющих системную ориентацию, втягивается в орбиту обслуживающих системотехнику дисциплин и в результате сама трансформируется в новое качество, новую дисциплину. По этому поводу академик А.Л. Минц писал: «Практическое применение, ... научные перспективы, ... технический уровень радиолокационных систем позволяют считать радиолокационную системотехнику самостоятельной дисциплиной, которая бурно развивается... Радиолокационная системотехника давно превратилась

в специальность, охватывающую довольно широкий контингент инженеров и научных работников» [1, с. 5–7].

Переход от классической радиолокации к радиолокационной системотехнике — это прежде всего переход от разработки отдельных радиолокационных станций различного назначения к созданию многофункциональных систем. Несколько РЛС, замкнутые на один пункт сбора и обработки информации, составляют радиолокационный узел; несколько таких узлов, обменивающихся информацией, образуют радиолокационную систему. Последняя содержит разнесенные по территории группы РЛС, устройства переработки информации и средства передачи данных. «Это нечто большее, нежели простое объединение радиолокационных средств: функциональное взаимодействие средств внутри системы создает гораздо большие технические возможности, по существу новое качество» [1, с. 6]. Радиолокационная система позволяет решать задачи, которые не под силу отдельным радиолокационным средствам. При их проектировании также возникает целый ряд специфически системных проблем. Любая радиолокационная система является, в свою очередь, подсистемой более крупной системы — системы управления, которая входит в еще более крупную систему, например навигационную.

Трудности математического описания радиолокационных систем связаны с их сложностью. Поэтому возникает необходимость в упрощении их описания (аппроксимации), характерном для любой научно-технической дисциплины. Такое описание может быть затем усложнено через последовательный ряд итераций. Математическая формализация позволяет построить единую методику для анализа и синтеза любых радиолокационных систем.

Одними из важнейших проблем в системотехнике являются определение, выбор и обоснование структуры системы. Причем при абстрактном рассмотрении структуры не интересуются внутренними свойствами каждого отдельного элемента. Структуру можно охарактеризовать топологическими свойствами, временем прохождения информации по сети связи, надежностью при нарушении ее целостности. Для радиолокационных систем особенно важны такие топологические свойства, как распределение по территории и направленность сети связей. При абстрактном анализе структур исследуется конфигурация внутренних связей в системе, выделяются основные типовые структуры (линейная, кольцевая, многосвязная) и их комбинации.

В радиолокационной системотехнике для математического описания абстрактных структурных схем используется аппарат теории графов. Изображение радиолокационной системы в виде структурного графа позволяет провести оптимизацию ее структуры математическими средствами.

Применение в радиолокации концептуального и математического аппарата теории информации и кибернетики позволило перейти к анализу так называемой тонкой структуры сложного сигнала независимо от его конкретного вида. Понятие радиолокационной информации связано с описанием носителя информации (сигнала), т. е. естественного процесса, протекающего в радиолокационной системе, — процесса ее функционирования. «Первоначально в радиолокации применялись электромагнитные волны только радиодиапазона. Отсюда и произошло название “радиолокация”. В настоящее время радиолокация использует широкий диапазон электромагнитных волн, включая инфракрасные и световые колебания (теплолокация и светолокация), а также рентгеновское и гамма-излучение. Методы радиолокации применяются также в звуколокации, основанной на использовании механических ультразвуковых колебаний упругой среды, а не электромагнитных волн» [28, с. 5].

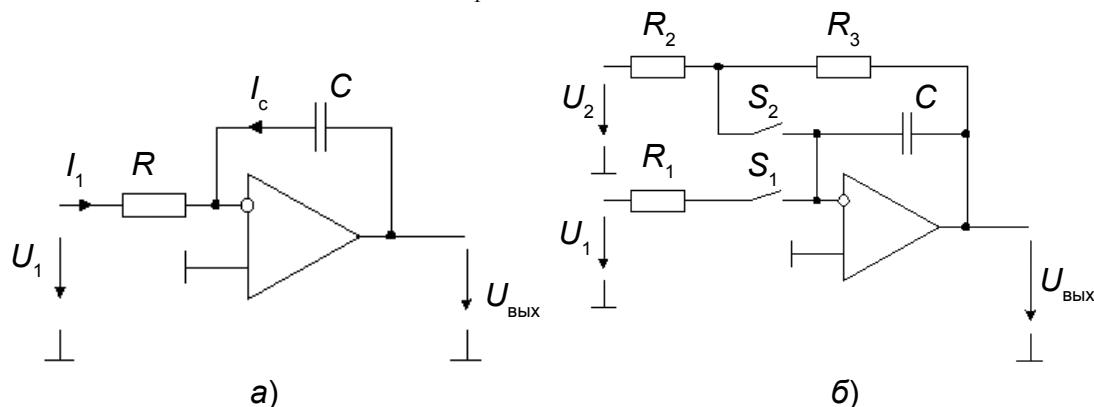
Еще одно отличие радиолокационной системотехники от классической радиолокации заключается в формировании в ней слоя абстрактных поточных схем — алгоритмических схем функционирования. Функционирование радиолокационной системы рассматривается в системотехнике как алгоритм обработки информации. Переход к теоретическому синтезу алгоритмов обработки радиолокационных сигналов стимулировался развитием аналоговой обработки данных с помощью сельсинов, решающих устройств, потенциометров, выполняющих определенные математические операции.

Для реализации операций интегрирования применяются, например, специальные схемы интегрирования. На рис. 3.6, *а* приведена схема инвертирующего интегратора, выполненного на основе инвертирующего включения операционного усилителя. С помощью схемы включения, приведенной на рис. 3.6, *б*, «можно реализовать необходимые начальные условия. Когда ключ  $S_1$  замкнут, а  $S_2$  разомкнут, схема работает так же, как цепь, изображенная на рис. 3.6, *а*. Если же ключ  $S_1$  разомкнуть, то зарядный ток при идеальном операционном усилителе<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Идеальный операционный усилитель характеризуется, например, мгновенным откликом на изменение входных сигналов (у реальных операционных усилителей время установления выходного напряжения — от единиц наносекунд до сотен микросекунд). Для выполнения математических операций над сигналами с высокой точностью реальный операционный усилитель должен обладать определенными свойствами, а именно: высоким коэффициентом усиления по напряжению, малыми входными токами, высоким входным и низким выходным сопротивлениями и т. д. При построении высокоточных схем на операционных усилителях необходимо учитывать влияние неидеальности усилителя на характеристики схемы. Для этого удобно представить усилитель схемой замещения, содержащей существенные элементы неидеальности.

будет равен нулю, а выходное напряжение сохранит значение, соответствующее моменту выключения. Для задания начальных условий следует при разомкнутом ключе  $S_1$  замкнуть ключ  $S_2$ . В этом режиме схема моделирует инерционное звено и после окончания переходного процесса, длительность которого определяется постоянной времени  $R_3C$ , на выходе интегратора установится напряжение. После замыкания ключа  $S_1$  и размыкания ключа  $S_2$  интегратор начинает интегрировать напряжение  $U_1 \dots$ <sup>1</sup>.



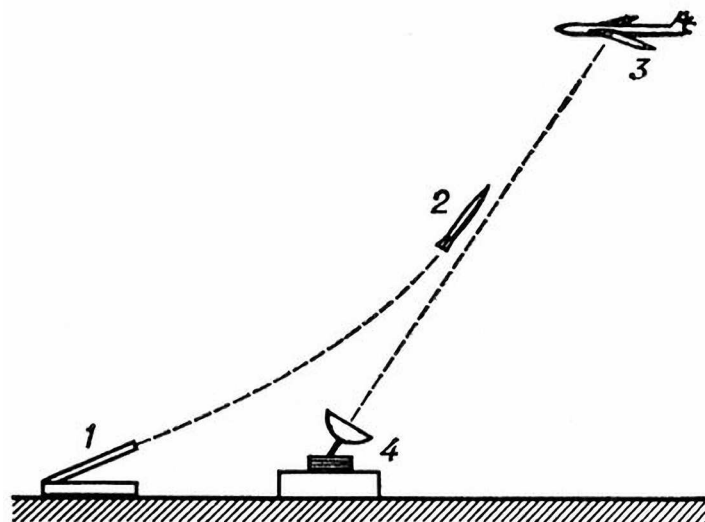
**Рис. 3.6.** Схема инвертирующего интегратора (а) и интегратор с цепью задания начальных условий (б)

«В конце войны совершенствование РЛС происходило в направлении как повышения дальности их действия и точности измерений, так и автоматизации отдельных операций посредством автоматических следящих систем для измерения дальности и слежения по угловым координатам (в станциях орудийной наводки), автоматических счетных устройств (в станциях для “слепого” бомбометания) и т.д.» [29]. Вычислительная техника сначала строилась с помощью аналоговых схем, служащих целям управления процессом слежения РЛС за целью, а проще — управления движением радиолокационной антенны, как это показано на рис. 3.7. «В следящей системе антенны радиолокационной станции рассогласованием служит угловая ошибка между радиолокационным лучом и направлением на цель; исполнительное устройство — электропривод антенны» [30].

Сигнал рассогласования вырабатывается соединенными по трансформаторной схеме сельсином-датчиком и сельсином-приемником, связанным с выходным валом. «Исполнительным устройством является система “генератор — двигатель” с редуктором; возмущающее воздействие — изменение нагрузки на выходном валу». Сравнивающее устройство следящей системы производит сравнение

<sup>1</sup> Схема интегрирования. — [http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/op/funop\\_9\\_2.htm](http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/op/funop_9_2.htm)

фактически получающейся выходной величины с заданной входной величиной и вырабатывается сигнал рассогласования. «Повышение точности измерения координат..., сопряжение РЛС с вычислительными машинами и общей системой радиоуправления снарядами-ракетами существенно изменили технические и тактические параметры РЛС, ставших важнейшим звеном автоматизированной системы управления средствами ПВО» [29].



**Рис. 3.7.** Схема системы наведения ракеты: 1 — стартовая установка; 2 — ракета; 3 — цель; 4 — РЛС

В современных неклассических научно-технических дисциплинах, к которым принадлежит радиолокационная системотехника, важнейшую роль начинают играть проектирование и имитационное моделирование на ЭВМ, позволяющие заранее, как бы в форме идеализированного (компьютерного) эксперимента, проанализировать и рассчитать варианты будущего функционирования сложной технической системы.

В начале 1950-х гг. в радиолокации начинают все более активно применяться цифровые вычислительные средства. В радиолокационной системотехнике имитационное компьютерное моделирование используется как в процессе функционирования РЛС, например для имитации «целей», так и в ходе разработки системы, когда строятся модели проектируемых систем [31]. «Качественный скачек в развитии радиолокационных систем произошел в связи с началом широкого применения вычислительной техники...» [1, с. 19]. В результате в настоящее время трудно провести границу между функциями радиолокационных систем и вычислительных устройств.

Общей теоретической основой для синтеза алгоритмов обработки в радиолокационной системотехнике служит теория статистических решений. Сначала задается математическая формула — формульно-



логическая (т.е. функциональная) схема, затем на ее основе строится логическая схема алгоритма, представляющая собой последовательность операций над сигналом (абстрактная поточная схема), которая далее соотносится с выбранной структурной схемой системы. Методы обработки информации в радиолокационных системах описываются в особой теории анализа и синтеза радиолокационных сигналов [32].

Радиолокационная системотехника как комплексная научно-техническая дисциплина отличается от классических технических наук тем, что она формируется нестандартным путем. В классических научно-технических дисциплинах техническая теория строится под влиянием определенной базовой научной (естественнонаучной или научно-технической) дисциплины, и именно из нее первоначально заимствуются теоретические схемы и образцы научной деятельности. В случае развития современных комплексных («неклассических») научно-технических дисциплин такой единственной базовой теории не существует, поскольку они ориентированы на решение комплексных научно-технических задач, требующих участия представителей многих научных дисциплин, группирующихся вокруг единой проблемной области. При проектировании современных радиолокационных комплексов используются электротехника, радиотехника, теория автоматического регулирования, инженерная психология, вычислительная техника и другие дисциплины. «Разработка системы редко бывает делом одного человека. Она связана с большим количеством дисциплин, а один человек не может быть хорошим специалистом в каждой из них» [27, р. 675].

Современные радиолокационные системы представляют собой сложные комплексы, включающие в себя, помимо радиотехнических устройств, самые различные типы механических блоков, оптические устройства, системы автоматики и вычислительные устройства, параметрические и парамагнитные усилители (применяемые для снижения уровня шума) и т.д. Их описание в виде кинематических, электрических схем, структурных схем теории автоматического регулирования и т.п. не укладывается в «универсальную» онтологическую схему радиотехники — электродинамическую картину мира. Это и стимулировало переход радиолокации к системно-кибернетической онтологии.

В радиолокации одно из важных мест занимает исследование деятельности человека-оператора и проектирование пульта управления радиолокационной системой (рис. 3.8). Переход к автоматическим сопровождению и обработке радиолокационной информации при-

вел к необходимости исследования и проектирования деятельности всей радиолокационной системы, т. е. алгоритма ее функционирования, часть которого может быть реализована оператором.



**Рис. 3.8.** Пульта управления станции 20Ю6.  
Командный пункт РЛС «Дунай ЗУ»<sup>1</sup>

Объектом исследования и проектирования становится не только создаваемая, но и создающая система. Сложный процесс координации разработчиков радиолокационной системы требует четкого описания этапов ее создания (алгоритмов разработки). Это облегчает организацию деятельности больших коллективов разработчиков. Другими словами, объектом исследования и проектирования становится сама инженерная деятельность.

В радиолокации важной составной частью и сложным видом инженерной деятельности, требующим высокой научно-технической квалификации, становится организация функционирования и технического обслуживания РЛС. Кроме того, процесс проектирования радиолокационной системы становится эволюционным и не прекращается со сдачей данного типа системы в эксплуатацию. Создаются «самосовершенствующиеся» системы, которые целенаправленно наращивают свою структуру в зависимости от изменения окружающей среды. При

---

<sup>1</sup> 40 лет на контроле космоса. Юбилейный сборник. М.: ООО «Место Печати» НИИДАР, 2008.

разработке радиолокационной системы уже на стадии исследования и проектирования учитываются изменения характера «целей», которые обусловлены многими социальными и экономическими факторами.

### **3.3.2. Организационный аспект становления радиолокационной системотехники**

На примере развития радиолокации в Советском Союзе хорошо видно, какие последствия для развития новой научно-технической дисциплины может иметь массированная поддержка государства. Научные и технические предпосылки развития радиолокации в СССР были созданы до и во время Второй мировой войны, но действительное развитие как новая область науки и техники и главным образом как отрасль промышленности она получила в первые послевоенные десятилетия.

28 июня 1946 г. было создано Министерство промышленности средств связи, куда вошли основные радиолокационные предприятия страны. Советом по радиолокации были выработаны стратегия развития радиолокации и радиоэлектроники, организации научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро и заводов, а также план, предусматривавший создание нового поколения техники. Совет Министров СССР утвердил этот план и 10 июля 1946 г. принял постановление «Вопросы радиолокации», где были определены важнейшие задачи этой отрасли науки и техника на пятилетний период (1946–1950 гг.). «Предстояло решить главную задачу: перевести промышленные предприятия на серийный выпуск новой техники. Небольшие и немногочисленные заводы Наркомата электропромышленности не могли справиться с этой задачей. Образованные в 1944–1945 годах главные управления ряда оборонных наркоматов решали локальные проблемы. Как для атомной и ракетной промышленности, так и для развития радиолокационной промышленности необходимо было создать производственный комплекс в масштабах всей страны.

Министерству электропромышленности были поручены разработка и производство наземных радиолокационных станций обнаружения, радионавигационных и других систем, Министерству вооружения — разработка и производство наземных радиолокационных станций управления огнем полевой и зенитной артиллерии, Министерству авиационной промышленности — разработка и производство самолетных радиолокационных систем. Министерство судостроительной промышленности приступило к освоению радио-

локационных станций для Военно-Морского флота. На радиолокационную тематику переводились три научно-исследовательских института и шесть особых конструкторских бюро Министерства промышленности средств связи, три ОКБ Министерства вооружения, семь ОКБ Министерства авиационной промышленности, два НИИ и три ОКБ Министерства сельскохозяйственного машиностроения, а также ряд научных организаций Министерства обороны» [33].

Это было связано прежде всего с новыми политическими проблемами, возникшими после разгрома гитлеровской Германии между бывшими союзниками и началом «холодной войны». После Хиросимы и Нагасаки появилась реальная опасность транспортировки атомной бомбы вплоть до самой Москвы. Стало очевидным, что без создания сплошной системы противовоздушной обороны Москва практически остается незащищенной от такого рода нападения. Для организационного и финансового решения этой сложнейшей задачи Совет по радиолокации при Совмине СССР в июне 1946 г. был преобразован в Комитет по радиолокации при Совете Министров СССР (Спецкомитет № 3), наряду с уже существовавшими спецкомитетами, координировавшими создание атомной бомбы и ракетной техники.

«В конце 1949 г. Комитет по радиолокации был ликвидирован, поскольку руководство страны пришло к выводу, что для борьбы с представлявшей наибольшую угрозу высотной реактивной авиацией противника могут использоваться только комплексы зенитного управляемого ракетного оружия. Вскоре, однако, стало ясно, что создание таких комплексов и систем невозможно без участия значительного количества предприятий и организаций практически всех отраслей промышленности страны. В феврале 1951 г. для координации этих работ было создано Третье главное управление (ТГУ) при Совете Министров СССР для организации системы противовоздушной обороны. Со всей страны переводились в Москву лучшие специалисты. К решению этой задачи были привлечены, наряду с известными учеными и инженерами, также в большом количестве молодые ученые и специалисты. Разработка системы велась невероятными темпами: от начала выпуска технической документации до изготовления экспериментальных образцов — не более двух месяцев. Работали, как правило, допоздна, иногда — ночами и без выходов» [33].

Прецедентом создания такой системы было успешное функционирование в ходе Второй мировой войны созданной в Англии с помощью США противовоздушной системы радиолокационной защиты.

Российские ученые и инженеры имели возможность ознакомиться с работой английских и американских радиолокационных станций GL-MK II и SCR-584, поставляемых в Россию по лендлизу во время войны. В конце и после войны они смогли познакомиться с германской техникой (например, с системой зенитных управляемых ракет Wasserfall) и главное — с организацией промышленного производства, инженерными и научными разработками в этой области, осуществляемыми германскими учеными и инженерами. Многие из них волей судьбы или по собственной воле были перемещены на территорию СССР и, несомненно, оказали большое влияние прежде всего в качестве экспертов-консультантов руководителей советского государства. Созданное под техническим руководством С.Л. Берия и научным руководством П.Н. Куксенко<sup>1</sup> СКБ-1 состояло главным образом из германских специалистов, на первых порах не имевших возможности общаться с российскими учеными и инженерами, которые образовывали отдельные исследовательские и проектные группы. Руководство ведущими отделами осуществлялось высшими офицерами КГБ.

В конце 1949 г. И.В. Сталин принял решение сосредоточить основные научные и конструкторские силы на разработке системы противовоздушной обороны г. Москвы. Научно-исследовательская работа по обоснованию тактико-технических требований к противоракетной обороне района была завершена в декабре 1949 г., а в начале 1950-х гг. на ее основе был проведен еще целый ряд исследований.

---

<sup>1</sup> Павел Николаевич Куксенко (1896—1980) с 1923 г. — начальник радиолaborатории НИИ Военно-технического совета связи РККА. В 1924 г. назначен постоянным членом Технического комитета ВТУ РККА и одновременно заведующим отделом радиоприемников Радиолaborатории НИИ ВТСС РККА, где работал до 3 февраля 1931 г. Участвовал в создании первой советской самолетной радиостанции РСБ-5. В 1937 г. в связи с отказом радиостанции самолета Валентины Гризодубовой во время дальнего рекордного полета был обвинен во вредительстве и арестован. С 1939 г. работал в НИИ радиопромышленности НКВД. В 1943 г. участвовал в разработке прицела бомбардировщика, за что в 1946 г. был удостоен Сталинской премии. Преподавал в Ленинградской военной краснознаменной академии связи имени С.М. Буденного. В 1947 г. ему присуждена ученая степень доктора технических наук. В сентябре 1947 года полковник инженерно-технической службы Куксенко назначен директором СБ-1 и главным конструктором системы «Комета». В 1950 г. стал главным конструктором системы «Беркут». В 1952 г. за создание системы «Комета» ему присуждена Сталинская премия. В 1953 г., после смерти Сталина и ареста Берии, освобожден от должности главного конструктора и назначен ученым секретарем научно-технического совета КБ-1 [33].

Однако отечественная промышленность была еще не готова решать задачи построения радиолокационных макросистем<sup>1</sup>.

«Для решения поставленной Сталиным задачи была избрана уже проверенная атомной эпопеей тактика — по типу Первого главного управления при Совете Министров СССР, созданного для работ по советской атомной бомбе. В СССР было образовано Третье главное управление — ТГУ, возглавившее разработку первой зенитно-ракетной системы для Москвы. Управление возглавил Василий Рябиков, а его непосредственным куратором стал Лаврентий Берия. Головной организацией-разработчиком системы стало КБ-1 Министерства вооружений..., преобразованное из Специального бюро № 1 (СБ-1). Начальник КБ-1, им стал Амос Елян, получил ранг заместителя министра вооружения и возможность перевода в свою организацию кого угодно и откуда угодно»<sup>2</sup>.

Проект будущей системы был грандиозным. «Обеспечить непроницаемость задуманной системы ПВО Москвы предстояло двум кольцам зенитных ракетных комплексов, расположенным на расстоянии 50 и 90 км от центра города. Информацию о подлете самолетов должны были выдавать выдвинутые вперед радиолокаторы кругового обзора. Прорвавшиеся через оба кольца летательные аппараты подлежали уничтожению ракетами “воздух — воздух” специальных истребителей. Чтобы иметь равнопрочную оборону, готовую отразить массовые налеты вражеской авиации на столицу СССР с любых направлений, задумали следующее: на каждом 10–15-километровом участке обоих колец должна быть обеспечена возможность одновременного обстрела до 20 целей» [33]. «Для этого, в свою очередь, надо было на двух кольцах разместить свыше 1000 ЗРК (зенитно-ракетный комплекс. — *Прим. К.Г.*) с двумя радиолокаторами в каждом»<sup>3</sup>. «Для наведения на цели зенитных ракет разрабатывались двадцатиканальные радиолокаторы Б-200. Перед каждым из них, на удалении от 1,2 до 4 км, должны были располагаться 60 стартовых столов, причем пусковые установки решено было разместить на расстоянии 300 м друг от друга... Испытания проводились с октября 1951 по сентябрь 1952 года, причем работа велась круглосуточно, в две смены по 12 часов»<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> *Первов М.* Первые зенитные управляемые. — <http://warweb1.chat.ru/fzenitk.html>

<sup>2</sup> Зенитная управляемая ракета ШБ-32. ЗРК С-25 (см.: *Коровин В.* Не только В-300 // *Техника и вооружение.* 2002. №8).

<sup>3</sup> См.: *Уткин А.* «Беркут», созданный «Алмазом».

<sup>4</sup> См.: *Первов М.* Первые зенитные управляемые. — <http://warweb1.chat.ru/fzenitk.html>

Любая область науки и техники, даже такая засекреченная во время и после войны, как радиолокация, не может развиваться без интенсивного обмена научно-техническими идеями в международном масштабе. Если же этого не позволяют условия секретности, то пробел восполняют агентурные данные или же такого рода «свободный» обмен опытом, который состоялся между российскими и германскими специалистами после войны. Этот же тезис подтверждало успешное сотрудничество и координация работы в области радиолокации до и во время войны между Великобританией и США.

«Работая в Германии, мы поняли, что после войны международное научное сотрудничество является крайне важной для развития научно-технического прогресса в местном масштабе... В МВТУ им. Н.Э. Баумана этими (побывавшими в Германии) учеными были организованы специальные лекции для повышения квалификации инженеров высшего звена с целью передачи опыта, полученного в Германии» [34, р. 27–28]. Советские специалисты за время пребывания в Германии составили более-менее ясную картину по радиолокационной промышленности<sup>1</sup>.

Сначала большие группы советских специалистов, переодетые в военную форму, были направлены в Германию для изучения и налаживания работы предприятий в оккупированных советскими войсками зонах. Если то или иное предприятие попадало позднее в зону других союзников, то из него вывозилось все, что можно было вывезти (по негласному соглашению союзных войск). То же самое делали американцы, англичане и др.

---

<sup>1</sup> «Общий перечень составил более тридцати предприятий, каждое из которых имело технологию и продукцию, превосходящую по своим показателям нашу отечественную. Самыми интересными были лаборатории и заводы “Аскания”, “Телефункен”, “Лоренц”, “Сименс”, АЕГ, “Бляупункт”, “Леве-радио”. Мы интересовались не только отдельно взятыми заводами, но и организацией а также структурой приборной и радиолокационной промышленности. Германские фирмы работали над массой технических проблем по своей инициативе, не ожидая указаний “сверху”. Они не нуждались в решениях Госплана или наркоматов, без которых у нас ни один завод не мог выпускать никакую продукцию. В частности, в этом была сильная сторона их приборной и радиотехнической промышленности. До войны бурно развивались электроизмерительная, приборная и радиопромышленность для завоевания всего европейского рынка, и их изделия успешно конкурировали с продукцией США. Фирмы “Гартман и Браун”, “Телефункен”, “Аншютц”, “Сименс”, “Лоренц”, АЕГ, “Роде-Шварц”, “Аскания”, “Карл Цейс” задолго до Второй мировой войны пользовались мировой известностью. Это создало прочную технологическую базу, которой у нас в этих отраслях в нужных масштабах так и не было к началу войны» [35].

Один из российских ученых следующим образом описывает свои наблюдения, сделанные им в Германии в мае 1945 г.: «Завод “Телефункен” в Целендорфе вначале был радиоламповым, а в последние годы почти полностью переключился на радиолокационную тематику... Цеха по изготовлению радиолокаторов хорошо оснащены электронными контрольными приборами. Завод оказался сравнительно новым, его строительство было закончено в 1939 году. Всего работало вместе с “остарбейтер” от 6 до 7 тысяч человек, из них 3 тысячи — инженеров и техников... Телевизионные экраны большого размера для радаров и приемники поставляли фирмы “Лоренц” и “Бляупункт”... радиолокационной техникой для нужд ПВО в основном занимались “Телефункен” и “Лоренц”, дистанционным управлением — “Аскания” и “Сименс”... Но другие отделения “Телефункена” строили наземные локаторы и станции радиоуправления ракетами. Отлично оборудованы ламповые цеха, здесь делали лампы типа магнетронов с мощностью в импульсе до 100 кВт!... на фирме “Лоренц”... Мы около двух часов проговорили с немецкими специалистами. Нам показали передатчики для радиолокаторов трех- и девятисантиметрового диапазонов.

Интересно, что лаборатория, специализировавшаяся на разработке телевизионных приемников, была быстро перепрофилирована на приборы с большими электронно-лучевыми трубками радиолокационного наблюдения.

Завод выпускал наземные радиостанции с большими вращающимися антеннами для привода самолетов на свой аэродром. Мы выяснили, что практически эти радиолокаторы использовались и для управления воздушным боем в зоне прямой видимости. Удивило количество станций кругового обзора с большим экраном, позволяющим видеть неприятельские самолеты и отличать их от своих... таких установок они выпустили уже около сотни.

Трудно было в это поверить, учитывая исключительную сложность и трудоемкость системы. Локатор “Фрея” начал разрабатываться еще в 1938 году. Он позволял обнаруживать самолет на расстоянии до 120 км. Для управления зенитным огнем был разработан радиолокатор “Вюрцбург” со сферической антенной. Ночные истребители наводились на цель мощной радиолокационной станцией “Вюрцбургский великан”.

В начале войны вся радиолокационная техника немцев ориентировалась на дециметровый диапазон. Немецкие инженеры посетовали: “Наше соревнование с англичанами было войной не только на поле боя и в воздухе, но и в лабораториях. Они еще в 1942 году добились больших успехов, благодаря смелому переходу на сантиметровый диапазон. Мы в это время не имели такой ламповой техники”...



[Советская же] радиотехническая и электронная промышленность, несмотря на серьезные научные достижения, по сравнению с тем, что мы видим здесь, безусловно, является слаборазвитой. Как и при всех предыдущих посещениях немецких заводов и лабораторий, нас поражало... обилие измерительной техники — универсальной и специализированной. Ламповые вольтметры, осциллографы, звуковые генераторы, наборы всевозможных фильтров, стандартных усилителей, волномеров, частотомеров и прочее, прочее — все это высокого качества, ибо отдельные образцы, считавшиеся у нас драгоценностью до войны, здесь попадались на глаза непрерывно. Такого изобилия ни один наш институт, ни один завод, ни одна лаборатория не могли себе даже представить. А ведь война лабораторий это не только война чистых интеллектов.

На вооружении у каждого “интеллекта” должны быть самые совершенные инструменты для научного исследования — это дает хорошо развитая приборостроительная промышленность... Мы продолжали в Берлине и его окрестностях собирать и отправлять в Москву достойную внимания литературу и, на чем я особенно настаивал, измерительную технику» [35].

На следующем этапе целые группы германских специалистов были отправлены в СССР для работы на оборонных предприятиях<sup>1</sup>. Интересно, что финансирование немецких специалистов было более высоким и зависело от их квалификации, ученой степени и академических титулов. Их экспертные оценки, научные и проектные разработки, несомненно, внесли определенный вклад в развитие радиолокации в СССР и в создание отдельных компонентов или принципов работы создаваемой системы, но не в ее концепцию в целом.

---

<sup>1</sup> «В октябре 1946 г. лучшие германские инженеры из тех, кто уже работал в рамках советской программы ракетостроения, были посажены в поезда и отправлены в различные точки СССР для консультирования по вопросам организации производства и проектирования ракет. К началу 1947 г. советские власти завершили перевод всех работ в области ракетной техники из Германии в секретные места расположения на территории СССР... Среди 2200 перевезенных специалистов были представлены области авиационной, ядерной, ракетной, радиолокационной науки и техники, электроники и химии. Они были приписаны к различным промышленным предприятиям СССР: число депортированных экспертов в области радиолокации и радиотехники, прикрепленных к Министерству связи, составило 350 человек». К концу 50-х гг. они возвратились обратно в Германию (см.: Zak A. Home rockets spacecraft centers people chronology. — [http://www.russianspaceweb.com/a4\\_team\\_moscow.html](http://www.russianspaceweb.com/a4_team_moscow.html)).

После смерти Сталина на руководящие должности пришли действительные разработчики и ученые, а германские специалисты прежде, чем отправились на родину, смогли непосредственно контактировать с российскими коллегами. Для решения поставленных правительством задач были привлечены лучшие научные и инженерные силы, с отличным финансированием (несмотря на трудности послевоенного времени). Были созданы новые или перепрофилированы исследовательские институты, конструкторские бюро и заводы. Кроме вышеуказанного КБ-1 теперь во главе с А.А. Расплетиным за научное сопровождение проекта отвечал Научно-исследовательский институт под руководством А.И. Берга.

«В первые послевоенные годы огромное значение имели исследования распространения радиоволн — без этого невозможно правильно проектировать радиолокационную технику. Их проводили Введенский, Леонтович и Фок. Результатом стало создание методик измерений и расчетных формул для решения конкретных задач. За работу по исследованиям дифракции и распространения радиоволн с учетом кривизны земной поверхности Фок был удостоен Сталинской премии... Вопросы приема и излучения, канализации сантиметровых волн, процессы в различных узлах и звеньях РЛС, фильтры и резонаторы, антенно-фидерные системы и т. д. были все-сторонне исследованы специалистами НИИ-108 и стали достоянием широкого круга разработчиков РЛС в нашей стране.

Помимо отчетов по НИОКР ведущие специалисты написали ряд книг и пособий по важнейшим вопросам радиолокационной техники, по которым обучалось не одно поколение будущих специалистов... В институте закладывались не только научные основы для разработки радиолокационных станций. Трудами его сотрудников создавались принципиально новые радиолокаторы»<sup>1</sup>.

«В 1953 г., после смерти Сталина, система “Беркут” была переименована в С-25. Павел Куксенко и Сергей Берия освобождены от занимаемых должностей. Главным конструктором С-25 назначен Александр Расплетин. В октябре того же года проведены кон-

---

<sup>1</sup> «В 1966 году на институт возлагаются обязанности головной организации в Министерстве радиопромышленности по направлению РЭБ (радиоэлектронная борьба — разработка систем создания помех для радиолокаторов, в том числе радиотехническая разведка, цель которой — получение информации о параметрах всех радиотехнических объектов вероятного противника), он получает название Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт — ЦНИРТИ» (см.: *Мажоров Ю. ЦНИИРТИ 60 лет. Страницы истории // Электроника: Наука. Технология. Бизнес, 2003. № 4).*

трольные пуски, а с ноября 1953 г. по сентябрь 1954 г. — еще одни комплексные испытания. 1 октября 1954 г. с целью определения готовности системы С-25 к принятию на вооружение были начаты государственные испытания. Их кульминационным моментом стала одновременная стрельба двадцатью ракетами по двадцати мишеням... В декабре 1954 г. государственные испытания были завершены... 7 мая 1955 г. Постановлением правительства С-25 была принята на вооружение...»<sup>1</sup>.

У руководства новой системой встали действительные ее разработчики, вокруг которых сложился целый штаб в виде тематических подразделений. Одним из таких талантливых организаторов стал Расплетин. «Он впервые в нашей стране, а возможно — и в мире, создал структуру организации, которая на практике реализовала системный подход к разработкам сложных технических систем. Такими системами, безусловно, являются зенитные управляемые ракетные комплексы и системы космической разведки. Огромный конгломерат отдельных конструкторских бюро, заводов и заводских КБ составлял слаженный организм, который выполнял технические и технологические разработки под единым руководством ради получения наивысших характеристик системы в целом»<sup>2</sup>. Именно этот момент можно считать истинным началом развития радиолокационной системотехники в нашей стране.

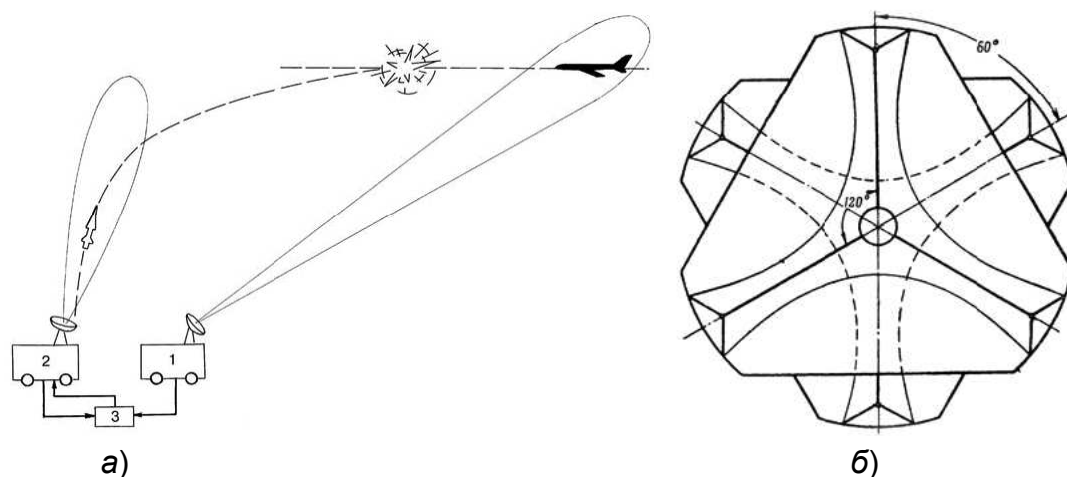
«Выполнение радиолокатором разнообразных функций (обзор пространства, автоматическое сопровождение обнаруживаемых в этом пространстве объектов и решение других задач), т.е. *многофункциональность* радиолокатора, теперь является обычным делом. Тогда же, в начале 50-х гг., переход от специализированных радиолокаторов к многофункциональным был событием революционным... Расплетин прибег к решению задачи по частям. Для начала Расплетин предложил использовать секторные радиолокаторы (рис. 3.9, б) только как управленческое средство. В этом качестве каждый такой радиолокатор должен был обнаруживать все появляющиеся в его секторе ответственности цели, автоматически сопровождать одновременно до 20 целей, выдавать по ним целеуказания 20-ти ЗРК (зенитно-ракетный комплекс) с узколучевыми радиолокаторами (рис. 3.9, а), и — пока только для контроля за действиями ЗРК — сопровождать пущенные ими ракеты, фиксировать поражение целей. В таком сокращенном виде расплетинское предложение, естественно, вписывалось в исходно принятое построение “Беркута”

<sup>1</sup> Первов М. Первые зенитные управляемые. — <http://warweb1.chat.ru/fzenitk.html>

<sup>2</sup> Расплетин А.А. — <http://pvo.guns.ru/people/raspletin.htm>

и было принято “с ходу”. Так было достигнуто главное — развертывание работ над секторным радиолокатором, который на том этапе назывался станцией группового целеуказания...

Необходимо было сделать следующий шаг — отказаться от узколучевых радиолокаторов и возложить выполнение всех функций на секторные радиолокаторы... Так определился окончательный облик будущей системы ПВО Москвы: радиолокаторы кругового обзора (в том числе выдвинутые на дальние рубежи) — для обнаружения подлетающих целей (А-100), и два кольца секторных многоканальных зенитных ракетных комплексов — радиолокаторов наведения Б-200 с зенитными ракетами В-300 (32 комплекса на внешнем кольце и 24 на внутреннем). Для управления системой предусматривались центральный (рис. 3.9) и четыре секторных командных пункта, для хранения ракет и подготовки их к боевому использованию — специальные технические базы» [36]. Это было поистине системное решение поставленной проблемы!



**Рис. 3.9.** Зеркально-ракетный комплекс с узколучевыми радиолокаторами (а) и формирователи «лопатообразных» лучей на центральном радиолокаторе наведения (б): 1 — радиолокатор сопровождения цели; 2 — радиолокатор сопровождения ракеты и передачи на нее управляющих команд; 3 — счетно-решающий прибор

Использование узколучевых локаторов соответствовало тогдашней международной практике и использовалось, например, американцами. Поэтому в первоначальном проекте предполагалось использование только таких РЛС. Расплетин, понимая необходимость нового подхода с использованием многофункционального секторного радара и невозможность убедить руководство идти по этому пути, предложил сначала промежуточное комбинированное решение — использовать его только на центральном радиолокаторе наведения (ЦРН). Тем самым была решена главная задача — соз-

дание такой РЛС и отработка ее функционирования. После этого можно было легко перейти к развитию всей системы на основе этого принципа.

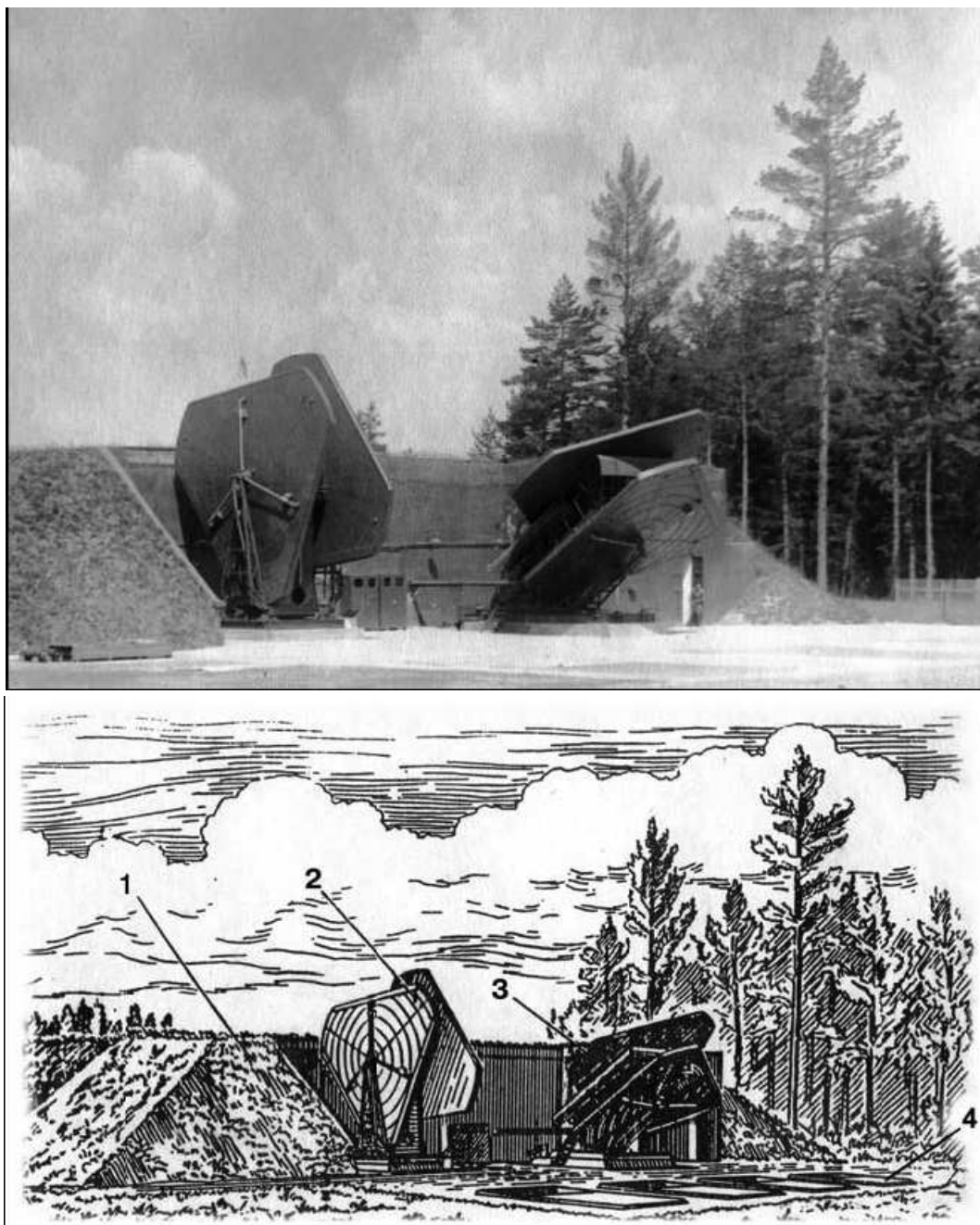
«Избранные для ЦРН 10-сантиметровый рабочий диапазон длин волн и приемлемые (с учетом стационарного исполнения ЦРН) габариты антенн позволяли создать достаточно острые для точного определения направлений на цели и ракеты “лопатообразные” лучи и необходимые для обеспечения требуемой дальности действия радиолокатора передающие устройства большой мощности.

Сканирование рабочего сектора с достаточной для управления наведением ракет частотой (5 раз в секунду) осуществлялось простейшим для того времени способом — равномерным непрерывным вращением антенных конструкций, составленных из шести размещенных через 60 градусов формирователей “лопатообразных” лучей — гигантских “долек круглого сыра” (так формирователи и прозвали — “сырами” — см. рис. 3.9, б и 3.10).

Шесть “сыров” образовывали двухслойную конструкцию — в каждом слое по три “сыра” со сдвигом на 120 градусов, причем один слой сдвинут относительно другого на 60 градусов. Подключение очередных “сыров” к передающе-приемным трактам через каждые 60 градусов поворота антенн обеспечивало непрерывное сканирование рабочего сектора. Равномерность вращения антенн обеспечивали специальные приводы. Мощные импульсные передатчики работали синфазно. Принимаемые эхо-сигналы целей и сигналы ответчиков ракет усиливались на высокой частоте и после преобразования на отдельные для целей и ракет промежуточные частоты выдавались в соответствующие приемные устройства» [36, с. 129].

«Проект “Беркут” охватывал все — от расстановки вокруг Москвы будущих объектов системы до разработки новых электровакуумных приборов... Интенсивная работа опытного производства КБ-1 и привлеченных к работам по “Беркуту” серийных заводов обеспечили изготовление экспериментального образца в чрезвычайно короткие сроки — уже к весне 1951 г... В ходе испытаний проводилась доводка аппаратуры ЦРН, в нее вносились необходимые изменения... Не требуют изменений только примитивные проекты. В сложные же системы в процессе их отработки приходится вносить множество изменений... От постановки задачи — создать принципиально новый вид вооружений, каким тогда являлось зенитное управляемое ракетное оружие, до ее решения — поражения этим оружием самолетов-мишеней — прошло менее трех лет... Функции головного завода по ЦРН были возложены на практически единственный в то время серийный радиолокационный завод — Кунцевский завод

№ 304 Минвооружения. Ему было поручено изготовление большей части аппаратуры для секторного радиолокатора... Цеха завода были расширены и реконструированы, построены были и новые...



**Рис. 3.10.** Внешний вид центрального радиолокатора наведения Б200:

1 — бетонированное помещение; 2 — угломестная антенна;  
3 — азимутальная антенна; 4 — антенны передачи управляющих команд<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Всю аппаратуру, в том числе мощные передатчики и входные усилители сигналов, предлагалось разместить в подземном помещении (реализовано было в виде полузаглубленного бетонированного бункера). Снаружи располагались только антенны — основные (азимутальная и угломестная) и передачи команд на ракеты [36, с. 129].

Объем изготавливаемой аппаратуры и другого оборудования был огромен, а других заводов, близких по специализации, не было. Решено было организовывать необходимые производства при существовавших заводах самого разного профиля, использовать производственные площади этих заводов, оборудование общего назначения и, что особенно важно, их организационные структуры... Например, на Ленинградском заводе полиграфических машин было организовано изготовление станций передачи на ракеты управляющих команд... На привлеченных к изготовлению средств “Беркута” предприятиях были созданы специализированные конструкторские бюро и лаборатории.

Впоследствии из радиотехнического производства при заводе полиграфических машин вырос отдельный завод — Ленинградский завод радиотехнического оборудования... Для изготовления радиотехнических средств требовалось огромное количество радиодеталей и электронных ламп, необходимы были разработка и организация серийного производства изделий новой номенклатуры, в том числе специальных высокочастотных электровакуумных приборов. Для передачи сигналов в помещениях ЦРН требовались километры коаксиального кабеля<sup>1</sup>... За короткое время надлежало изготовить и настроить огромное количество аппаратуры...

К концу 1954 г. государственные испытания 20-канального полигонного комплекса были успешно завершены... В начале 1955 г. закончились приемосдаточные испытания на всех 56 подмосковных комплексах... Создание за 4,5 года такой системы, какой явилась московская зенитная ракетная система ПВО, — задача фантастическая для любого государства. Она не была бы выполнена, если бы... государство не предоставило для ее решения... неограниченные возможности.

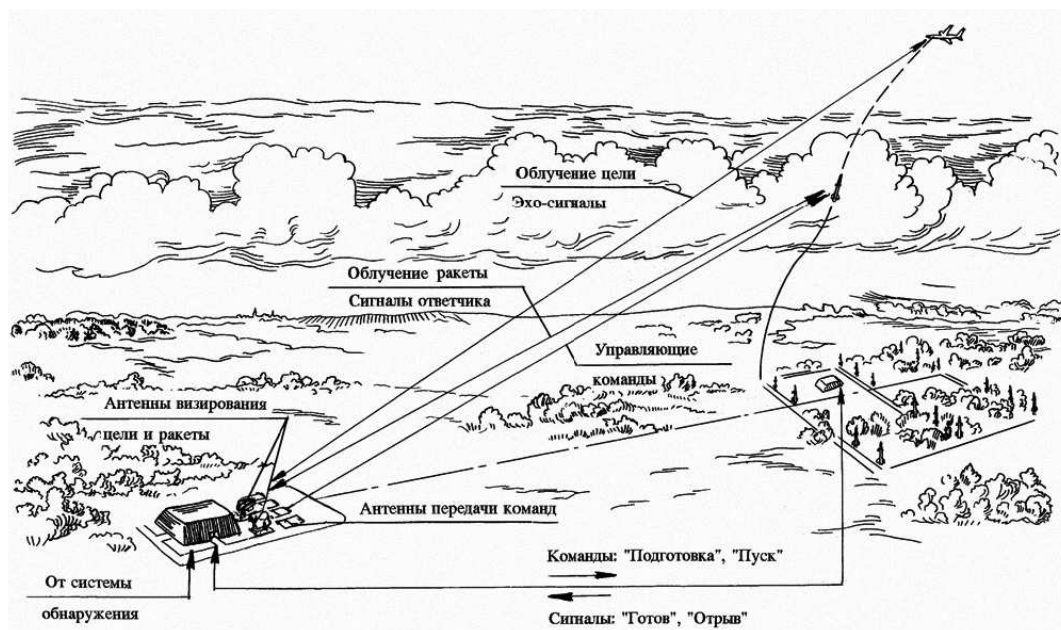
Руководство работами над системой было возложено на выдающихся ученых, конструкторов, организаторов производства. Опора делалась на талантливую, образованную молодежь. Были созданы специальные организации-разработчики и самые разнообразные производства, испытательный полигон, необходимые военные организации...

Высокие потенциальные возможности системы С-25 позволили в ходе ее эксплуатации провести ряд модернизаций радиолокатора наведения и ввести в ЗРК новые модификации зенитных управляемых ракет. Модернизации С-25 существенно расширяли ее тактико-технические характеристики, поддерживали их на уровне, достаточном для поражения непрерывно совершенствовавшихся средств воздушного нападения. Прослужила С-25 три десятилетия.

---

<sup>1</sup> Здесь пригодился и накопленный после войны германский опыт. У нас, например, не было налаженного производства разнообразных разъемов и штекеров, как это было в Германии уже во время войны [35].

Прорыв, совершенный в ходе работ над С-25 в науке, технике, технологии, созданные коллективы квалифицированных разработчиков, эффективная кооперация промышленности, прекрасно оснащенный полигон, специальные зенитные ракетные войска стали фундаментом дальнейшего развития нашего зенитного управляемого ракетного оружия» (рис. 3.11) [36, с. 50].



**Рис. 3.11.** Схема функционирования системы ПВО на местности [36, с. 4]

В штаб генерального конструктора вошли специалисты, способные комплексно решать возникающие системные проблемы. В КБ-1 эту роль выполнял специально созданный тематический отдел<sup>1</sup>. Позже такие отделы и даже более крупные подразделения стали обязательной частью любой крупной проектной организации. В их задачи входила не только координация всех разработчиков этой сложнейшей системы и методическое руководство ими, но и системное проектирование, а также комплексное исследование создаваемой системы.

Например, при ОКБ «Вымпел» был создан Научно-тематический центр (НТЦ) для работ по перспективным системам ПРО. Начальником НТЦ ОКБ «Вымпел» назначен А.Г. Басистов. 15 января 1970 г. был подписан приказ об организации Центрального научно-производственного объединения (ЦНПО) «Вымпел», которое непосредственно подчинялось министру радиопромышленности. Его директором и техническим руководителем был назначен В.И. Марков, заместителем директора по научной работе стал главный конструктор

<sup>1</sup> Тематическая лаборатория по системе «Беркут» для координации работ конструкторских бюро и заводов — изготовителей аппаратуры в КБ-1 была образована в конце 1951 г. (см.: Зенитная управляемая ракета ШБ-32. ЗРК С-25 // Техника и вооружение, 2002. №8).



тор системы противоракетной обороны Г.В. Кисунько. «В первоначальный состав ЦНПО “Вымпел” вошли ведущие институты ОКБ “Вымпел” (НИИРП), НИИ-37 (НИИДАР), РТИ АН СССР, КБРП им. А. Расплетина (НИИ радиофизики), Днепропетровский завод (ДМЗ), Гомельский завод (ГРЗ) и головная монтажная организация ГПТП. Главным предприятием объединения стал научно-тематический и технологический центр (НТТЦ). На него возлагались задачи разработки концептуальных технических решений и проектов для систем ПРО, СПРН и СККП, выработки согласованных требований к техническим средствам, разрабатываемых в разных отраслевых институтах, разработка и внедрение новых технологических процессов и оперативное руководство в области практического ввода в действие этих систем. При ЦНПО “Вымпел” был организован объединенный научно-технический совет (ОНТС) (председатель совета — В.И. Марков, заместитель — Г.В. Кисунько). В ОНТС по проблемам ПРО, СПРН и СККП входили ведущие ученые страны: генеральные конструкторы, академики Б.В. Бункин, А.И. Савин, П.Д. Грушин, главные конструкторы В.П. Сосульников, Ю.Г. Бурлаков, В.Г. Репин, Т.Р. Брахман, А.А. Колосов, В.С. Бурцев и др... В этот период в ЦНПО “Вымпел” работало около 80 тыс. сотрудников, среди которых было свыше 70 докторов и 700 кандидатов наук»<sup>1</sup>.

В результате реализации этого и последующих проектов такого рода выяснилось, что многие стратегические задачи и проблемы должны корректироваться не только в ходе разработки, но и внедрения, причем речь шла не о внедрении отдельных компонентов и подсистем, а об их системной стыковке и внедрении системного комплекса в целом. «В КБ-1 для шефства над этими работами было создано специальное подразделение во главе с Басистовым — группа инженеров, в основном окончивших военные академии. Члены этой группы персонально закреплялись за каждым вводимым в строй объектом. Специалисты-отраслевики провели с этой группой цикл занятий по всем составляющим ЦРН устройствам»<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> См.: Система предупреждения о ракетном нападении. — [www.vko.ru](http://www.vko.ru); [http://old.vko.ru/print.asp?pr\\_sign=archive.2005.25.13\\_13](http://old.vko.ru/print.asp?pr_sign=archive.2005.25.13_13)

<sup>2</sup> «В ходе испытаний проводилась доводка аппаратуры ЦРН, в нее вносились необходимые изменения. ... Для ввода в строй подмосковных ЗРК при головном Кунцевском заводе было создано специальное монтажное управление СМУ-304. В нем был учрежден институт главных настройщиков, возглавлявших работы на каждом данном комплексе.... Начались систематическая эксплуатация ЦРН и его испытания, включая облеты самолетами. В ходе их в аппаратуру радиолокатора приходилось вносить некоторые изменения». Эти изменения приводили к необходимости перепроектирования и переделки этой аппаратуры заводами-изготовителями уже в ходе отладки системы [36, с. 75].

Поскольку эта задача была весьма непростой, требовалось постоянно производить системный анализ и оценку функционирования уже построенной системы (или вновь вводимых отдельных ее частей), а организация функционирования этой системы означала одновременно ее постоянное развитие в связи с появлением, например, нового типа «целей». Поэтому наряду с утилизацией и снятием с эксплуатации отдельных ее компонентов, было необходимо уже на стадии тематического проектирования предусматривать развитие данной системы<sup>1</sup>.

Кафедры по радиолокации в МЭИ и МАИ начали готовить специалистов в этой области как высшего, так и среднего звена. Для обслуживания радиолокационных станций были созданы новые специально обученные войсковые подразделения, построены новые дороги (бетонка вокруг Москвы) и площадки для размещения РЛС и ракет. Был организован серийный выпуск РЛС. Для координации научных разработок при Совете по радиолокации уже в 1945 г. учреждается Научно-технический совет, а в 1946 г. — Информационный центр и начинается издаваться специальный журнал, публикуется целый ряд обзоров, выходят первые монографии. Центр проводит регулярные семинары и конференции по радиолокации.

---

<sup>1</sup> Басистов Анатолий Георгиевич (1920–1998), советский ученый и конструктор в области радиотехники и электроники, генерал-лейтенант авиации (1984 г.), член-корреспондент АН СССР (1984 г.), а с 1991 г. — РАН. В 1938–1941 гг. учился в Московском энергетическом институте, затем в Ленинградской военно-воздушной академии, которую окончил в 1944 г. С 1950 г. работал в КБ-1 Министерства оборонной промышленности, затем — в КБ Министерства радиопромышленности по созданию систем противовоздушной обороны, где принимал участие в разработке многоканальной зенитной системы С-25 для ПВО Москвы. С 1968 г. работал в Особом конструкторском бюро (ОКБ) «Вымпел» по созданию систем противоракетной обороны, участвовал в разработке многоканальной зенитной ракетной системы дальнего действия С-200. С 1979 г. — главный, а с 1985 г. — генеральный конструктор, научно-технический руководитель НИИ радиоприборостроения. Наряду с научной и конструкторской деятельностью руководил кафедрой «Информационные системы» в Московском физико-техническом институте.

Основные научные труды посвящены повышению эффективности фильтрации сигналов и разрешающей способности радиолокационных систем, разработке многофункциональных информационных систем ПРО на основе радиолокационных средств и оптико-электронных устройств, управляемых высокопроизводительными наземными и бортовыми ЭВМ, разработке комплексов систем управления летательных аппаратов, поражающими воздушные и космические объекты, и др.

Все это создало беспрецедентную базу для развития за кратчайший срок на самом высоком мировом уровне радиолокационной науки, техники и промышленности, что в итоге стало основой развития новых информационно-компьютерных технологий<sup>1</sup>.

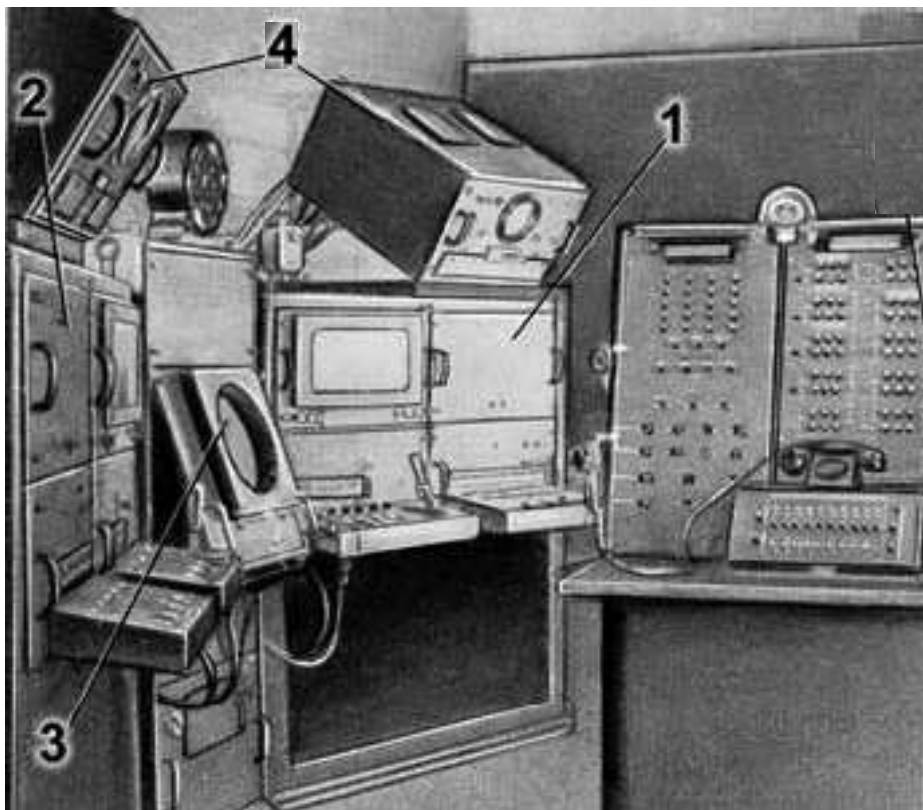
В процессе эксплуатации новой системы возникли также сложные проблемы организации ее функционирования, связанные, например, с принципиально иной, более ответственной ролью операторов РЛС, в особенности на центральном пульте управления.

Во-первых, с усложнением системы более сложными становились пульты управления (рис. 3.12), а само управление такой системой требовало специального инженерного образования.

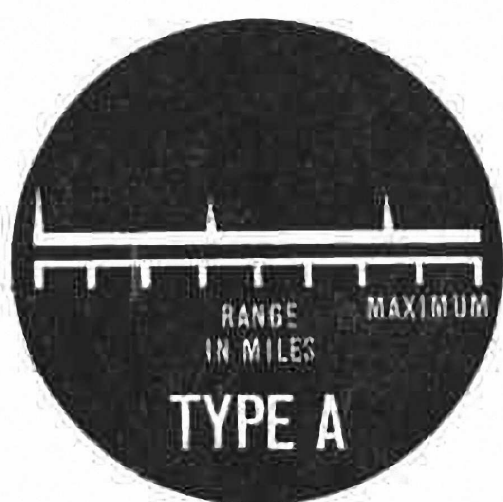
Во-вторых, в связи с необходимостью почти мгновенного принятия решения оператором об идентификации и уничтожении цели возрастали требования к системам отображения информации. Требовалось не просто нажать кнопку для пуска ракеты, а принять ответственное решение: или направить многомиллионную по стоимости ракету на ложную цель, или не уничтожить летательный аппарат возможного противника. Стремление к упрощению картинки на мониторе радиолокатора не всегда облегчало, а зачастую затрудняло распознавание цели оператором, так как человеческий глаз быстрее устает от монотонной картины (рис. 3.13 и 3.14).

---

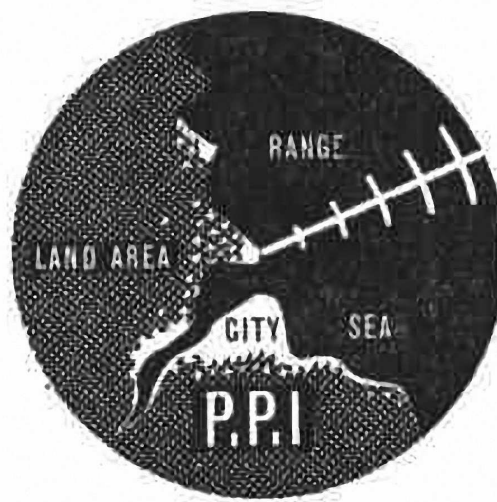
<sup>1</sup> При этом, однако, важно учитывать и отрицательные моменты в организации такого рода научного исследования и проектной деятельности в рамках тогдашнего военно-промышленного комплекса: часто неоправданная секретность, корпоративность, ориентация на военные цели, дублирование работ и нерациональное использование финансовых, материальных и персональных ресурсов. В это время процветали протекционизм (без рекомендации изнутри или от вышестоящих организаций было практически невозможно устроиться на работу) и лоббирование собственных проектов в правительстве, иногда в ущерб делу. Каждый главный или генеральный конструктор имел своего покровителя в Политбюро, каждый стремился иметь в своей организации родственников из высших чиновников, чтобы иметь возможность получать внеочередное финансирование. По стопам Берии пошли многие руководители партии и правительства СССР. В ОКБ «Вымпел» работали сыновья Устинова (министра вооружения, а позднее и министра обороны Советского Союза) и Сулова (главного идеолога партии и серого кардинала), родственники Хрущева и др. Начав с простых инженеров, их постепенно продвигали по службе, создав, наконец, под их началом собственные организации, финансирование которых было (часто неоправданно) заметно лучше остальных отраслевых КБ и НИИ. Постоянные реорганизации и подковерная борьба за лидерство мешали работе, а стремление выжать из начальства побольше средств приводило к раздутым штатам (фактически же к скрытой безработице), нерациональному использованию огромных ресурсов и замораживанию важных для страны, но конкурирующих проектов.



**Рис. 3.12.** Рабочие места операторов выбора целей и пуска ракет двух пятиканальных групп (1, 2), между которыми расположены — индикатор воздушной обстановки радиолокатора обнаружения подлетающих целей (3) и индикаторы функционального контроля (4). На рабочем месте командира: слева — индикация состояния стрельбовых каналов, справа — стартовых столов и ракет на них [36, с. 41]



а)



б)

**Рис. 3.13.** Отображение цели на экране радиолокатора: показаны разные типы радиолокационных дисплеев, но как на простом (а), так и на сложном (б) индикаторном устройстве по экрану движется только одна точка

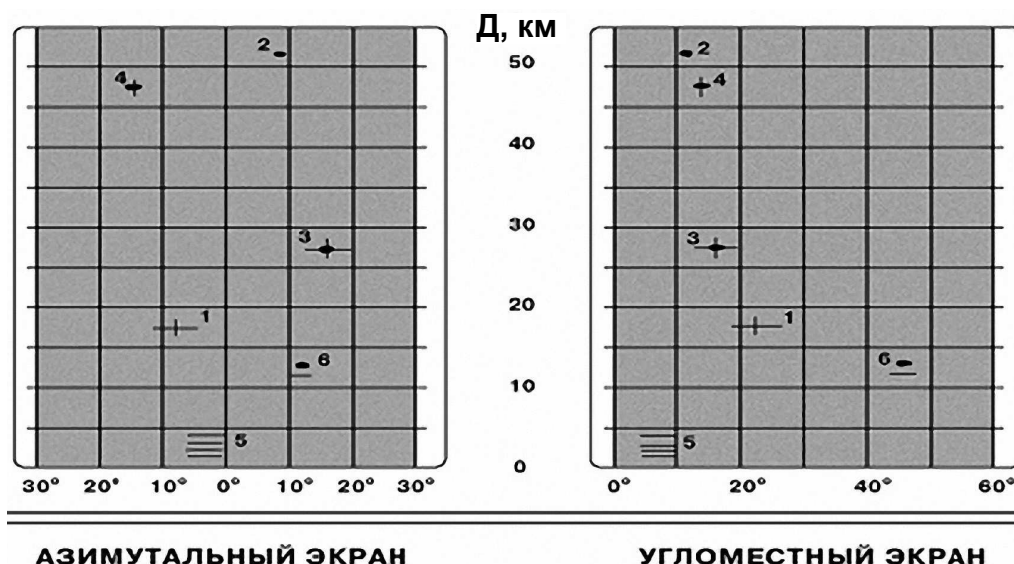
Система, конечно, будет реагировать полностью автоматически после захвата цели РЛС, но команду все равно должен давать человек-оператор. Так возникли новые дисциплины инженерная психология и эргономика, призванные помочь проектировщикам РЛС определить оптимальные требования к пульта управления системой, а сама система стала рассматриваться как сложная человеко-машинная (а не просто техническая) система.

В ходе эксплуатации системы возникали и социально-психологические проблемы, например в том случае, если роль командира комплекса становилась чисто наблюдательной и его вмешательство в процесс работы системы становилось нежелательным или часто невозможным. Это требовало внесения изменений в проект со стороны разработчиков для соответствующей организации рабочих мест операторов и командиров. «Автоматическое сопровождение не всегда надежно и качественно. Так, при автосопровождении целей, представляющих собой плотные (неразрешимые и по углам, и по дальности) группы самолетов, системы слежения “мечутся” между составляющими такие цели элементами. Возникающие при этом большие ошибки в определении координат целей и их “разрывный” характер препятствуют точному наведению ракет.

При наличии отражений от местных предметов возможны переходы следящих систем с целей на источники мешающих отражений. Для таких случаев была предусмотрена возможность сопровождать цели операторами (полуавтоматически). К каждой из четырех групп стрельбовых каналов было придано по одному рабочему месту ручного сопровождения. На их индикаторах район цели, также в координатах “дальность – азимут” и “дальность – угол места”, отображался в крупном масштабе. Точному сопровождению цели соответствовало положение ее сигналов в центрах обоих индикаторов.

На каждом рабочем месте работало по три оператора. Один сопровождал цель по дальности, два других – по угловым координатам. Операторы азимута и угла места использовали соответствующие индикаторы (рис. 3.14). Оператор дальности – любой из индикаторов по своему выбору. Наблюдая цели “в плане” (на индикаторе “дальность – азимут”) и сбоку (на индикаторе “дальность – угол места”), операторы могли сопровождать плотные группы самолетов с приемлемой точностью даже на фоне отдельных мешающих отражений. Узколучевые радиолокаторы, развертывавшие радиолокационную картину в одном измерении (зондировавшие пространство в одном направлении – на цель), таких возможностей не предоставляли. С рабочего места командира ЗРК осуществлялось управление стар-

товой позицией ЗУР и ЗРК в целом. Производилось включение ракет на подготовку к пускам и контролировался процесс подготовки. Размещение этого рабочего места на некотором возвышении в центре расположенных по кругу рабочих мест операторов стрельбовых групп позволяло командиру ЗРК постоянно наблюдать за всей работой ЦРН» [36].



**Рис. 3.14.** Экраны индикаторов рабочего места операторов выбора целей и пуска ракет: 1 — управляемая оператором метка захвата цели; 2 — отметка цели; 3 — цель, сопровождаемая каналом данной группы; 4 — цель, сопровождаемая каналом другой группы; 5 — ждущие стробы захвата ракеты; 6 — отметки ракеты и сопровождающих ее стробов

Однако задача создания такого рода сложной системы была не столько технической и даже не столько системотехнической, сколько социотехнической, поскольку создавалась не только новая техника, но и обеспечивающая ее функционирование инфраструктура в виде коммуникаций, электроснабжения, путепроводов, жилых и социальных объектов для обслуживающего персонала и т. п. «Объем строительных работ, которые надлежало выполнить для ввода в строй московской системы ПВО, был огромен. Необходимо было проложить на 50 и 90-километровых рубежах кольцевые дороги с путепроводами и мостами в местах их пересечений с транспортными магистралями и водными преградами (для подвоза к зенитным комплексам ракет с баз их хранения), создать мощные линии электропередачи и автономные дизельные источники электропитания, построить базы хранения и подготовки ракет к боевому использованию; командные пункты, на каждой из 56 позиций ЗРК — бетонированные помещения для аппаратуры ЦРН, стартовые позиции с 60 пусковыми столами и сетью подъездных дорог

к ним, а также жилые городки для офицерского состава и казармы для солдат» [36]. Была образована Первая армия особого назначения войск ПВО.

Кроме того, возникла необходимость срочной подготовки большого числа специалистов различных уровней и профилей не только для постоянного развития, но и повседневной эксплуатации и ремонтного обслуживания данной системы. Это требовало специального социального планирования и проектирования, например необходимого будущего персонала в масштабах всей страны, специализированных городских агломератов закрытого или полужакрытого типа, которые в будущем выросли в особые научные городки и города-сателлиты, в которых размещались промышленные предприятия, учебные заведения (вузы и техникумы), научно-исследовательские и проектные организации, войсковые подразделения и т.д., а также системы жизнеобеспечения и городского управления.

После принятия в эксплуатацию системы круговой радиолокационной обороны Москвы в 1955 г. была выдвинута новая задача создания и развития системы противоракетной обороны всей страны (рис. 3.15)<sup>1</sup>, решить которую стало возможным только благодаря тому, что уже были созданы научные, технические и производственные основы для этого на предыдущем этапе и работающие сплоченные коллективы инженеров и ученых, способных решать такого рода задачи<sup>2</sup>.

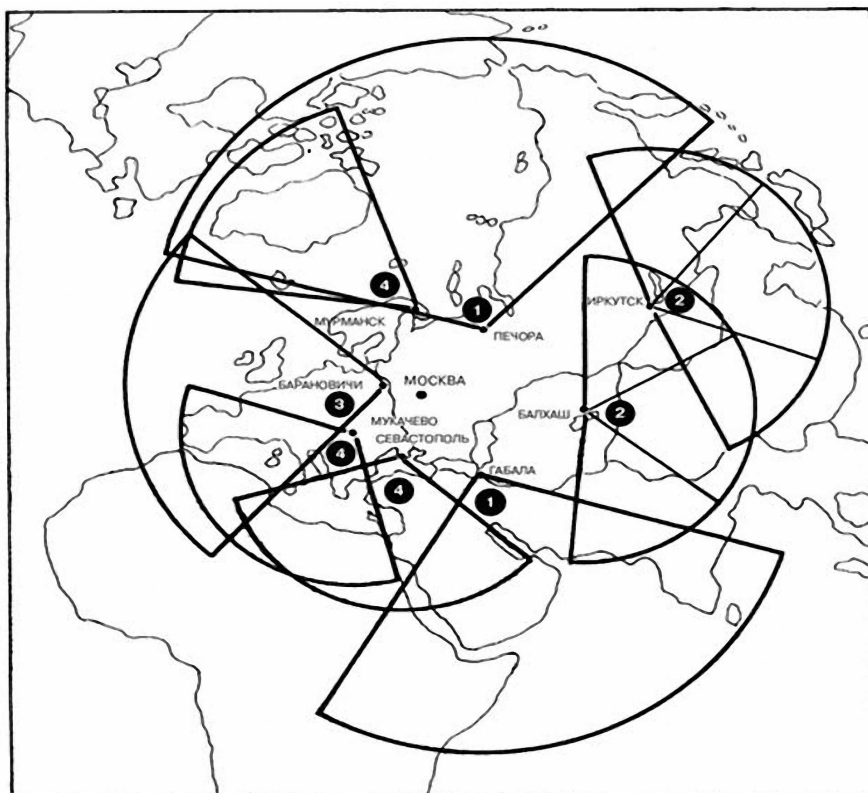
---

<sup>1</sup> «В январе 1954 года ВПК приняла решение о создании специальной комиссии по ПРО. Председателем комиссии был назначен председатель НТС ВПК академик А.Н. Шукин. В состав комиссии вошли директор РАЛАН А.Л. Минц, главный инженер КБ-1 Ф.В. Лукин... и главный конструктор системы С-25 А.А. Расплетин» (см.: *Первов М.А.* Системы ракетно-космической обороны России создавались так. Интернет-изд. М.: Изд. дом «АвиаРус-XXI», 2003 — <http://www.aviarus-21.com/books/rko/rus>).

<sup>2</sup> «Уникальная отечественная многоканальная ЗРС С-25 предназначалась для обеспечения надежной противовоздушной обороны Москвы и Московского промышленного района от массированных налетов авиации противника. В системе, не имеющей мировых аналогов, еще на этапе разработки были заложены возможности ее модернизации. Опыт создания С-25, которая состояла на вооружении более 30 лет (с 1956 по 1989 г.), позволил заложить уникальные научные заделы и создать передовые технические решения, сформировать устойчивые коллективы ученых и разработчиков, обеспечил предприятию высокий международный авторитет и системообразующую роль оборонно-промышленного комплекса страны» ([http://www.raspletin.ru/about/history/history\\_s25.php](http://www.raspletin.ru/about/history/history_s25.php)).

Было создано новое КБ, отделившееся от КБ-1, во главе с Г.В. Кисунько<sup>1</sup>.

К сожалению, этот организационный опыт был до сих пор мало известен даже российским специалистам в силу условий секретности, но сегодня, когда завеса секретности постепенно снимается, он должен стать достоянием широкой общественности как образец долговременной и ориентированной на перспективу государственной поддержки науки и техники.



**Рис. 3.15.** Система противоракетной обороны СССР<sup>2</sup>

<sup>1</sup> «3 февраля 1956 г. вышло Постановление ЦК КПСС и СМ СССР “О противоракетной обороне”. КБ-1 поручена разработка проекта экспериментальной системы ПРО, Министерству обороны – выбор места дислокации полигона ПРО. Главным конструктором системы был назначен Г.В. Кисунько, главным конструктором противоракеты – П.Д. Грушин, главным конструктором центральной вычислительной станции – С.А. Лебедев, главными конструкторами РЛС дальнего обнаружения – В.П. Сосульников и А.Л. Минц, главным конструктором системы передачи данных – Ф.П. Липсман... 30 декабря 1961 г. принято Постановление ЦК и Совмина о создании на базе СКБ-30 КБ-1 самостоятельной головной организации – Особого конструкторского бюро № 30 (ОКБ-30). Начальником ОКБ-30 назначен Г.В. Кисунько... 24 марта 1966 г. на базе ОКБ-30 создано ОКБ “Вымпел” по тематике ПРО» (см.: *Первов М.А.* Системы ракетно-космической обороны России создавались так. Интернет-изд. М.: Изд. дом «АвиаРус-XXI», 2003 – <http://www.aviarus-21.com/books/rko/rus>).

<sup>2</sup> См.: <http://radar.narod.ru/rdr-hs.html>



Справедливости ради следует сказать, что первая система противовоздушной обороны страны была спроектирована и создана в Великобритании еще в период Второй мировой войны. Проектирование и инсталляция цепи РЛС вдоль восточного и южного побережья Англии начались еще до начала войны в 1939 г. «Эта система, получившая имя Chain Home и Chain Home Low, очень помогла Королевским ВВС во время битвы за Британию»<sup>1</sup>. И хотя сами радиолокационные станции во многом уступали, например, немецким, была создана именно взаимосвязанная система таких станций с единым управлением и оперативным сбором данных. «Каждая РЛС была оснащена четырьмя передающими вышками из стали и четырьмя приемными вышками из дерева. Chain Home – система или сеть РЛС дальнего обнаружения – была гигантским предприятием». Но ее создание было нелегкой задачей, учитывая недостаток материалов, персонала и главное времени. «В начале 1939 года британский радиолокационный барьер все еще имел дыры». А уже оставалось очень мало времени до массированного налета авиации гитлеровской Германии на Англию, который стал реальной тяжелейшей проверкой для этой системы. Снова и снова немецкие бомбардировщики как океанские волны захлестывают побережье Англии. «Радиолокационные антенны регистрируют великое множество сигналов». В так называемой фильтровочной комнате (Filter Room) анализируются данные от 20 станций... Вахтенным офицером подается световой сигнал: «Враг нападает». Сразу же реагируют королевские ВВС, и их истребители атакуют немецкие бомбардировщики. Все это занимает считанные минуты. Побережья Англии достигают лишь немногие из них, и это является лучшим доказательством того, что система действительно надежно функционирует «как часы». Для немцев сначала из огромные потери в воздухе остаются необъяснимыми. «Говорят даже о колдовстве. То, что виделось как блицкриг, становится вторым Ватерлоо. В сентябре 1940 г. Гитлер признает, что битва за Англию в воздухе проиграна».

Итак, в радиолокационной системотехнике происходит изменение парадигмы научного и инженерного мышления. Радиолокация попадает в новое семейство научно-технических дисциплин, имеющих системную ориентацию. Переход от классической радиолокации к радиолокационной системотехнике – это прежде всего переход от разработки отдельных радиолокационных станций различного назначения к созданию многофункциональных систем. Несколько РЛС, замкнутые на один пункт сбора и обработки информации, составляют радиолокационный узел; несколько таких узлов, обме-

---

<sup>1</sup> См.: [http://electricscotland.com/history/men/watson\\_watt.htm](http://electricscotland.com/history/men/watson_watt.htm)

нивающих информацией, образуют радиолокационную систему. Последняя содержит разнесенные по территории группы РЛС, устройства переработки информации и средства передачи данных. Радиолокационная система позволяет решать задачи, которые не под силу отдельным радиолокационным средствам. При их проектировании также возникает целый ряд специфически системных проблем.

Кроме того, развитие радиолокационной науки и техники следует рассматривать как предпосылку современной компьютерной революции. Это связано в первую очередь с тем, что в радиолокационных системах, связанных с противоракетной обороной, уже не оставалось времени для принятия человеком решений и система должна была автоматически реагировать на постоянно изменяющуюся обстановку, а возможные сценарии развития событий должны быть смоделированы заранее и зафиксированы в памяти радиолокационных станций.

Первые цифровые электронные машины предназначались в первую очередь для военных целей и разрабатывались для создания эффективной системы предупреждения о ракетном нападении, а также для систем ПРО и ПВО. Один из создателей первых специализированных ЭВМ С.А. Лебедев (главный конструктор вычислительных средств системы противоракетной обороны), выступая на закрытом заседании ученого совета Института электротехники и теплоэнергетики АН УССР от 8 января 1951 г., заявил: «Единственным эффективным способом борьбы с дальними ракетами является посылка встречной ракеты. Для этого нужно определить возможную точку встречи. Применение счетно-решающей машины позволит быстро провести необходимые подсчеты траекторий полета ракет, что обеспечит точное попадание».

В 1952–1955 гг. под руководством Лебедева были созданы специализированные ЭВМ для автоматического съема данных с радиолокатора и автоматического слежения за воздушными целями, а в дальнейшем целая серия ЭВМ, предназначенных для систем ПРО, генеральным конструктором которой был тогда Г.В. Кисунько, увидевший перспективность в соединении радиолокационной техники с зарождающейся электронно-вычислительной техникой. Эффективность этого решения была практически подтверждена на испытаниях по уничтожению самолета противоракетой на полигоне «Капустин Яр».

Полигон был заложен в 1956 г. в районе озера Балхаш. «Всего через год на полигоне вошел в строй первый локатор, успешно фиксировавший все учебные пуски ракет в стране. А спустя еще два года

начались стрельбы противоракет при полном составе системы. Ее компонентами стали невиданные для тех лет радиолокаторы с мощнейшим энергетическим потенциалом, автоматизированная система управления на базе быстродействующей М-40, высокоскоростные и маневренные противоракеты со средствами точнейшего наведения, электроника с цифровым кодированием. Не все поначалу ладилось... Но в конце концов наступил день, который участники работ запомнили на всю жизнь. Цель уже в небе, ее ведут все локаторы, вскоре поступит команда на пуск противоракеты. Программист жмет кнопку запуска. Отметка цели на экране. Следом — пуск противоракеты. Спустя несколько минут табло высветило сигнал “Подрыв цели”. На следующий день данные кинофоторегистрации подтвердили: головная часть баллистической ракеты развалилась на куски!» [37].

Сначала это были, с современной точки зрения, достаточно простые системы и устройства, но сама постановка такого рода задач заставляла разработчиков искать новые научные и технические решения, особенно для экстремальных условий защиты от ракетного нападения, в которых каждое неверно принятое решение, каждая ошибка могли стать роковыми не только для оператора радиолокационной станции, но и для всей страны. «Кроме орбитальной группировки неотъемлемой частью системы являлся наземный комплекс. Он состоял из четырех постов приема информации и передачи команд... и командного пункта... Последний имел в своем составе: наземную станцию приема информации и передачи команд (центральный пост); вычислительный комплекс обработки информации, реализованный на базе ЭВМ М-10; вычислительный комплекс управления из пяти ЭВМ МСМ-У; комплекс обработки телеметрии; визуальный канал; комплекс средств управления связи и системы передачи данных; комплекс документирования и отображения информации (табло результатов обработки информации, табло состояния системы). Обработанная информация поступала на внешние абоненты... “Мозги” системы составляли программно-алгоритмическое обеспечение (ПАО) управления и ПАО обработки информации... В соответствии с техническим заданием процесс обработки специнформации и выработки типовых сообщений должен был быть автоматическим и в него при эксплуатации системы никто не должен был вмешиваться»<sup>1</sup>.

Чарльз Сноу в своей книге «Наука и правительство» специально подчеркивает: «В особенности в сфере военных технологий уровень развития США и СССР был в значительной степени одинаковым

---

<sup>1</sup> Система предупреждения о ракетном нападении — [www.vko.ru](http://www.vko.ru); [http://old.vko.ru/print.asp?pr\\_sign=archive.2005.25.13\\_13](http://old.vko.ru/print.asp?pr_sign=archive.2005.25.13_13)

и инвестиции в науку и денежные расходы были также одинаковыми... Таким образом, я уверен, что мы находимся в одной лодке и что все страны могут многому научиться из накопленного у других стран опыта» [38, р.55]. К этому хотелось бы добавить, что россиянам следует уметь также учиться и у самих себя.

### **3.4. Разработка автоматизированных систем управления в Советском Союзе в 60-е — 70-е гг. XX в. как системотехническое проектирование**

#### **3.4.1. Общие сведения**

В середине XX в. возникает тесная связь между различными видами инженерной и научной деятельности при решении сложных научно-технических задач. Поэтому становится необходимой кооперация различных специалистов, объединение их в единый коллектив, решающий такую определенную задачу. Для управления такими коллективами нужны были новые методы инженерного руководства и особые специалисты, осуществляющие это руководство. «Системотехника — это множество мыслительных моделей, методов работы и организационных форм, которые относятся к проектированию, созданию и эксплуатации сложных технических систем в экономической и социотехнической взаимосвязи», — пишет Г. Рополь в предисловии к книге «Системотехника в проектировании фабрик», подчеркивая, что проектирование предприятий является одним из самых показательных примеров системотехнической деятельности [39, с. 3]. В Советском Союзе в 60-е—70-е гг. XX в. одним из видов системотехнической деятельности, хотя и обладающим своей собственной спецификой, становится разработка автоматизированных систем управления промышленностью. В данной главе анализируется тот специфический опыт, который был накоплен в этой области системотехнического проектирования.

Параллельно с развитием системотехнического проектирования происходило развитие *системного анализа* как средства решения слабоструктурированных проблем, с одной стороны, в сфере политических решений, а с другой — в сфере экономики предприятия и системного менеджмента. В этом последнем пункте системный анализ сближается с системотехникой в рамках задачи проектирования и организации предприятий как сложных систем.

В системном анализе можно выделить два уровня или направления исследований, первое из которых относится к внутрифирменному планированию, моделированию, проектированию и организа-

ции деятельности предприятия, второе — к планированию развития целых отраслей промышленности, науки и техники или даже национальной экономики, народного хозяйства страны или сообщества стран в целом и даже глобального прогнозирования и моделирования мировой динамики.

Первое направление системного анализа тесным образом смыкается с развитием системотехники (поскольку проектирование, разработка, создание, организация производства, функционирования и даже исследования больших технических систем представляют сегодня комплексную хозяйственную структуру — то, что и выражает понятие «предприятие»), второе — с оценкой развития техники и технологии, научно-технической политикой. Оба эти направления тесно связаны с той философией управления, которая была развита в рамках разработки и внедрения автоматизированных систем управления.

В этой главе мы рассмотрим основные черты философии управления, развитые в 60-е—70-е гг. XX в. в связи с распространением идей кибернетики не как области науки, например технической кибернетики, а как широкого философского движения, пытавшегося обобщить и распространить идеи управления, развитые в рамках абстрактной теории кибернетических машин, на всю совокупность природных и социальных процессов<sup>1</sup>. Причем основной акцент нами сделан на ретроспективном анализе некоторых практических проблем управления социально-экономическими и социально-

---

<sup>1</sup> «Весьма широкое истолкование этой науки было характерно для А.И. Берга и ученых, группировавшихся вокруг него. В этом научном сообществе кибернетика понималась скорее не как наука, а как особая всеобъемлющая научная парадигма», которая «возникла как чрезвычайно широкое научное и техническое направление». «...сторонники столь широкого взгляда на кибернетику рассматривают ее как новый философско-методологический подход к различным теоретическим и прикладным наукам. В более поздних работах тех, кто разделял подобное истолкование кибернетики, эта мысль выражена еще более отчетливо... На другом полюсе находились те, кто связывал кибернетику с появлением и внедрением вычислительных машин, с теми изменениями в математике и смежных с нею областях, которые были порождены процессами решения задач на вычислительных машинах. Такая точка зрения на кибернетику характерна, например, для редколлегии и авторов статей сборника “Проблемы кибернетики”. Если для сторонников широкого взгляда на кибернетику ее ключевыми словами были “управление”, “обратная связь”, “энтропия”, то для тех, кто интерпретировал кибернетику более узко, такими ключевыми словами выступали “алгоритм”, “программа”, “управляющая система”» (см.: *Поспелов Д.А.* Становление информатики в России. — <http://newasp.omskreg.ru/intellect/f30.htm>).

техническими системами, возникшими в эти годы в различных странах, но в первую очередь в Советском Союзе. Именно в СССР кибернетика принимает форму широкого научного движения и философской рефлексии как одну из форм реакции на идеологическое давление на науку, характерное для 1950-х гг., когда кибернетика считалась лженаукой и некоторые ученые даже лишались за принадлежность к ней ученых степеней и званий, как, например, известный чешский философ науки и техники Ладислав Тондл.

«В четвертом издании “Краткого философского словаря” (1954 г.) в статье “Кибернетика” эта наука была определена как “реакционная лженаука, возникшая в США после Второй мировой войны и получившая широкое распространение и в других капиталистических странах, форма современного механицизма”... Набор ярлыков для кибернетики (пустоцвет, лженаука, идеологическое оружие империалистической реакции, порождение лакеев империализма и т. д.) свидетельствовал, что никакой патриотически настроенный ученый в СССР не может заниматься столь одиозной наукой... Но, как уже говорилось, практические задачи (и прежде всего задачи укрепления обороноспособности страны) требовали не прекращения работ в области кибернетики, а расширения и активизации этих исследований. Это понимали даже партийные чиновники из оборонного отдела ЦК ВКП(б) и отдела науки того же всемогущего ведомства... кибернетика получила массовую поддержку научно-технической интеллигенции... с 1955 года до создания в 1959 году в АН СССР Научного совета по комплексной проблеме “Кибернетика”... в СССР возникла инфраструктура, поддерживающая новое научное направление»<sup>1</sup>.

Ситуация поэтому существенно изменилась в 1960-е гг., когда на кибернетику стали возлагать серьезные надежды не только в плане развития противоракетной обороны страны, но и как на панацею, могущую позволить рационализировать и оптимизировать функционирование социалистической плановой экономики и придать ей импульс не только для устойчивого развития, но стать главным козырем для победы в соревновании двух альтернативных хозяйственных систем<sup>2</sup>.

То, что из этого получилось, вина не кибернетики или науки вообще, не разработчиков автоматизированных систем в промышленности, а политического руководства и самой в значительной степени иррациональной политической и находившейся от нее в прямой

---

<sup>1</sup> Там же.

<sup>2</sup> В 1959 г. Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР об ускорении и расширении производства вычислительных машин и внедрении их в науку и народное хозяйство.

зависимости экономической системы управления, не поддающейся рационализации никакими научными методами. Однако опыт, накопленный в ходе попыток ее реорганизации, имеет, по нашему мнению, не только историческое значение, поскольку в сегодняшней системе социальной рыночной экономики, особенно в эпоху кризиса, снова ставится вопрос о необходимости усиления планового начала в системе социально-экономического управления.

Аналогичная ситуация уже была в 1932 г. в США, во времена мирового экономического кризиса, когда американские технократы снова подхватили угасшие во время экономического подъема технократические идеи, обвиняя в экономическом кризисе предпринимателей и свободное рыночное хозяйство. Технократы противопоставляли анархии рыночного хозяйства плановую организационную модель, покоящуюся на законах термодинамики [40, s. 204–209]. Примерно такую же аргументацию выдвигали технократы в СССР, воспитанные на успехах атомного, ракетного и радиолокационного суперпроектов в условиях тоталитарной системы управления народных хозяйством.

Впрочем, идеологически противопоставляя себя официально свободной рыночной экономике «враждебного капиталистического мира», в душе они искренне верили в возможность поставить с помощью кибернетики плановую социалистическую экономику в условия «саморегулирования», понимаемого, правда, первоначально узкотехнически на основе представлений теории автоматического регулирования. Тем самым они стремились «спасти» социалистический мир от надвигающегося кризиса управления, что в брежневские времена выразилось в отчаянном восклицании соцбюрократов: «теряем нить управления».

И действительно, с экстенсивным развитием социалистической экономики в первые послевоенные десятилетия методы централизованного управления ею больше не позволяли справляться с все усложнявшимися качественно проблемами управленческой деятельности. Если во время войны и сразу после нее решения о распределении средств принимались жестко централизованно, что во многом было оправдано их дефицитом, то в 1960-е–1970-е гг. это становится невозможным.

Огромным, трудно обозримым из центра монстром становится военно-промышленный комплекс. Достаточно сказать, что из одного Министерства вооружения (позже — оборонной промышленности) постепенно образовались девять оборонных министерств (МОМ — Министерство общего машиностроения, МАП — Министерство авиационной промышленности, МСМ — Министерство среднего ма-

шиностроения, МРП — Министерство радиопромышленности, из которого позднее выделилось Министерство промышленности средств связи<sup>1</sup>, и др.). Для управления этим монстром была создана специальная Военно-промышленная комиссия (ВПК) при Совете Министров СССР, а чтобы управлять нижними уровнями предприятий были введены промежуточные управляющие звенья в виде объединений. Часть полномочий делегировалась на нижележащие уровни управления, которые могли принимать самостоятельные решения в пределах их компетенции и выделенных бюджетных средств. Например, начальник Главного планово-экономического управления министерства имел право самостоятельно открыть небольшой институт, а директор института — тему и отдел для решения важных внутренних проблем.

Одной из таких первоочередных проблем и была признана проблема создания автоматизированных систем управления с целью совершенствования управления — прежде всего промышленностью (в первую очередь, конечно, предприятиями и организациями военно-промышленного комплекса). Научное сопровождение решения этой проблемы было возложено на Институт кибернетики УССР под руководством академика В.М. Глушкова. Необходимо было, однако, сократить путь от фундаментальных разработок и общих деклараций до получения, притом скорейшего, прикладных результатов и конкретных разработок.

В Советском Союзе это выразилось в организации в 70-е гг. XX в. научно-технических (НТО) и научно-промышленных (НПО) объединений, призванных сократить путь от исследований до разработок и обеспечить более тесный контакт ученых и инженеров в рамках одного объединения, т.е. единой системы управления.

Если в НПО ведущую роль играли вопросы организации наукоемкого производства, головную роль выполняло промышленное предприятие, а научно-исследовательский институт — подчиненную, то в НТО, наоборот, роль головной организации выполнял научно-исследовательский институт, а предприятия (как правило, с опытным характером производства) и конструкторские бюро должны были помогать им опробировать на практике новые научные результаты. В этом случае именно НИИ определял научно-техническую политику всего объединения.

---

<sup>1</sup> Такого рода «размножение» министерств и других органов управления часто диктовалось конъюнктурными соображениями или личными интересами высших руководителей. Скажем, при выделении Министерства промышленности средств связи в самостоятельную управляющую структуру часто приходилось искусственно делить заводы, конструкторские бюро и научно-исследовательские институты, чтобы обеспечить этот управляющий орган объектом управления.



Во всех оборонных министерствах, а затем и иных, появляются головные НИИ и КБ, отвечающие за разработку АСУ в данной отрасли в целом и на отдельных ее предприятиях. Кроме того, в крупных отраслевых НИИ были организованы научно-исследовательские отделы под руководством ведущих ученых из Академии наук СССР или крупных высших учебных заведений (например, кафедра кибернетики МИФИ имела такой отдел в головном институте Министерства промышленности средств связи), а в Академии наук — отраслевые лаборатории, финансируемые определенной отраслью промышленности. На кафедрах вузов открывались новые темы за счет тех же средств, создавались научные советы и защищались многочисленные диссертации. Это создавало условия для более эффективной стыковки научных исследований и инженерных разработок, при этом львиную долю бюджета Академии наук СССР и многих особенно технических вузов составляли вливания из военно-промышленного комплекса.

Далее будет показано, каким образом претерпела весьма значительные изменения и корректировки исходная кибернетическая модель управления в ходе попыток ее практического применения. Для методологического анализа выделим сферу управления промышленными предприятиями и отраслями промышленности, связанными с задачами автоматизации сначала технологических процессов на предприятиях, а затем и всей системы управления, причем не только предприятиями, но и целыми отраслями промышленности — создание АСУ, что выразилось первоначально в метафорах «кибернетическая фабрика» и «кибернетический министр».

Исходный оптимизм такого подхода был основан на тех успехах, которые к этому времени были достигнуты при создании систем автоматического управления в рамках проекта противовоздушной обороны страны. Однако сначала рассмотрим эволюцию самого понятия управления в теории автоматического регулирования и кибернетике.

### **3.4.2. Эволюция понятия «управление» от теории автоматического регулирования до кибернетики**

Норберт Винер, развивая кибернетический подход к управлению, имел в виду общность процессов регулирования и информационного обмена у животных и у машин. Винер пытается показать, что механизм природы обратной связи является основой телеологичности или целенаправленного поведения как в созданной человеком машине, так и в живом организме, и в социальной системе.

Одновременно понятие «управления» развивалось в теории автоматического регулирования, где управление первоначально рассматривалось в узкотехническом смысле как регулирование. Сначала все созданные в технике регуляторы, начиная с широко известного регулятора работы паровой машины, получившего название регулятора Уатта, исследовались и рассчитывались по-разному. Однако постепенно сформировались общие методы расчета, анализа и синтеза самых разнообразных следящих систем или, иначе говоря, сервомеханизмов<sup>1</sup>.

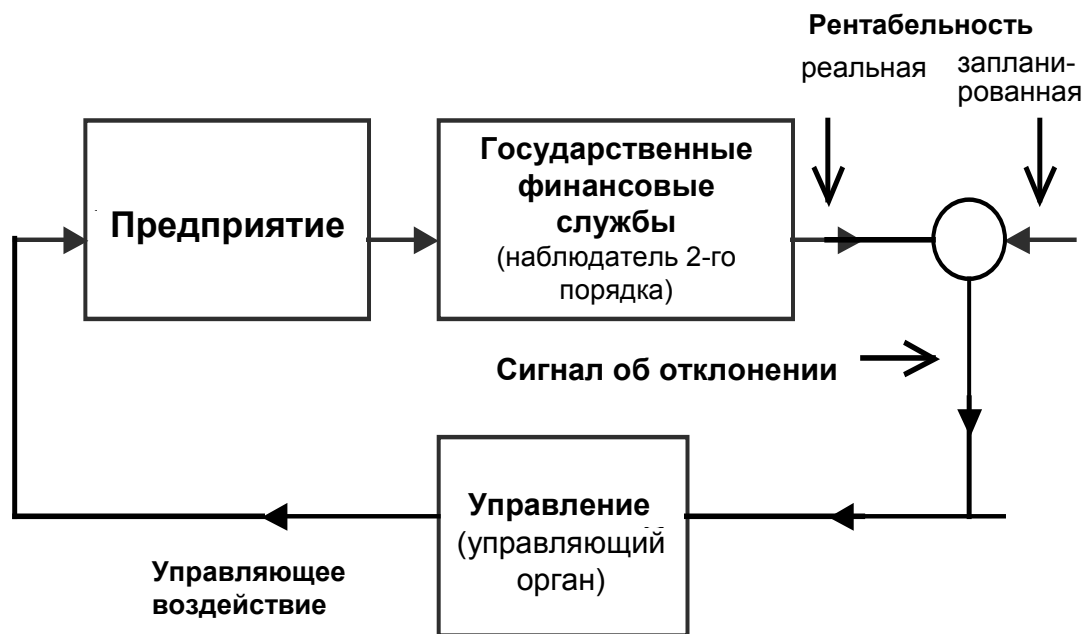
С точки зрения математических свойств таких систем неважно, является ли система электрической, механической или химической. Главными являются математические соотношения между переменными, описывающими поведение такой системы. Это привело к выделению особого звена — регулятора — механических, гидравлических, электрических и других устройств, к которым наиболее хорошо применимы данные методы как к объекту исследования теории автоматического регулирования. Именно такое представление об автоматическом регулировании легло в основу понятия обратной связи, обобщенного в кибернетике не только для разного рода технических систем, но и биологических и даже социальных систем.

Расширение этого представления на социально-экономические процессы и системы привело к обобщению понятия автоматического регулирования на представление о системах автоматического управления, а затем об *автоматизированных системах управления*, где управляющую функцию выполняет определенного рода человеческая деятельность, а именно — управленческая (рис. 3.16).

Понятие «управление» в русском языке рассматривается в двух основных смыслах: как аналог автоматического регулирования (регулирование технических систем) и как административное руководство (управление людьми). В английском языке им соответствуют понятия «контроль» и «менеджмент», которые часто переводятся на русский язык одним и тем же словом.

---

<sup>1</sup> Автоматического механического или электромеханического (также электрического, пневматического или же гидравлического) устройства, контролирующего функционирование машинного оборудования, т.е. предназначенного для контроля положения или скорости выходного потока за счет минимизации разницы между состоянием и значениями контрольного параметра на выходе и входе. В электрических цепях, например, регулируется величина тока или напряжения, амплитуда или частота колебаний и т.д. При наличии возмущающего воздействия, т.е. отклонения регулируемой величины от некоторого наперед заданного эталона, регулятор автоматически возвращает процесс в исходное состояние, откорректировав его на выявленную величину рассогласования эталонной величины и регулируемой переменной.



**Рис. 3.16.** Система управления с обратной связью

На схеме административного управления показываются практически те же самые блоки, что и в системе автоматического регулирования: финансовые службы выполняют ту же самую роль, что и измерительное устройство. Кроме того, они проводят сравнение реальных финансовых достижений с планируемыми; роль управленческой деятельности (административного управления) подобна действию регулятора и заключается в принятии решения о том, какие действия должны быть предприняты, чтобы привести положение вещей в правильное состояние, и о коррекции этих действий, если реальная прибыль по прогнозу имеет тенденцию сильно отличаться от желаемой. Наконец, если скорректированный курс действий определен, нужно обеспечить передачу управляющего воздействия всем, имеющим отношение к тому, чтобы они смогли осуществить необходимые изменения в производственной деятельности (производстве).

В дальнейшем эта упрощенная исходная эвристическая схема была скорректирована и усложнена. Было признано, что прямой перенос представлений и методов теории автоматического регулирования из области технических систем в сферу человеко-машинных и социотехнических систем является неправомерным. Для того чтобы отличить эти последние от чисто технических систем, их стали называть не автоматическими, а *автоматизированными* системами управления (но не регулирования). Это было сделано для того, чтобы подчеркнуть, во-первых, их человеко-машинный характер и невозможность (а часто и ненужность) полной автоматизации,

т. е. замены «человеческих компонентов» машинными блоками. Во-вторых, в них идет речь об автоматизации человеческой, а именно управленческой деятельности, административного управления, а не о регулировании технических процессов.

Следует, однако, подчеркнуть, что такого рода аналогия имела и положительное значение, если она не понималась буквально. Возникло целое новое направление научно-инженерной деятельности, ставшее одним из основных направлений системотехники, в рамках которой происходил процесс постепенного переосмысления и обобщения этого основного кибернетического понятия, вычленения его системного содержания.

Понятие «управление» в кибернетике в его первоначальном смысле характеризовалось следующими тремя основными признаками: 1) действие системы производится автоматически; 2) в соответствии с определенной целью; 3) имеется обратная связь.

В данном случае использовалось «машинное» представление управления как регулирования, т. е. как автоматического действия без участия сознания. Поэтому цель понималась не как идеальный образ сознания, а как некоторое конечное состояние. Цель находится как бы вне системы. Например, для системы противовоздушной обороны в качестве таких целей выступают самолеты и ракеты противника. В то же время цель находится внутри системы, если систему трактовать более широко, включая в нее и системное окружение, и то конечное состояние, которого система достигнет, выполнив ряд автоматических действий. Программа таких действий включает в себя и сам результат (цель), и алгоритм поведения системы, т. е. средства достижения этого результата.

Наконец, большое значение для характеристики управления имеет понятие «обратная связь», в которое первоначально в кибернетике вкладывалось следующее содержание. Сигнал на выходе некоторого устройства, являющегося объектом управления, постоянно сравнивается со специфическим эталоном (целью), который запрограммирован в управляющем органе (регуляторе). Информация о рассогласовании выходного сигнала с целью в виде особого сигнала поступает на вход объекта управления и используется для ограничения выходов<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Мы определили таким образом только отрицательную обратную связь, так как именно она направляет действия для достижения цели, т. е. раскрывает механизм управления. Сигнал же положительной обратной связи «прибавляется» (часть выходного сигнала, поступающего на вход, имеет тот же знак, что и выходной сигнал) к входным сигналам, но не корректирует их.

Кибернетическое представление управления претерпело, однако, следующую эволюцию.

*Во-первых*, само управление рассматривается в ней уже не просто как автоматическое действие, а как *управленческая деятельность*, которая лишь частично может быть автоматизирована. Необходимо различать преобразование объекта управления, которое является результатом управленческой деятельности (искусственное), и естественное превращение объекта, независимое от этой деятельности. Понятие «управление» предполагает, что, с одной стороны, объект управления развивается по естественным законам, а с другой — испытывает (искусственное) воздействие управленческой деятельности. Объект управления должен рассматриваться сначала как естественная система и задавать прогноз ее развития. Затем он рассматривается как искусственная система и строится его проект (модель). Объект управления должен быть описан с точки зрения и проекта, и возможностей отклонения от естественной линии развития. Далее выбирается наиболее оптимальная траектория достижения цели, заданной в проекте. Наконец, планируется система управляющих воздействий для получения нужной траектории, т. е. для реализации проекта.

*Во-вторых*, эта деятельность понимается теперь как осознанная, а цель ее — не как конечное состояние данного преобразования, а как его представление, образ, который формируется до того, как цель реализована. Управление представляет собой целенаправленный процесс, результатом которого является переход объекта из одного состояния в другое. Однако цель — не просто конечное состояние, на достижение которого направлено действие объекта. Это идеальный образ этого конечного состояния, представление о результате деятельности еще до того, как результат достигнут.

Ситуация управления имеет одну важную особенность: управление — это воздействие одной деятельности на другую, т. е. объектом управленческой деятельности является другая деятельность, подлежащая управлению (например, производственная, хозяйственная, конструкторская, научная и т. д.). Управление заключается в корректировке деятельности, подлежащей управлению, в соответствии с целью и осознанием (руководителем) всей деятельности и образа действия управляемого индивида. Большое значение приобретает не только осознание, но и корректировка собственных действий управляющим индивидом (или соответствующим социальным институтом).

*В-третьих*, понятие «обратная связь», возникшее в контексте представления управления как автоматического регулирования, в системотехнике и в самой кибернетике формулируется более широко — как механизм учета разницы между целью действия и ее результатом.

Обратная связь — это не просто обратное физическое воздействие, рассогласование выходного сигнала с эталоном, которое регулирует входы. Сущность ее заключается в том, что от объекта управления к управляющим органам по особым каналам связи передается информация о фактическом положении дел, прежде всего об отклонениях от намеченных планов. Эта информация используется управляющими органами для выработки управляющих воздействий. Иначе говоря, обратная связь состоит в том, что деятельность данной системы регулируется результатами деятельности этой же системы. Результат деятельности не может полностью совпадать с поставленной заранее идеальной целью. Несовпадение цели и результата деятельности и лежит в основе регуляционного механизма обратной связи.

В сущности представление об обратной связи в кибернетике появилось из теории четырехполюсников, получившей достаточно абстрактное развитие в теории радиотехнических схем и цепей. Именно в теории связи, отпочковавшейся от теории анализа телеграфных (а позднее радиотелеграфных, телефонных и радиотелефонных) сетей и сообщений, были впервые сформулированы понятия сигнала и общей схемы передачи сообщений, положенные в основу теории информации. Сигнал в теории связи рассматривается в качестве носителя информации различной физической природы, один или несколько параметров которого закодированы определенным образом. Закодированная в сигнале информация от источника информации передается передатчиком по проводным или беспроводным каналам связи, принимается и декодируется приемником, для того чтобы быть переданной пользователю.

Основными блоками, преобразующими в этой схеме сигнал, являются четырехполюсники (т. е. блоки, имеющие два входа и два выхода). Применение для реализации автоматического регулирования аналоговой вычислительной техники привело к расширению арсенала четырехполюсников на интеграторы, множительные устройства, делители, компараторы (сравнивающие устройства) и т. д., реализующие в электрических цепях математические операции над параметрами электрического тока.

Таким образом, вычислительная техника сначала строилась с помощью аналоговых схем, служащих целям управления процессом слежения радиолокационных станций за целью, а проще говоря — управления движением радиолокационной антенны<sup>1</sup>. Теория четы-

---

<sup>1</sup> В следящей системе антенны радиолокационной станции рассогласованием служит угловая ошибка между радиолокационным лучом и направлением на цель; исполнительное устройство — электропривод антенны (см.: *Попов Е.П.* Следящая система. — <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/103/202.htm>).

рехполюсников давала возможность пользоваться единым методом для анализа самых различных по принципу действия и структуры устройств, поскольку четырехполюсник получается при таком рассмотрении электрической цепи, когда отвлекаются от ее внутренней структуры. Последнее возможно на основе ее представления как обобщенного идеализированного объекта изучения – «черного ящика», т. е. поточной системы, изучаемой извне, не интересуясь ее внутренней структурой.

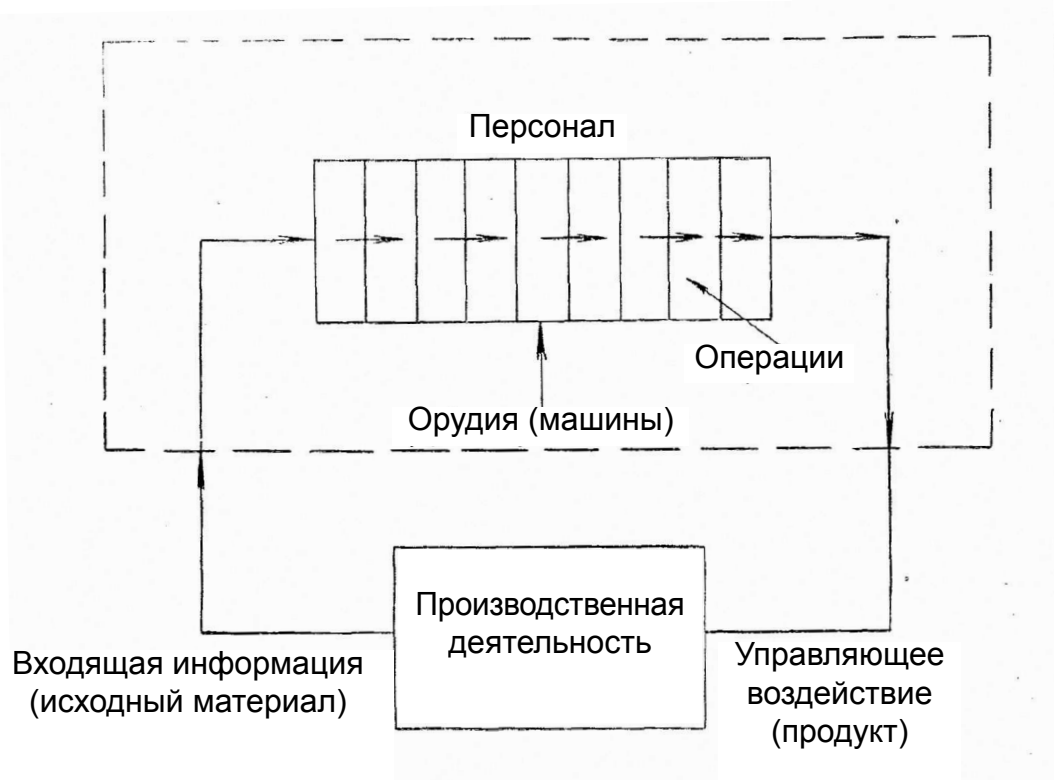
Далее будет рассмотрено, какие изменения произошли с этими исходными понятиями в ходе разработки и внедрения АСУ предприятиями и отраслями промышленности.

### **3.4.3. Автоматизированные системы управления предприятием и отраслью промышленности**

Философия управления предприятиями и отраслями промышленности как в нашей стране, так и за рубежом сформировалась в рамках военно-промышленного комплекса с целью оптимизации его весьма дорогостоящей для государства и сложной многоуровневой деятельности. В целом можно сказать, что здесь первоначально господствовало кибернетическое представление об управлении как реакции управляющего воздействия на отклонения регулируемой величины от запланированного результата. Это было связано с тем, что в данную отрасль пришли в основном инженеры, воспитанные на представлениях теории автоматического регулирования, показавшей свою успешную применимость в сфере проектирования АСУ, например зенитно-артиллерийским огнем в системе противовоздушной, а позднее и противоракетной обороны.

Предприятия, а в еще большей степени отрасли промышленности и их системы управления представляют собой сложные социально-экономические системы, для описания которых концептуальных структур теории автоматического регулирования и даже кибернетики оказалось недостаточно. Их невозможно и часто просто нецелесообразно полностью автоматизировать. Здесь необходимо проектирование, а точнее, реорганизация производственной и управленческой деятельности, в частности с использованием машинных компонентов.

Схема управления производственной деятельностью представлена на рис. 3.17.



**Рис. 3.17.** Представление контура управления производственной деятельностью

Поскольку производственно-хозяйственная деятельность и процесс производства на промышленном предприятии могут быть расчленены на однородные функции и описаны универсальной схемой превращения материалов, заготовок и комплектующих изделий в товарную продукцию, процесс управления созданием и реализацией продукции промышленности может быть в целом типизирован.

Процесс решения любой задачи управления возможно представить в виде некоторой последовательности процедур (или операций), выполняемых управленческим персоналом, в частности с помощью вычислительных машин (используемых в качестве орудий управленческой деятельности). Поэтому с самого начала при создании АСУ ставилась задача выделения типовых элементов и алгоритмов управления объектами однородной структуры. Такого рода упрощенное представление об управленческой деятельности еще более или менее работало на уровне автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) на предприятии или даже предприятия в целом (АСУП).

Разработка систем организационного управления предприятиями в Советском Союзе была начата под руководством академика В.М. Глушкова в 1963–1964 гг. В 1967 г. была сдана в эксплуатацию



и рекомендована к тиражированию первая в стране АСУП «Львов» (Львовский телевизионный завод «Электрон») для предприятий с массовым характером производства<sup>1</sup>.

АСУП «Львов» была предназначена для автоматизированного управления предприятиями и объединениями с массовым и крупносерийным характером основного производства. «По своим структурным особенностям система ориентирована в первую очередь на управление объектами, которые отличаются высокой динамичностью протекающих в них процессов. Она создавалась с целью повышения эффективности организационной, производственной и экономической деятельности аппарата управления предприятием, достигаемой за счет точности, своевременности, полноты, релевантности, активности восприятия, используемой для принятия решений информации, применения современных математических методов планирования, анализа, прогнозирования, оптимизации», т.е. с целью качественного улучшения информационного обеспечения руководства и повышения эффективности управления. При этом утверждалось, что техническое и математическое обеспечение данной системы является универсальным и может быть использовано как основа для создания аналогичных систем на других предприятиях, т.е. ее проект преподносился как типовой для данного класса предприятий, требующий разработки лишь «проекта привязки» к особенностям конкретного предприятия. По мнению разработчиков, такая автоматизированная система управления работой предприятия позволяет на основе данных оперативного учета в рамках единого графика согласовывать во времени и по количественным показателям работу всех звеньев производственного механизма с учетом имеющихся ресурсов, т.е. оптимизировать производственную деятельность предприятия, на котором она будет внедрена, за счет автоматизации ряда вычислительных работ в сфере деятельности управленческого персонала. При этом утверждалось, что по принципам своей организации система находится на уровне лучших зарубежных образцов и значительно ниже их по стоимости<sup>2</sup>.

После внедрения этой системы В.М. Глушков поставил задачу создания не индивидуальной, а типовой АСУП для машино- и приборостроительных предприятий. В начале 1970-х гг. завершились работы по разработке системы «Кунцево»<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Общегосударственная автоматизированная система управления (ОГАС) экономикой СССР (<http://computer-museum.ru/galglory/27.htm>).

<sup>2</sup> См.: Система управления «Львов». М.: Лицензинторг, б.г.

<sup>3</sup> Общегосударственная автоматизированная система управления (ОГАС) экономикой СССР (<http://computer-museum.ru/galglory/27.htm>).

Московский радиотехнический завод (МРТЗ) «был построен на базе старого Кунцевского механического завода, специализировавшегося на производстве боеприпасов. Это был крупный завод с численностью работающих до 20 тыс. человек. Постановление Военно-промышленной комиссии (ВПК) Совета Министров СССР о создании системы “Кунцево” было подписано 10 августа 1966 г. В 1969 г. был разработан технический проект системы “Кунцево” на базе ЭВМ “Минск-32”. Самые большие неприятности доставляло текущее внесение изменений в проект. Поскольку ежедневно менялись внешние и внутризаводские обстоятельства, вычислительная техника и методы программирования, у разработчиков появлялись новые идеи, выявлялись ошибки при эксплуатации. Необходимо было постоянно вносить изменения в проект. Проект был разослан во все головные институты знаменитой оборонной “девятки”, а также заводам этой “девятки”, которые были определены министерствами как базовые для внедрения АСУ. За пределами “девятки” проект рассылался по указанию руководства. Замысел включал несколько идей: завод должен работать не “на склад”, а по расписанию, процессы подготовки производства и производства должны быть синхронизированы, а противоречие между заготовительными цехами и сборочным цехом должно быть разрешено.

В техническом проекте воплотились различные подходы к созданию АСУ. Основным был подход, направленный на создание ограниченных, но работающих и полезных задач. Были намечены функциональные и обеспечивающие подсистемы на единой информационной базе, что называлось “комплексом задач”. “Интегрированная” система управления была официально предложена только спустя 7 лет.

Глушков видел задачу создания системы “Кунцево” в передаче на ЭВМ тех расчетов, которые производились в подразделениях заводууправления. Он не понимал, что “компьютеризация” не только влечет за собой “информатизацию”, но и оказывает глубокое воздействие на организационные формы завода, определение и распределение функций по подразделениям. Поэтому проектирование систем организационного управления было для него чуждой идеей. Проецируя потенциальные возможности ЭВМ на задачу компьютеризации управления, Глушков стремился создать централизованные системы обработки данных, но развитие пошло по пути разделения этой задачи по уровням цеха и завода.

Постепенно стало выясняться, что проект АСУ “Кунцево” непосредственно не может быть применен ни на одном заводе, всюду нужна была “привязка” проекта. В каждой из девяти оборонных отраслей был создан головной институт, а в радиопромышлен-

ности, кроме того, 10 специализированных СКБ, которые привязывали проект системы “Кунцево” к конкретным заводам. После образования в 1974 г. Министерства промышленности средств связи государство уже не поддерживало создание системы “Кунцево”. Кооперация НИИ по разработке системы “Кунцево” стала рассыпаться и к 1974 г. практически перестала работать. Но взаимодействие заводов сохранилось. Многие заводы по внедрению АСУ оказались впереди МРТЗ.

Разработка и последующее внедрение на заводе проекта АСУ “Кунцево” отчетливо выявило противоречие между формальным (инструментальным) аспектом организации и организацией как живым, творческим целым. Проблема, которой занимался Ю.М. Репьев как главный конструктор системы управления заводом (а не как “информационщик”), все еще остается нерешенной»<sup>1</sup>.

Однако работы по созданию и внедрению АСУ в практику были связаны с трудностями управления плановой социалистической экономикой. Предприятия стремились любой ценой (часто за счет качества) выпускать продукцию, особенно в сфере создания товаров широкого потребления, которые рассматривались тогда как вторичные, побочные по отношению к изготовлению вооружения. Их мало интересовали пожелания потребителей этих товаров. Им нужно было лишь выполнить план, который, как правило, вообще не выполнялся и поэтому к концу отчетного периода постоянно корректировался. В этих условиях автоматизация неэффективной и к тому же почти мифической деятельности планирования и управления социалистическим предприятием становилась бесполезной и даже для мощных ЭВМ неразрешимой задачей. Вместо автоматизации существующего беспорядка следовало произвести реорганизацию социально-экономической системы предприятия, а уже потом решать, какие из ее элементов следует, возможно и целесообразно автоматизировать.

Впрочем, уже сама такая постановка вопроса заставила проектировщиков АСУ попытаться классифицировать и рационально описать различные системы управления и планирования предприятиями и отраслями промышленности. Логика автоматизации иногда диктовала и организационные изменения в системе управления (создание новых специализированных звеньев или даже уровней управления, например кустовых вычислительных центров, обслуживающих целый кластер однородных предприятий). Стали появляться многочисленные особые исследовательские и проектные институты, конструкторские бюро, специализирующиеся на разработке АСУ.

---

<sup>1</sup> См.: Никаноров С.П. АСУ: взгляд из 90-х в 60-е. К 70-летию первого в стране главного конструктора «АСУ завода» Юрия Михайловича Репьева // Экономическая газета. 1999. № 39, 40.

Постепенно становится очевидно, что в основе создания такого рода АСУП должна быть оптимизация управленческой деятельности как важная социальная проблема<sup>1</sup>. Необходимость этого объясняется увеличением численности промышленных рабочих, повышением стоимости машинных средств, усложнением технологических процессов и изготавливаемой продукции, развитием новых форм и сложной кооперации производственной деятельности предприятий в 60-е–70-е гг. XX в., что в свою очередь повышает роль управленческой деятельности и сложность управления в сфере производства.

«Последнее время наметилось резкое увеличение номенклатуры выпускаемых изделий на предприятиях радиопромышленности, что значительно усложнило техническую подготовку производства. Резкий рост количества планируемых производственным цехам наименований деталей... сделал практически невозможным квалифицированно планировать, диспетчировать и контролировать процесс изготовления деталей, что в свою очередь привело к значительному снижению качества управления. Для решения этой проблемы необходимо было либо идти по пути увеличения численности управленческого персонала соответственно росту количества наименований деталей, либо искать более рациональные методы управления. Широкое внедрение экономико-математических методов и ЭВМ решило эту задачу не в полной мере, так как количество деталей от использования ЭВМ не уменьшилось, контроль за их производством остался прежним... Внедрение дифференцированного метода диспетчирования и контроля планируемых деталей позволило повысить уровень управления, улучшить ритмичность предприятия»<sup>2</sup>.

Именно все более углубляющееся разделение труда на предприятии требовало выделения специализированных функций управления и формирования самостоятельного аппарата для их реализации. Причем более низкие показатели работы значительного количества предприятий по сравнению с группой передовых начинают объясняться именно несовершенством построения аппарата управления и недостатками в его работе, т.е., по сути дела, социальными, а не кибернетическими характеристиками отклонения от плановых показателей, требующими корректировки с помощью налаженной обрат-

---

<sup>1</sup> Системы управления в народном хозяйстве — это прежде всего социально-экономические системы, и способы их построения коренным образом отличаются от создания новых образцов изделий или строительных объектов [46, с. 3].

<sup>2</sup> См.: Дифференциальный метод диспетчирования и контроля планируемых деталей на производстве. Информационный листок № 68-74. Барнаул: Алтайский межотраслевой территориальный центр научно-технической информации и пропаганды, 1974.

ной связи. «При формировании подсистемы управления необходимо учитывать, во-первых, тенденции развития существующей организационной структуры, во-вторых, программу реорганизационных изменений на предприятии, в отрасли или народном хозяйстве в целом, в-третьих, имеющиеся средства для реорганизации управленческой деятельности. Проект подсистемы управления должен определять этапы осуществления намеченной программы (например, поэтапную автоматизацию)... Включение технических средств в сложившуюся подсистему управления лишь увековечивает существующие рутинные процедуры» [42, с. 42–49; 43]. Поэтому важным становится предварительное исследование объекта и системы управления, которая подлежит автоматизации, что необходимо для определения перечня автоматизируемых задач и облегчения внедрения АСУ. Без их тщательного изучения созданная автоматизированная система может оказаться несовместимой с существующей системой управления. Кроме того, на его базе осуществляется реорганизация управленческой деятельности, подготавливающая ее последующую автоматизацию.

В условиях тиражирования, создания серии аналогичных АСУ разрабатываются типовые проекты<sup>1</sup>, ориентированные на класс сходных систем, что, как предполагалось, существенно удешевит их разработку, но для их привязки необходимо учитывать особенности данного конкретного объекта и системы управления. Такой подход к АСУ во многом аналогичен переходу от индивидуального к серийному производству, однако уникальность каждой системы остается в данном случае гораздо большей, чем при создании традиционных технических устройств.

Еще более сложные задачи перед разработчиками АСУ возникли при переходе к созданию сначала отраслевых АСУ, а затем и общегосударственной автоматизированной системы (ОГАС) управления. Это стало актуальным в связи с организацией в конце 1960-х гг. в военно-промышленном комплексе СССР, а затем и в других отраслях промышленности отраслевых министерств<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> См., например: Типовая автоматизированная система управления предприятием с массовым характером производства на базе ЕС ЭВМ. НИИЭИР, 1974.

<sup>2</sup> «С середины 60-х годов руководство страны вкладывает в новую отрасль народного хозяйства огромные средства. Готовятся и выпускаются Постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР, создаются мощные исследовательские институты, подразделения на заводах, стройках и в отраслях, кафедры и учебные институты, подключается академическая наука, разрабатываются правовые основы этой новой деятельности. Но уже к середине 70-х годов Госплан СССР и Минфин СССР бьют тревогу, указывая на несопоставимость капиталовложений и получаемого эффекта. А вскоре вся эта деятельность начинает свертываться, и в 80-х годах остаются только островки от того, что было сделано в 60-х годах» (см.: *Никаноров С.П.* АСУ: взгляд из 90-х в 60-е. — <http://www.acconcept.ru/publish/repiev.html>).

«В.М. Глушков, как наиболее квалифицированный и авторитетный специалист в этой области, в 70-х годах был научным руководителем и консультантом многих проектов крупных ОАСУ, в частности в отраслях оборонной промышленности. Когда в оборонном комплексе был создан межведомственный комитет (МВК) девяти отраслей и Совет директоров головных институтов (СДГИ) оборонных отраслей по управлению, экономике и информатике, научным руководителем комитета и совета стал В.М. Глушков. В 1962 г. В.М. Глушков начал разработку проекта Общегосударственной автоматизированной системы (ОГАС)... как единой системы сбора отчетной информации по народному хозяйству, планирования и управления народным хозяйством, информационной базы для моделирования различных вариантов развития народного хозяйства»<sup>1</sup>.

В организационной структуре отрасли промышленности стало важным отображать не только организационные, но и информационные связи (рис. 3.18), которые признаются даже определяющими организационные структуры. «Любой орган управления — будь то заводоуправление, управление производственным объединением, министерство или ведомство — это система переработки информации» [44]. Однако обычной ошибкой является их привязка к существующим административным подразделениям, так как в этом случае «в АСУ навсегда закрепляются недостатки сложившейся системы управления — разрозненный характер информационных потоков и массивов, их многократное дублирование» [44, с. 172].

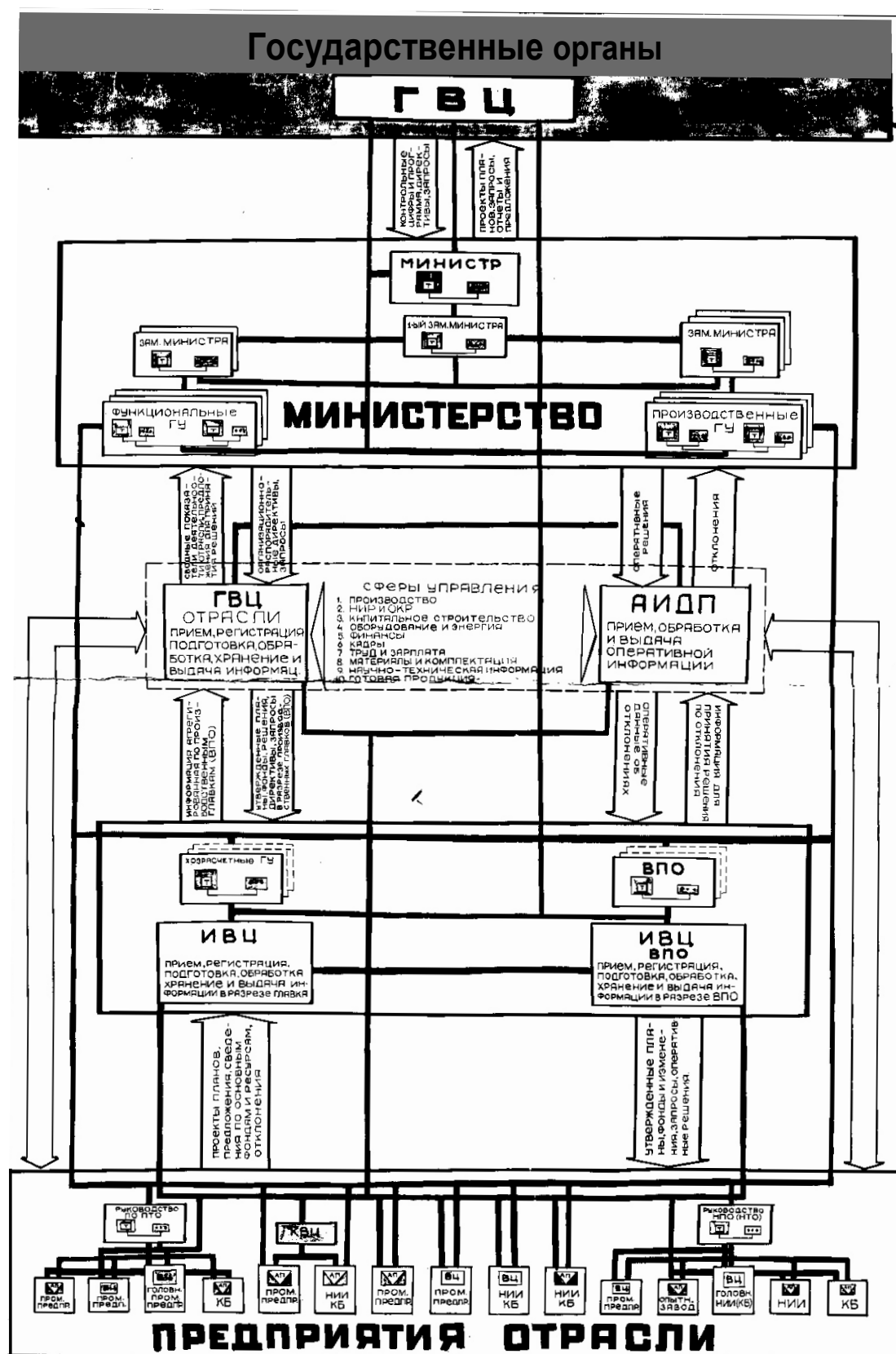
Была поставлена задача создания Единой государственной сети вычислительных центров (ЕГСВЦ) с целью обеспечения выполнения информационных процессов в системе планирования и учета в стране. «Предполагалось, что ко времени внедрения ЕГСВЦ на многих предприятиях будут функционировать АСУП или их “пусковые комплексы”, сопрягаемые с задуманной системой планирования. Система планирования интерпретировалась как та система учета и планирования, которая осуществлялась через ЦСУ: принятая агрегация учетных данных и производственных планов, материальных потребностей, принятой статистики и выявление в них дисбалансов»<sup>2</sup>.

Перестройка деятельности, подлежащей автоматизации, стала сказываться и на других видах деятельности.

---

<sup>1</sup> Общегосударственная автоматизированная система управления экономикой СССР (<http://computer-museum.ru/galglory/27.htm>).

<sup>2</sup> См.: Шкурба В.В. Глушков и ОГАС. — [http://www.iprinet.kiev.ua/gf/shkurba\\_ogas.htm](http://www.iprinet.kiev.ua/gf/shkurba_ogas.htm)



**Рис. 3.18.** Структурная схема организации и функционирования АСУ отрасли

Например, реорганизация управленческой деятельности выдвигает новые требования к обучению и подготовке кадров, к характеру методических материалов, к техническим средствам (необходимость конструирования специальных технических средств автоматизации управления, использования ЭВМ не только для обработки информации, но и для подготовки решений).

Нижний уровень управления составляют предприятия отрасли промышленности (промышленные предприятия, конструкторские бюро, отраслевые научно-исследовательские институты). Они или сами имеют вычислительные центры, или объединены в кустовые вычислительные центры (КВЦ), или в рамках производственно-технического либо научно-технического объединения их обслуживает вычислительный центр головного предприятия (НИИ, КБ, промышленного предприятия).

Путь снизу вверх означает движение проектов планов, сведений по основным фондам и ресурсам, информации по отклонениям от планов. Эта информация принимается, регистрируется, предварительно обрабатывается и хранится в информационно-вычислительных центрах (ИВЦ) регионов или подотраслей и в агрегированном виде (по так называемым функциональным главным управлениям<sup>1</sup>) передается на Главный вычислительный центр (ГВЦ) отрасли, который транслирует дальше наверх сводные показатели деятельности отрасли и предложения для принятия решений в функциональные главные управления министерства (например, планово-экономическое управление), а также на уровень заместителей министра и самого министра, оснащенных терминалами, присоединенными к единой ЭВМ<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Они, как правило, разделяли свои полномочия не по типам выпускаемой продукции, а по сферам управления: производство, НИР и ОКР, капитальное строительство, оборудование и энергия, финансы, кадры, труд и зарплата, материалы и комплектация, научно-техническая информация, готовая продукция (сбыт).

<sup>2</sup> В СССР в это время для решения задач автоматизации управления использовались вычислительные машины единой системы (ЕС ЭВМ), производившиеся в кооперации странами социалистического лагеря. Они, правда, были копией (и не лучшей) вычислительных машин серии IBM. Элементная база этих машин (собственного изготовления) была ненадежной, они часто выходили из строя, а при внедрении АСУ иногда для демонстрации снимали диководы с одной машины и ставили их на другую. Кроме того, был взят курс на производство именно больших машин для коллективного пользования, а не персональных компьютеров, что, по мнению партийного руководства, более соответствовало коллективному ведению социалистического хозяйства.



Проекты планов, запросы, отчеты и предложения должны были передаваться по специальным каналам связи на Главный вычислительный центр правительства. А оттуда сверху вниз через те же каналы связи и систему вычислительных центров поступали контрольные цифры утвержденных планов и программы, директивы и запросы вплоть до уровня отдельных предприятий.

Для обработки оперативной информации и оперативного управления в отрасли создавался автоматизированный информационный диспетчерский пункт (АИДП). В задачу его входило быстрое оповещение производственных главных управлений об отклонениях от планов на подведомственных им предприятиях для принятия быстрых решений, спускавшихся на предприятия через вычислительные центры Всесоюзных промышленных объединений (ВПО), созданных для руководства предприятиями, выпускающими однородную продукцию и связанными с ними НИИ (научно-исследовательские институты), КБ (конструкторские бюро), ПО (промышленные объединения), ПТО (производственно-технические объединения) и НПО (научно-производственные объединения). Таким образом, создавалась глубоко эшелонированная и весьма сложная структура управления, действительно требовавшая использования вычислительной техники для решения стоящих задач<sup>1</sup>.

Наряду с полезными и реалистичными результатами такого рода автоматизации управления (оптимизация документопотоков, регистрация всех этапов управленческих решений, повышение эффективности и квалификации управленческой деятельности и т. д.) возникло целый ряд новых трудностей и мифов. Сначала стали даже говорить о «кибернетическом министре», что вызвало страх у управленцев средних звеньев потерять работу или не справиться с новой

---

<sup>1</sup> Были созданы также совершенно новые подразделения и уровни управления, подчинявшиеся новой логике обработки информации, — кустовые вычислительные центры (КВЦ): «автоматизированные системы управления производственными объединениями и группами (“кустами”) предприятий — кустовые автоматизированные системы». Это было связано с тем, что в результате внедрения АСУ выяснилось, что «экономически целесообразно создавать АСУПы только на достаточно крупных предприятиях, поскольку затраты на разработку системы, приобретение, установку и обслуживание ЭВМ и другой техники значительны, а загрузка устройств вычислительной техники на небольших предприятиях может оказаться неполной... Весьма эффективное использование средств автоматизированных систем управления может быть достигнуто также путем создания кустовых автоматизированных систем управления группами предприятий, не только относящихся к одному объединению, но и расположенных в одном территориальном районе» [45, с. 4].

техникой. Сами министры, стимулировавшие разработку АСУ, конечно, потерять свое место не опасались, но в разных звеньях управленческого аппарата стали возникать новые проблемы.

К таким проблемам можно отнести избыточность предоставляемой ОАСУ управленческому персоналу министерства информации. Если раньше господствовала «телефонная» система управления и министерский клерк, курирующий свои предприятия, примерно знал, откуда ждать невыполнения планов, то теперь, получая ежедневную распечатку с вычислительной машины, на которой красным цветом обозначались узкие места и прорыва на подведомственных ему предприятиях, он терял нить управления из-за избыточности информации. Поэтому у руководства отраслями и предприятиями возникли вопросы о целесообразности внедрения АСУ, их эффективности и т.д. Разработчикам же стало ясно, что проблему создания АСУ необходимо решать вместе «со всем комплексом проблем и возможных мероприятий по совершенствованию данной организации. И только в том случае, если будет признано и доказано, что автоматизированная система управления является совершенно необходимой, только тогда можно приступать к широкому и сложному комплексу работ по ее созданию» [46, с. 40].

Кроме того, сбои в работе вычислительных центров, образованных не только на предприятиях, но и при министерствах, объединениях и даже Госплане СССР, могли вызвать растерянность и разрывы в управленческом цикле. К тому же деятельность этих центров и самой вычислительной техники была еще недостаточно отработана. Это напоминало случай в столице Норвегии Осло, когда отказала система автоматизированного управления в новом аэропорту и служащие, а также пассажиры оказались совершенно беспомощными и неспособными получить и передать нужную информацию о полетах. Именно поэтому становится очевидной необходимость не только одномоментного проектирования АСУ, но и длительного процесса их внедрения с возможной корректировкой первоначальных решений и перепроектирования. Да и сама деятельность по созданию АСУ становится достаточно сложной, требующей координации и управления, а в перспективе даже автоматизации проектирования АСУ.

Все это выдвинуло на первый план задачу рационального описания самой управленческой деятельности, ее разных фаз и различных уровней с целью выделения типовой структуры этой деятельности, позволяющей унифицировать ее алгоритмическое описание, причем не только с помощью кибернетических моделей (рис. 3.19) [47, с. 41–45]. Ранние этапы создания автоматизированных систем были связаны с решением задач управления, сравнительно легко поддающихся алгоритмизации (бухгалтерского учета, составления различного ро-

да ведомостей и других отчетных документов), где кибернетическая модель управления вполне себя оправдывала. В дальнейшем же была поставлена задача автоматизации творческих управленческих процессов, при которой эвристическая ценность существенно уменьшалась. Потребовался поиск новых способов описания как самой управленческой деятельности, так и автоматизированных систем управления.

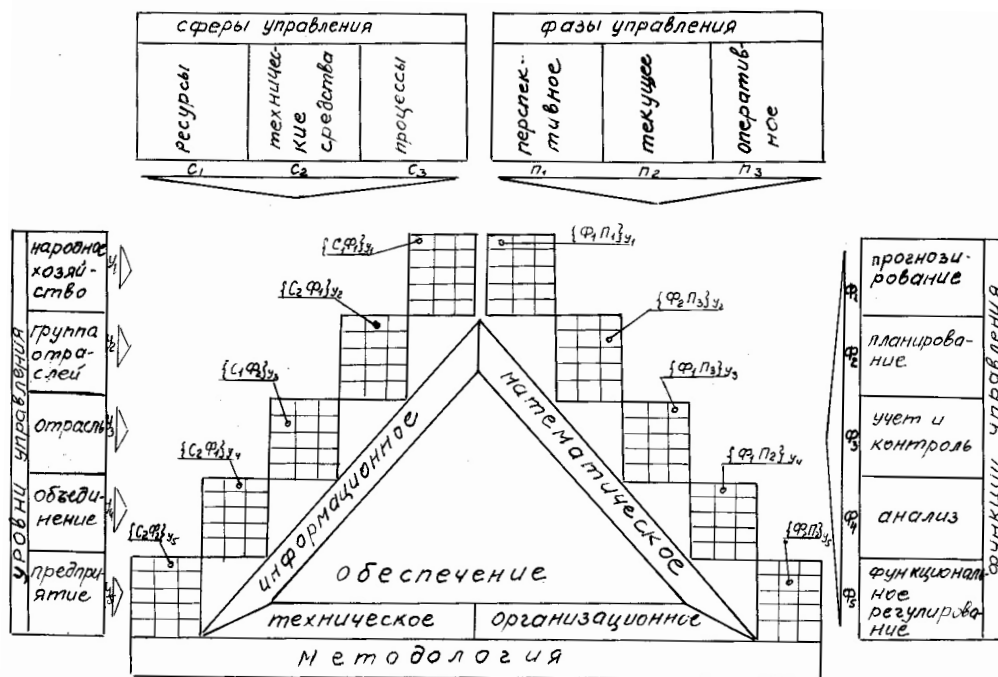


Рис. 3.19. Функционально-иерархическая схема ОАСУ

Функциональная часть АСУ может быть описана двумя способами: в соответствии со структурой объекта управления и в плане отображения процесса функционирования этой деятельности. В соответствии со структурой объекта управления, каковым в данном случае является производственно-хозяйственная деятельность предприятия, объединения, отрасли, в структуре АСУ можно выделить сферы и уровни управления. (Вообще управление — всегда воздействие одной деятельности на другую, т.е. объектом управленческой деятельности является другая, например производственная, хозяйственная, конструкторская, научная.)

Сферы управления соответствуют основным подсистемам объекта управления (ресурсы, технические средства, процессы). Каждая подсистема объекта управления на разных уровнях имеет различный характер. Например, обеспечение ресурсами всех предприятий отрасли существенно отличается от той же самой задачи на уровне отдельного предприятия. Число уровней не является жестко фиксированным. Оно может меняться. Уровень предприятия, например, может быть разделен на уровень заводоуправления и цеха. В зависимости от характера объекта это могут быть производственные и технологи-

ческие процессы, проектирование изделий, разработка технологии и т. п. Данные процессы реализуются производственными коллективами с помощью специфических технических средств — машин, станков, приборов и других орудий деятельности. Чтобы основные процессы в объекте управления функционировали нормально, они должны быть обеспечены соответствующими ресурсами — финансовыми, энергетическими, сырьевыми, кадровыми.

Таким образом, управленческая деятельность расчленяется, с одной стороны, на сферы (ресурсы, технические средства и процессы) и фазы (перспективное, текущее и оперативное)<sup>1</sup> управления, а с другой — на уровни (народное хозяйство в целом, группа отраслей, отрасль, объединение, предприятие) и функции<sup>2</sup> управления. В самой же деятельности по созданию АСУ выделяются информационное, математическое, техническое и организационное<sup>3</sup> обеспечение.

---

<sup>1</sup> Условно эти фазы принято разделять на управление перспективным развитием (отрасли, предприятия и т. д.), текущее и оперативное. Управление перспективным развитием имеет замкнутый цикл функционирования в течение от года и более (пять, десять лет и т. д.), текущее управление — от декады до года (месяц, квартал) и оперативное — в период меньше декады.

<sup>2</sup> На каждой фазе управления выполняется одна и та же последовательность функций: прогнозирование, планирование, учет и контроль, анализ, функциональное регулирование. При этом они имеют различный характер на этих разных фазах. Если, например, для управления перспективным развитием отрасли или предприятия прогнозирование заключается в определении общих тенденций их развития, то в плане оперативного управления оно уже выступает всего лишь как выявление (прогнозирование) возможных в данный короткий период времени отклонений от плана с целью мобилизации ресурсов для ликвидации этих отклонений. Планирование отличается от прогнозирования формулировкой четких требований к работе. План более жестко, чем прогноз, фиксирует данные требования. В процессе выполнения плана постоянно учитывается и контролируется реализация его основных показателей.

<sup>3</sup> Организационное обеспечение ОАСУ на уровне отрасли должно содержать краткую характеристику организационной структуры отрасли, описание существующей системы управления отраслью и предложения по совершенствованию ее функционирования; принципы построения, описание и предложения по совершенствованию организационной структуры ОАСУ; анализ и предложения по использованию методов и средств описания и моделирования организационных структур управления отраслью и ОАСУ; анализ и предложения по использованию методов автоматизации обследования отрасли и автоматизации проектирования АСУ. На уровне предприятия оно должно обеспечивать взаимодействие персонала АСУП с техническими средствами и между собой в процессе решения всех функциональных задач системы, а также предусматривать изменение структуры управления предприятием применительно к условиям функционирования АСУП (см.: Автоматизированные системы управления предприятиями. Общие технические требования. ГОСТ 20912–75. М.: Изд-во стандартов, 1975).

Однако сами эти обеспечивающие подсистемы выделяются только в процессе создания системы. Они включают соответственно разработку форм представления информации, программных и технических (включая и систему передачи данных) средств, определенных организационных мероприятий, в том числе предложений по совершенствованию организационной структуры существующей системы управления, положения и должностных инструкций, регламентирующих деятельность вычислительного центра, и т. д. На уровне функционирования АСУ они воплощаются в виде системы обработки данных, ориентированной на решение определенного класса задач. Но это еще не автоматизированная система управления. Таковой она становится, когда включается в конкретную управленческую деятельность. Именно этот аспект и отражает функциональная часть АСУ, которая составляет основу ее системного представления.

Функционально-иерархическое представление АСУ предполагает совмещение данных описаний управленческой деятельности. Вся совокупность элементов иерархической системы управления может быть представлена в виде матриц. Узлы пересечения строк и столбцов матрицы однозначно выделяют законченную единицу системы, обеспечивающую выполнение заданной функции управления в рассматриваемых сфере и фазе, а также на данном уровне управления. Такую единицу АСУ назовем функционально-управляющим блоком (ФУБ).

Понятие функционально-управляющего блока лежит в основе системного представления АСУ. Однако оно не заменяет понятия «задача», которое часто используется проектировщиками для характеристики элементарных составляющих автоматизированных систем. Оно характеризует лишь дополнительный уровень рассмотрения системы. Система в целом состоит из иерархии единиц — функционально-управляющих блоков. Верхний уровень этой иерархии образует совокупность всех блоков (систему в целом), образующих единую общегосударственную систему управления. Снизу системная иерархия замыкается предельной единицей — отдельным функционально-управляющим блоком, состоящим из совокупности информационных процедур (задач). Таким образом, любая АСУ может быть рассмотрена как некоторая композиция, собранная из определенного набора таких блоков.

Рассмотрим пример описания структуры ФУБ «Текущее планирование» на уровне предприятия. Текущее планирование на уровне предприятия охватывает периоды: в части подготовки производства — планируемый квартал, в части обеспечения выполнения производственной программы — планируемый месяц (с учетом перехо-

дящих заделов). Главная задача текущего планирования на уровне предприятия — обеспечение слаженного и комплектного хода производства по изготовлению и выпуску изделий в объемах и в сроки, установленные производственной программой, при наилучшем использовании трудовых, материальных и других ресурсов. Текущее планирование должно обеспечить: ритмичный и комплектный выпуск изделий, загрузку оборудования и площадей в соответствии с их расчетными мощностями, совершенствование технологии и организации труда, широкое внедрение поточных форм организации труда, максимальную специализацию труда на производстве, максимальное уменьшение незавершенного производства и ускорение оборачиваемости оборотных средств.

Каждый ФУБ имеет определенную внешнюю и внутреннюю структуры. Внешняя структура ФУБ «Текущее планирование на уровне предприятия» включает связи с одноименными блоками других уровней (в данном случае с ФУБ «Текущее планирование на уровне объединения»); связи с функционально идентичными блоками одного уровня, т.е. блоками перспективного и оперативного планирования на уровне предприятия; связи с функционально различными блоками одной фазы и уровня управления — прогнозирования, учета и контроля, анализа, функционального регулирования текущего управления на уровне предприятия.

Можно привести пример одной из указанных выше связей, скажем с ФУБ «Анализ текущего управления на уровне предприятия». Составлению производственных планов-графиков на предстоящий месяц предшествует анализ выполнения производственной программы в текущем месяце. Анализ производственной программы выявляет следующие данные: отклонение в выполнении заданий по сдаче деталей и причин допущенных отклонений; отклонение от установленных планово-расчетных нормативов; отклонение в обеспечении цехов материалами, оснасткой, технической документацией; влияние «узких мест» на допущенные отклонения от заданий (по оборудованию, рабочей силе и т.д.) в текущем месяце. Эти данные служат основой дальнейшего текущего планирования и наоборот — результаты последнего необходимы для проведения анализа.

Рассмотрим теперь внутреннюю структуру ФУБ «Текущее планирование на уровне предприятия». Текущее планирование на машиностроительных заводах осуществляется в три этапа. На 1-м этапе разрабатывается производственная программа (задание) по цехам. Она не содержит календарной последовательности отдельных позиций. На этом этапе устанавливаются объемное задание по изделиям и общий срок их выполнения. На 2-м этапе планово-производственный отдел (ППО) завода передает цехам годовую и квартальные (с разбивкой

по месяцам) производственные программы. На основании годового и квартального планов ППО разрабатывает сквозной график выпуска продукции, месячные календарные план-графики. Цеховой план-график, обчисленный по трудоемкости и в стоимостном выражении, является основным документом для внутрицехового оперативного планирования. На 3-м этапе окончательно уточняются объем и сроки выполнения элементов производственных заданий.

Внутренняя структура данного ФУБ может быть представлена в виде операционной схемы. Исходным материалом процедуры является задание на год. Первая обобщенная операция состоит в составлении плана производства предприятия на квартал с разбивкой по месяцам на основе годового задания и перечня номенклатуры. Вторая обобщенная операция — распределение плана по цехам — осуществляется исходя из плана производства предприятия на месяц и сведений о составе изделий и применяемости деталей. При выполнении третьей операции используются предварительные планы цехов. Она заключается в их корректировке в соответствии со сведениями о незавершенном производстве и межцеховых и внутрицеховых заделах. В результате получаются месячные оперативные планы заготовительным цехам и план-график выпуска товарной продукции сборочным цехам.

На основании анализа операционных схем процедуры текущего планирования, а также изучения различных систем планирования можно построить типовую для всех уровней пооперационную структуру указанной процедуры. Она будет содержать следующие три обобщенные операции: расчленение плана целого периода в соответствии с внешним временем системы (год, квартал, месяц); расчленение плана данного подпериода системы на подсистемы (участки, цехи, предприятия и т.д.); корректировка плана в соответствии с внутренним временем (учет заделов и незавершенного производства). Исходным материалом процедуры является план целого периода (год, квартал, месяц) для системы (цех, предприятие и т.д.). Продукт операции — оперативные планы данного подпериода для подсистем. На основе описанной функциональной структуры может быть составлено несколько алгоритмических схем для разных конкретных структур, которые представляют собой имитационную модель текущего планирования. Полученные на ней расчеты могут служить основой для создания проекта автоматизации текущего планирования на конкретном предприятии.

Таким образом, на каждом уровне управления функционально-управляющие блоки задаются в виде трехмерного вектора, состоящего из фазы, функции и сферы управления. Кроме того, каждый

функционально-управляющий блок может быть описан определенным набором внешних связей — с блоками одного уровня управления и блоками разных уровней. Для каждого такого блока могут быть описаны типовой перечень внутренних операций и типовые требования к информационному, математическому, техническому и организационному обеспечению.

Особенность создания АСУ, как показал опыт их внедрения, состоит в том, что проектирование и перепроектирование системы не прекращаются со сдачей ее в эксплуатацию, поэтому проектировщики АСУ осуществляют постоянный надзор за эксплуатацией системы и оценку ее функционирования, которые служат исходным пунктом для ее модернизации, устранения неизбежных ошибок в проектировании, которые в сложных социально-экономических и социально-технических системах невозможно предусмотреть и заранее прогнозировать.

Таким образом, чисто инженерно-технической работе отводится в процессе создания АСУ подчиненное место. «Поэтому АСУ надо рассматривать не столько как раз и навсегда созданную вещь, сколько как процесс непрерывного совершенствования управления... АСУ надо проектировать как непрерывно развивающуюся и совершенствующуюся систему, накапливающую опыт, и прежде всего проанализированный опыт, т. е. более правильные и четкие представления о понятии управления. Но для этого в АСУ должны быть встроены механизмы самосовершенствования и накопления опыта, т. е. у самой АСУ должна быть подсистема, непрерывно осуществляющая системный анализ» [44, с. 175–176].

Таким образом, методология создания АСУ должна, с одной стороны, основываться на общих системных принципах, а с другой — на анализе, например, отрасли или предприятия как объекта управления (т. е. производственно-хозяйственной деятельности) и деятельности аппарата министерства как органа управления. К этому со временем добавляется еще и исследование уже функционирующих АСУ и их подсистем<sup>1</sup>. Оно включает в себя не только анализ функционирования ЭВМ, специальных устройств сопряжения и аппаратуры передачи данных, регистрации, ввода, вывода и записи-считывания информации, но и самой схемы управления предприятием, отраслью и даже всем народным хозяйством в целом.

---

<sup>1</sup> «В настоящее время АСУПы успешно функционируют на многих предприятиях. Ставится задача совершенствования существующих систем и создания новых, более эффективных. В связи с этим возникает необходимость переосмысления проделанной работы и определения дальнейших перспектив развития АСУП» [48, с. 81].

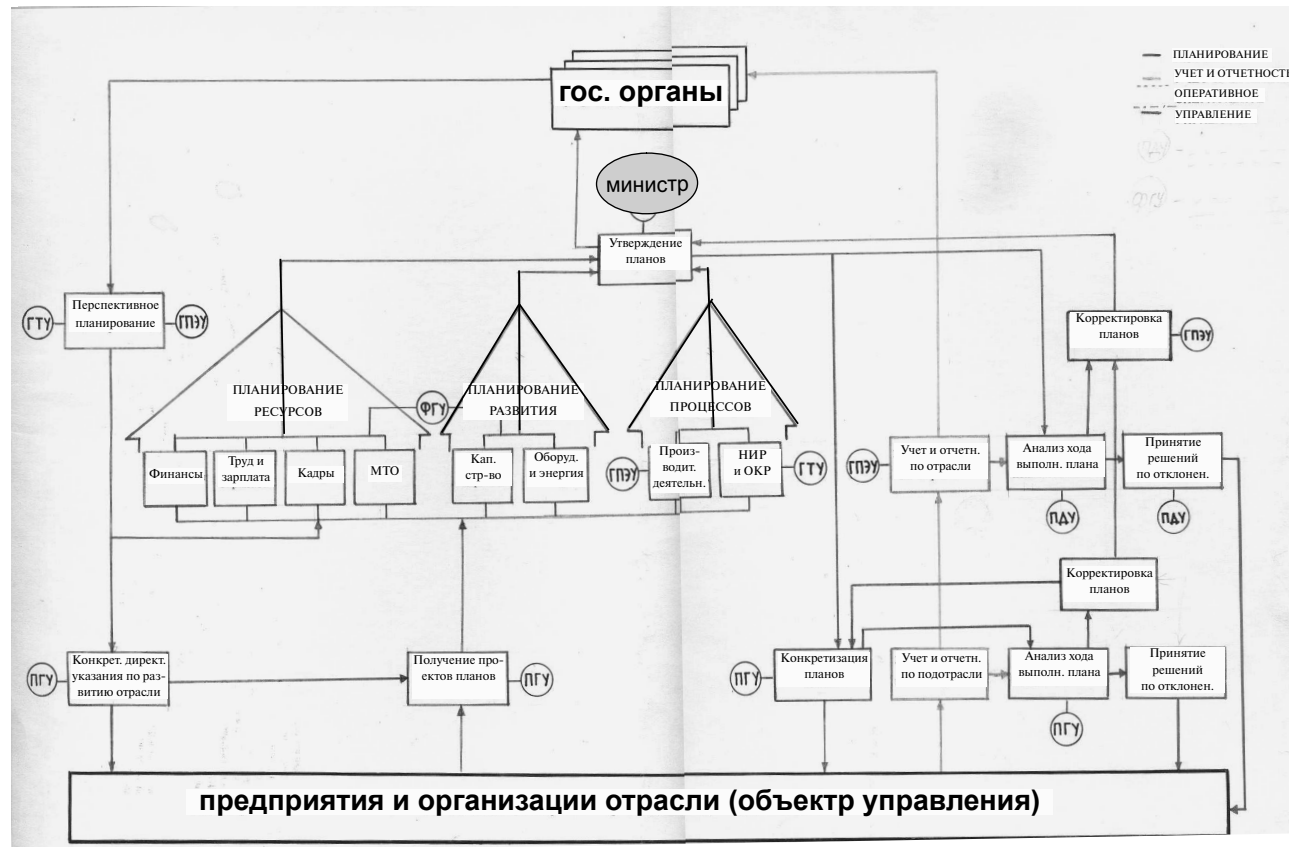


Именно задача совершенствования системы управления народным хозяйством на основе массового создания отраслевых автоматизированных систем управления выдвинула на первый план проблему исследования и описания процесса управления. «Если отраслевая автоматизированная система обрабатывает только информацию, циркулирующую внутри отрасли, решает внутриотраслевые задачи, то теряется сам смысл слов “автоматизированная система управления”, она превращается в систему автоматизированной обработки информации для министерства, но не решает проблем управления... Дальнейшее развитие АСУ министерств и ведомств, реализующих совместно общегосударственную функцию управления, должно идти по линии практического их слияния в комплексные АСУ для управления комплексными народнохозяйственными процессами» [44, с. 77, 87].

Схема управления отраслью (рис. 3.20) включала в себя составление планов, с одной стороны, на основе предложений предприятий, а с другой — на базе директивных указаний по развитию отрасли (контрольные цифры и программа), полученных от государственных органов, например Госплана, Совмина, ЦК КПСС и др.

«Каждая операция народнохозяйственного процесса... сопровождается целой серией управленческих операций. Каждому событию в области народнохозяйственного процесса предшествует целый ряд разделенных во времени операций управленческого труда, т. е. процессов переработки экономической информации, с помощью которых это событие планируется и подготавливается. Эти предшествующие управленческие операции условно можно разделить на три сферы: прогноз и перспективное планирование, текущее планирование, оперативное руководство. После того, как определенное событие в народнохозяйственном процессе совершилось, за ним следует целая серия управленческих операций, т. е. процессов переработки учетно-отчетной информации. Их также можно разделить на три крупные сферы: оперативный учет, бухгалтерский учет и расчеты, статистический учет и анализ» [46, с. 46].

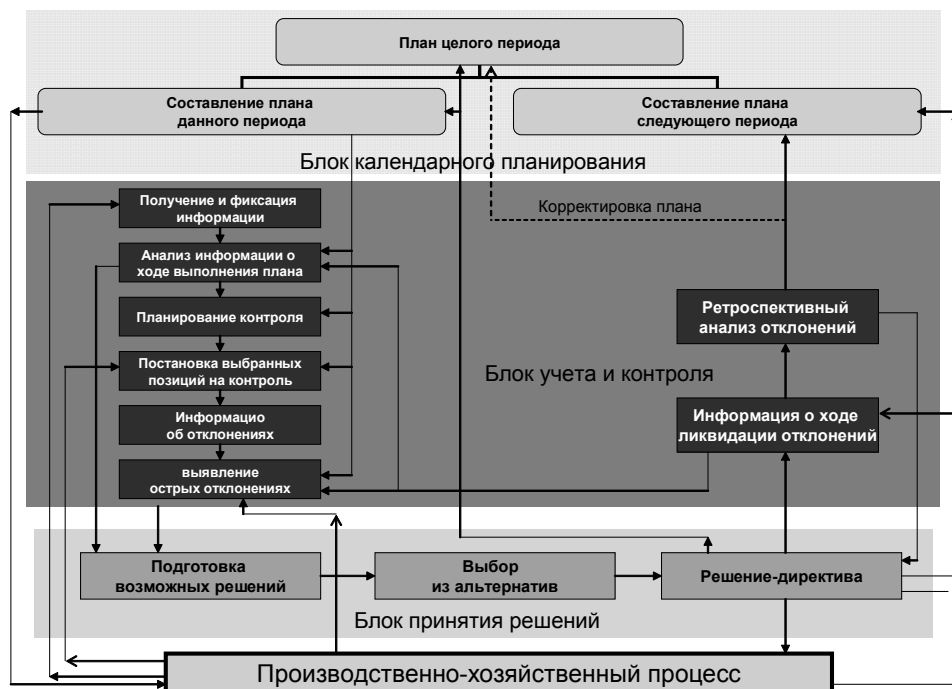
Эта часть управленческой деятельности включает в себя планирование ресурсов (финансы, труд и зарплата, кадры, материально-техническое обеспечение), планирование развития (капитальное строительство, оборудование и энергия) и процессов производственной деятельности, а также научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских разработок и завершается утверждением планов в государственных органах, что не означает невозможности их корректировки в связи с изменившимися задачами или ситуацией. Такая корректировка происходила также в процессе конкретизации планов.



**Рис. 3.20.** Схема управления отраслью: ГПЭУ — Главное планово-экономическое управление; ПГУ — производственные главные управления; ФГУ — функциональные главные управления; АИДП — Автоматизированный информационный диспетчерский пункт (в министерстве); ИВЦ — Информационно-вычислительный центр; ВПО — Всесоюзное производственное объединение; ГТУ — Главное техническое управление

Вторую важную часть управленческой деятельности составляют учет и отчетность предприятий перед министерством, а министерства — перед центральными государственными органами.

Третья часть процесса управления — оперативное управление<sup>1</sup>, включающее в себя анализ хода выполнения плана и принятие решений по отклонениям, одним из которых может стать и корректировка самих этих планов (рис. 3.21). Признанной становится необходимость совершенствования структуры государственного управления на всех уровнях от предприятия до высших органов власти.



**Рис. 3.21.** Схема оперативного управления производственно-хозяйственным процессом

<sup>1</sup> Например, на уровне предприятия с массовым и крупносерийным характером производства в цеха и службы завода ежедневно «выдаются оперативные планы производства, печатаются сводки сменных заданий и результатов работы цехов, которые доводятся до мастеров и рабочих. Оперативная работа диспетчерских служб цехов завода строится на основе выдаваемых ежедневно координационно-управляющим центром... ведомостей трехсменного и четырехдневного дефицита, учитывающих наличие и комплектность деталей в производстве и на складах. Закрытие дефицита фиксируется в памяти информационно-вычислительного комплекса. В течение смены на световом табло диспетчерского пульта завода высвечиваются справки о закрытии дефицита... Внедрение автоматизированной системы управления предприятием способствовало совершенствованию управления за счет использования более полной, своевременной, точной и релевантной информации, работы предприятия в режимах, близких к оптимальным, позволило более рационально использовать имеющиеся ресурсы» (см.: Типовая автоматизированная система управления предприятием с массовым и крупносерийным характером производства. М.: НИИЭИР, 1974).

#### **3.4.4. Системное обеспечение создания АСУ и организация подготовки инженеров-системотехников**

Внедрение АСУ, необходимость разработки новых и более эффективных систем потребовали переосмысления проделанной работы и изменения в понимании самого управления. Это было связано еще и с тем, что в сферу проектирования АСУ, кроме кибернетических представлений, были вовлечены новые, более современные методы системного анализа, исследования операций, анализа и моделирования сложной экономической деятельности и т.д., а также опыт (в том числе отрицательный) разработки и внедрения АСУ на разных предприятиях, в самых разнообразных сферах управления и различных отраслях промышленности. Это, однако, несколько иной опыт, чем тот, который был накоплен в результате осуществления крупных проектов типа атомного, ракетного и радиолокационного, где все же главным оставалось создание сложных технических систем, хотя в итоге эти системы оказались социотехническими. «В перипетиях руководителей создания систем организационного управления ощущается какая-то специфика, которая делает задачу, которую они решали, и их деятельность в чем-то принципиально отличными от проблем, с которыми сталкивались главные конструкторы технических систем. Если не сводить их задачу к компьютеризации расчетов, то становится очевидно, что предметом их деятельности является деятельность людей ..., а не действие технических систем.

Говоря более обобщенно, предметом их деятельности являются формы коллективной работы или, кратко, организационные формы... природа формообразования при создании АСУ иная, чем при реорганизациях. Сейчас мы уже можем сказать, что различие заключается в том, что при реорганизациях меняются должности и область деятельности, а при переходе на формальные («компьютерные») формы деятельности организации меняется (в большей или меньшей мере) тип мышления... Главным противоречием было несоответствие экстенсивных по своей природе форм организации и управления, использовавшихся в СССР, и интенсивным («научно-техническим») развитием. Это противоречие, несмотря на разнообразные усилия, так и не было разрешено.

Состояние организации и управления было важным, если не критическим, фактором разрешения этих противоречий. Руководство с большим опозданием начинало это осознавать, однако к моменту, когда уже надо было подниматься в этой области на качественно иной уровень, страна оказалась совершенно неподготовленной. Вся тяжесть этой коллизии легла на маленький, очень маленький круг лиц, принадлежавших к интеллектуальной элите той эпохи... Были

поставлены и осуществлены разработки АСУ народным хозяйством. Но чем выше был уровень, тем больше эти системы становились “информационными” и все больше теряли черты систем организационного управления»<sup>1</sup>.

Совершенно очевидно, что проблему проектирования и внедрения АСУ невозможно рассматривать лишь как узконаправленную задачу применения вычислительной техники для расчетов, простого накопления и передачи информации, наряду с такими по сути дела организационными задачами, как совершенствование структуры предприятий и реорганизация системы управления ими, оптимизация (т.е. нахождения скрытых резервов) производства и т.д. Кроме того, опыт конкретной работы показал, что и само создание АСУ относится к комплексным задачам и включает в себя помимо механизации целый ряд других не менее важных аспектов: экономических, организационных, социальных, психологических и др. Стало ясно, что сведение проектирования АСУ лишь к оснащению управленческого аппарата вычислительной техникой и созданию системы информационного обслуживания является недостаточным. Необходим системный анализ управленческой деятельности и определение возможности и необходимости включения в нее различных машинных средств. Тогда сложная структура управленческой деятельности представляется как состоящая из нескольких систем связей.

*Во-первых*, между управленческим персоналом существуют сложные информационные связи. В этом смысле можно говорить об информационной структуре управления.

*Во-вторых*, в структуре управленческой деятельности существует организационная система связей, которые могут быть формальными и неформальными. Формальные связи закреплены в соответствующей бюрократической структуре, неформальные — устанавливаются за счет личных контактов. Эти сети связей, как правило, не совпадают в структуре управления и образуют в ней самостоятельные подсистемы.

*В-третьих*, выделяются как относительно самостоятельные экономические связи, образующие систему экономических мероприятий, рычагов и воздействий в структуре управления.

*В-четвертых*, между управленческим персоналом устанавливаются конкретные процедурные связи. Эти связи определяются последовательностью выполнения управленческих операций и составленных из них процедур управленческой деятельности.

---

<sup>1</sup> См.: Никаноров С.П. АСУ: взгляд из 90-х в 60-е. К 70-летию первого в стране главного конструктора «АСУ завода» Юрия Михайловича Репьева // Экономическая газета. 1999. № 39, 40.

Все эти системы тесно взаимосвязаны и опираются друг на друга в единой управленческой деятельности. Именно поэтому невозможно реорганизовать одну систему связей без перестройки других (например, создание эффективного информационного обслуживания управленческого персонала требует перестройки организационной структуры управления, оптимизации процедурных связей и др.).

Опыт первых этапов внедрения АСУ показал, что встраивание в существующую систему управления вычислительных средств требует перераспределения функций в самом управленческом аппарате, например централизации основных управленческих функций (планирование, снабжение, распределение и т. д.) и даже введения новых звеньев (скажем, управление по перспективному развитию отрасли) и уровней управления (таких, как кустовые вычислительные центры и связанные с ними новые управленческие задачи).

В наибольшей мере АСУ изменяют содержание и организацию учетной работы аппарата управления: практически стирается грань между оперативным, бухгалтерским и статистическим учетами, поскольку в условиях АСУ все они базируются на информационных потоках из Главного вычислительного центра; сокращается объем информации, ликвидируются промежуточные накопительные документы, поскольку вся переработка информации возлагается на ЭВМ, а вся хранимая информация один раз вводится в память ЭВМ и затем вместе с текущей информацией в нее вводятся в дальнейшем только изменения; вся информация (за исключением строго документальной отчетности) строится по принципу отклонений, т. е. с помощью ЭВМ используются лишь сведения об отклонениях от нормы, аварийных ситуациях, на основе которых должны приниматься определенные решения; учетные данные автоматически получают по заранее разработанным программам в наиболее удобной для практического использования форме, необходимой для анализа и контроля производственно-хозяйственной деятельности. Причем эти изменения в процедурах управления влекут за собой соответствующие структурные изменения в аппарате управления, т. е. перераспределение и уточнение полномочий на различных уровнях и в разных подразделениях, в том числе за подготавливаемую и передаваемую в АСУ информацию.

В то же время внедрение АСУ выдвинуло и новые требования к электронно-вычислительной технике, программному обеспечению, системам передачи данных и периферийному оборудованию. Во второй очереди АСУ появляются принципиально новые задачи оптимизации и прогнозирования, которые уже требуют сложной программной и информационной базы, комплексирования технических

средств, а увеличение состава и количества решаемых в системе задач приводит к росту объемов обрабатываемой информации и вычислительных работ. Другими словами, вычислительная мощность ЭВМ должна была быть увеличена в 4–5 раз по сравнению с первым этапом, что соответствовало машинам серии ЕС ЭВМ с дополнительными устройствами оперативной памяти, накопителями на магнитных дисках и аппаратурой для дистанционной связи с абонентами.

Все эти параметры выглядят безнадежно отставшими от современного развития вычислительной техники<sup>1</sup>, но для нас важно лишь показать, что реорганизация системы управления на основе применения вычислительной техники также может давать обратные стимулы к ее развитию.

Кибернетическое понятие управления предполагает выделение типовых элементов и алгоритмов управления объектами однородной структуры. Поэтому при создании АСУ предлагалось соблюдать «принцип максимальной разумной типизации решений» [49]. Суть его — в создании типовых проектов для тиражирования АСУ. Предполагалось, что тогда дорогостоящий технический комплекс, системное математическое обеспечение, рабочие программы и связанные с ними формы и состав информационных массивов могут быть разработаны общими для групп однородных предприятий и типов АСУ. Этот тезис вполне соответствовал кибернетическому представлению управления как идентичному — все равно идет ли речь о живом организме, машине или же социальной системе. Практика внедрения АСУ, однако, показала, что и в этом случае потребуются достаточно сложный «проект привязки» к специфике объекта управления и соответствующей ему управленческой структуры. Поэтому, прежде чем начать разработку типовой модели организационной структуры управления, например отраслю промышленности, необходимо провести анализ существующих организационных структур управления. Причем управление не может быть полностью редуци-

---

<sup>1</sup> «Можно услышать, что задача создания АСУ была поставлена преждевременно, так как наличная вычислительная техника, методы программирования и проектирования не позволяли еще решать такие задачи, что следовало подождать десять лет, когда в 1981 г. появились персональные компьютеры IBM PC, или, еще лучше, 20 лет, когда появился весь ассортимент современных средств автоматизации управления... Автоматизация является лишь стороной организационного формообразования, и, как уже давно пронизательно заметил С. Бир, “дело не в автоматизации”» (см.: *Никаноров С.П.* АСУ: взгляд из 90-х в 60-е. К 70-летию первого в стране главного конструктора «АСУ завода» Юрия Михайловича Репьева // *Экономическая газета*. 1999. № 39, 40).

ровано к его кибернетической модели<sup>1</sup>, оно должно рассматриваться как сложный динамический (непрерывный, целенаправленный, социально-экономический и организационно-технический) процесс. Управленческое решение — это социальный акт, подготовленный на основе многовариантного анализа и оценки, организующий практическую деятельность субъектов управления.

Важная роль начинает придаваться также методологии системного обеспечения АСУ (в особенности ОАСУ) в целом, которая необходима главному конструктору такой системы для *управления* (контроля, оценки и корректировки) процессом ее разработки и внедрения. Процесс создания АСУ становится достаточно сложной деятельностью, что стимулировало появление особых системотехнических групп и отделов, главная задача которых — стыковка деятельности других инженерных групп, забота о создаваемой системе в целом. Инженер-системотехник должен быть поэтому «универсалистом» с широким кругозором, обладать знаниями тех инженерных групп, которые он координирует, а также знаниями о всех системах данного типа, отвлекаясь от их конкретной формы. Поэтому именно в это время в различных российских вузах организуются кафедры системотехники (например, одной из первых такая кафедра появилась в Московском энергетическом институте, создателем ее был профессор, докт. техн. наук Ф.Е. Темников). Главной задачей их была подготовка специалистов (точнее «универсалистов»), обладающих широким системным мышлением. Для этого, наряду со специальными, вводятся новые курсы по системотехнике, системному анализу и системному подходу как универсальному руководству по решению системных проблем. Основными задачами таких инженеров-системотехников при разработке АСУ становятся интеграция системы в единое целое и системная организация процесса ее проектирования.

Инженер-системотехник должен сочетать в себе талант ученого, конструктора и менеджера, объединять специалистов различного профиля для совместной работы. Для этого ему необходимо разбираться во многих специальных вопросах. Однако главное для него — научиться применять все полученные знания для решения двух основных системотехнических задач: обеспечения интеграции

---

<sup>1</sup> Это было возможно лишь на первом этапе внедрения АСУ, когда направление автоматизации определялось не столько необходимостью и важностью выбранных задач, сколько их подготовленностью к автоматизации и возможностями реализации на существующей информационной и технической базе, т.е. так называемых «рутинных» процессов (типа бухгалтерского учета).



частей сложной системы в единое целое и управления процессом создания системы, т. е. фактически заниматься управленческой деятельностью. Поэтому в списке требуемых от него знаний внушительное место уделяется системным и кибернетическим дисциплинам. Именно для решения такого рода системных задач и создавались в проектирующих АСУ организациях специальные подразделения — системного обеспечения АСУ.

В качестве целей такого рода системного обеспечения АСУ выдвигаются следующие: переход к созданию комплексных интегрированных систем управления, имеющих в своем составе полный комплекс задач, начиная от автоматизации проектирования изделия на станках и линиях с программным управлением, объединяющих технологию производства и организацию управления; переход к созданию иерархического банка данных, обеспечивающего информацией все функциональные блоки системы; упрощение вопросов алгоритмизации и программирования, создание пакетов прикладных программ и автоматизации проектирования самих АСУ; обеспечение непрерывного развития и адаптивности автоматизированных систем управления. Однако главным образом системное обеспечение АСУ должно было быть сконцентрировано на научно-исследовательской деятельности, направленной на развитие и разработку:

- средств, методов, принципов и процедур исследования и проектирования АСУ в целом;
- средств, методов и принципов анализа и организации деятельности по ее созданию с целью разработки комплекса методических материалов и нормативно-технических документов, регламентирующих процесс создания АСУ как единого целого;
- системных проектных решений, обеспечивающих интеграцию системы, т. е. стыковку и обеспечение совместимости отдельных задач и подсистем АСУ, а также с системами верхнего и нижнего уровней управления.

Таким образом, необходимость системного обеспечения АСУ стала очевидной на тех этапах развития, когда были уже созданы различные автоматизированные системы, появлялись все новые задачи, подлежащие автоматизации, и весь процесс становился трудно обозримым. Поэтому системное обеспечение разработки АСУ должно было быть направлено на решение тех задач, которые не могли быть предметом специального рассмотрения ни в одной из подсистем АСУ, а именно:

- определение узких мест в разработке и в развитии системы;
- формирование ближайших целей и задач по развитию системы в целом;

- составление прогнозов развития отрасли (предприятия и др.) и АСУ различных уровней;
- разработка и анализ системных моделей АСУ;
- проектные решения по системе в целом;
- оценка технико-экономической эффективности создания и функционирования АСУ в целом;
- оценка типовости и совместимости решений в АСУ и т. д.

Одним из главных тезисов второй очереди развития АСУ была выдвинута разработка принципов автоматизации проектирования АСУ, для чего требовалось системное описание деятельности по ее созданию. С этой целью разрабатываются различные отраслевые стандарты, поскольку имевшиеся к этому времени государственные стандарты проектно-конструкторской деятельности не могли быть буквально перенесены на процесс разработки АСУ. В особенности это касается ОАСУ и первых этапов проектирования системы — подготовки технического задания и разработки эскизного проекта.

Поскольку основная задача технического задания (ТЗ) — дать заказчику и исполнителю общее представление о будущей системе и процессе ее создания, то в нем должны содержаться детальный анализ требований заказчика и потребителя, а также анализ выполнимости, для чего осуществляется обследование существующей системы управления как объекта автоматизации. Результаты данного обследования используются для определения общей цели АСУ, обоснования разработки и создания проекта поэтапного ее внедрения, от чего зависит в значительной степени успех всего предприятия. Такое обследование, а фактически особое социально-экономическое исследование, проводится параллельно с оформлением ТЗ, поэтому здесь требуется гораздо больше времени, чем при создании традиционных, чисто технических систем. В ТЗ дается грубая оценка времени, денежных средств и людских ресурсов, требуемых для создания данной АСУ, т. е. перечень работ и исполнителей, этапы создания АСУ и сроки их выполнения, а также предварительная оценка ожидаемой эффективности ее внедрения. Эта работа, однако, является одной из основных на фазе разработки эскизного проекта, где, кроме того, уточняются все узловые аспекты и части системы, состав подсистем, требования, предъявляемые к информационной базе, математическому обеспечению и комплексу технических средств, которые в ТЗ намечаются лишь в общих чертах. Главные же внешние требования к будущей системе должны быть сформулированы в ТЗ четко и определенно.

На фазе эскизного проекта производится выбор из альтернативных решений, а разработка технического проекта начинается с анализа выбранного прототипа системы и стыковки проектов

подсистем, т. е. окончательно определяются назначение и структура АСУ в целом и дается обоснование состава подсистем (их функций, перечня и постановки решаемых ими задач). На стадии технического проектирования осуществляется окончательная доводка системы, например разрабатываются конкретный технологический процесс сбора, обработки и передачи информации в рамках данной системы и документация, обеспечивающая внедрение и эксплуатацию АСУ.

Фаза изготовления имеет в данном случае несколько иное значение, чем при разработке даже сложных чисто технических систем. В принципе основные технические компоненты, выбранные на предыдущих этапах, берутся готовыми и центр тяжести переходит на проектирование интерфейсов, стыковку этих компонентов и их интеграцию в единую функционирующую систему. Поэтому основное значение приобретает процесс внедрения АСУ, заключающийся в установке, отладке, окончательной проверке и пуске системы, т. е. в опытной эксплуатации отдельных задач и подсистем и АСУ в целом и в конечном счете сдаче их в промышленную эксплуатацию. Одновременно отрабатывается руководство к эксплуатации.

Однако системное обеспечение АСУ, кроме целостного описания деятельности по созданию АСУ, должно было опираться на системное представление управленческой деятельности, подлежащей автоматизации, которое основывалось на трех основных типах ее описания: процессуальном, структурном и функциональном. Для этой цели строятся соответствующие схемы.

*Схемы процессов* делятся на процедурные, операционные, алгоритмические и информационные. Процедурные блоки описывают общий характер действий и указывают их исходный материал и продукт. На операционной схеме обозначается только последовательность операций, составляющих эти процедурные блоки. На основе операционной схемы может быть создана алгоритмическая схема, которая фиксирует машинизируемые задачи.

Различные схемы информационных потоков, которые также являются разновидностью схемы процессов, позволяют «автоматизировать» процедурные схемы управленческой деятельности.

*Структурные схемы* системы управления описывают размещение блоков, их организованность в материале, технические средства и персонал системы, конкретные мероприятия и этапы автоматизации. Они специфичны для каждой системы. Построение таких схем часто сводится лишь к обозначению машинных компонентов и служб информационного обеспечения. Организационные связи, в особенности неформальные, не указываются на таких схемах.

Поэтому они должны быть дополнены специальными организационными структурными схемами. Очень часто структурные схемы и схемы процессов строятся отдельно и трудно совместимы либо в расчет принимается только один из этих типов схем. Тогда совмещение их обеспечивается за счет построения этих схем на общей функциональной основе.

*Функциональные* схемы управленческой деятельности совпадают для целого класса систем и строятся исходя из общих методологических принципов. В свою очередь, они задают принципы построения как структурных схем, так и схем процессов и тем самым обеспечивают их общность и совместимость.

Предполагалось, что системное обеспечение должно реализовываться по следующим основным направлениям деятельности: методология создания АСУ, методическая деятельность, анализ объекта и системы управления, системный анализ и системное проектирование АСУ и научно-техническое управление ее разработкой. Конечно, это — идеальная модель системного проектирования АСУ, которая на практике была реализована лишь в усеченном виде. Однако, хотя она рассматривалась как сверхзадача, в ряде организаций были созданы специальные системные подразделения и в учебных курсах для подготовки разработчиков АСУ обязательно включались вопросы системного обеспечения таких разработок.

Так или иначе, центральным звеном разработки АСУ становится именно системное проектирование, которое состоит из двух основных частей — создания системной модели АСУ и разработки системной модели деятельности по созданию АСУ, на основе которой, как предполагалось, может быть даже осуществлена автоматизация проектирования самой АСУ.

Таким образом, создание АСУ является одним из вариантов системотехнической разработки. Эта сфера системотехники более ориентирована на реорганизацию деятельности предприятий с использованием техники, в первую очередь вычислительной. Во втором направлении к рассмотренной выше проблематике примыкает составляющая, связанная с управлением сложными техническими проектами, — проектный менеджмент, поскольку само появление системотехники было связано прежде всего с необходимостью управления и организации инженерной деятельности.

В настоящее время появилась новая программа компьютеризации документооборота и процессов управления, которую часто называют «электронное правительство» (e-government — electronic government). Она направлена на обеспечение информацией государ-

ственных управляющих органов с помощью компьютерных средств и Интернета, организацию государственного управления на основе электронных средств обработки, передачи и распространения информации. Это, в сущности, та же самая задача, что ставилась перед создателями АСУ, с использованием, однако, новых возможностей современных информационно-компьютерных технологий и Интернета.

Еще одно важное отличие заключается в том, что эта новая система призвана предоставить услуги государственных органов всех ветвей власти всем категориям граждан, т. е. необходимые им документы в электронном виде (безбумажное делопроизводство). Здесь, как и в случае внедрения АСУ, возникает множество юридических, экономических, в самом широком смысле социальных проблем, требующих своего параллельного или даже предварительного решения при внедрении информационно-компьютерных средств (таких, например, как легитимация и информационная защита электронной подписи).

Важной особенностью такой системы является также информирование граждан о работе органов государственного управления всех уровней, вплоть до президента или председателя правительства, с помощью электронных средств, что должно обеспечить как свободу доступа граждан к государственной информации, так и непосредственный контакт с населением, минуя все более усложняющуюся бюрократическую иерархию, т. е. эффективную обратную связь. В принципе назначение этой системы, как и ранее АСУ, — не столько оптимизировать общение власти как на федеральном, так и на местном уровне с гражданским обществом, сколько в первую очередь повысить эффективность управленческой деятельности.

### **3.5. Микро- и наносистемотехника как новая область системотехники**

#### **3.5.1. Общие сведения**

Микро- и наносистемотехника, или системотехника микро- и нанотехнологий, представляет собой совокупность технологий конструирования сложных микро- и наносистем, например сложных устройств из нанотрубок; технологий реализации микромашин, микроэлектромеханических систем и микросистем. «Область микроси-

стем охватывает широкую сферу технологий и микроэлектроники, объединившую микромеханику, микроструйную технику и микрооптику с целью фабрикации сложных, многофункциональных интегральных микросистем»<sup>1</sup>.

«Микросистемотехника является ключевой технологией XXI века. Изделия, содержащие микросистемотехнические компоненты, завоевывают все более широкую область применения в нашей повседневной жизни и с точки зрения потенциала их функциональности и экономичности не могут быть более исключены из нашей жизни. С помощью пропорционального уменьшения размеров структур в нанометровой сфере появились новые сферы применения»<sup>2</sup>.

Двойная ориентация нанотехнологии и на естественнонаучное исследование природных явлений, и на производство искусственных наносистем заставляет рассматривать наносистемы как естественно-искусственные системы. С одной стороны, они являются явлением природы, а с другой — тем, что можно и нужно создать искусственно (например, наномашину). «Нанотехнология представляет собой инженерию функциональных систем на молекулярном уровне... К.Е. Дрекслер... говорил о построении машин на уровне молекул»<sup>3</sup>. «Произведенные изделия, сделанные из атомов, и их свойства зависят от того, как эти атомы расставлены... Наша способность моделировать молекулярные машины... опережает нашу способность делать их» [50]. Наносистемотехника сегодня становится комплексом методов моделирования и все более и более проектирования разнообразных артефактов. «Микросистемотехника и нанотехнология являются двумя взаимодополняющими дисциплинами. Нанотехнология обеспечивает доступ к еще не используемым, совершенно новым эффектам. Микросистемотехника позволяет разрабатывать совершенные системные решения благодаря их высокому системному потенциалу»<sup>4</sup>. Наносистемотехника, как и макросистемотехника, включает в себя системное исследование и системное проектирование наносистем и с самого своего зарождения направлена не только на исследование, но и на реструктурирование

---

<sup>1</sup> Comprehensive Microsystems. 2007. Vol. 1–3 / Ed. by Yogesh Gianchandani, Osamu Tabata, Hans Zappe. Hardbound, 2007 — <http://www.elsevier.com>

<sup>2</sup> Vogt H. Micro- and Nanosystems Engineering. — <http://www.fb9dv.uni-duisburg.de/vdb/info.php?id=473&mode=veranstaltung>

<sup>3</sup> What is Nanotechnology? Center for Responsible Nanotechnology, 2008. — <http://crnano.org/whatis.htm>

<sup>4</sup> The KIT Nano- and Microscale Research and Technology Center (NanoMikro). — <http://www.research.kit.edu/149.php>

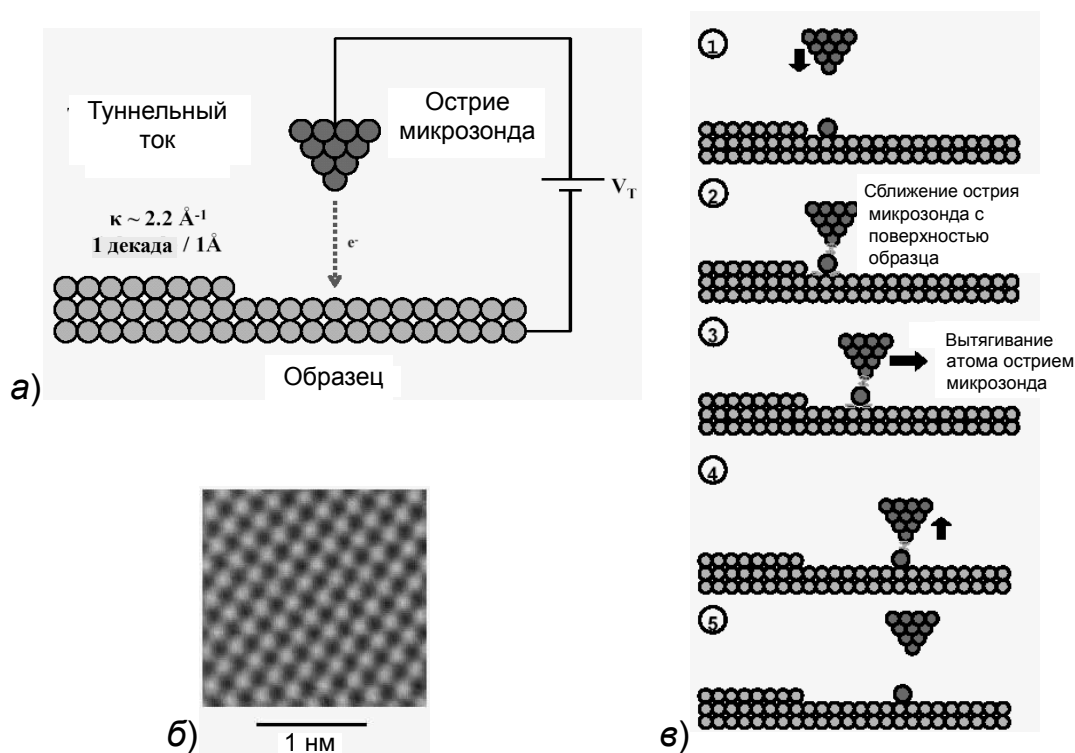
материи. Нанотехнология, таким образом, представляет собой и область научного знания, и сферу инженерии, наносистемотехнику, поэтому ее по праву стали называть нанотехнонаукой [51], подобной макросистемотехнике, но на уровне микро- и наносистем. Нас, однако, в данном исследовании интересует, каковы особенности теоретических исследований в наносистемотехнике.

В предыдущих главах мы стремились показать, что нанотехнонаука представляет собой комбинацию естественнонаучной и технической теорий. В данной главе мы постараемся показать, что теоретические исследования в наносистемотехнике являются комплексными теоретическими исследованиями, аналогичными макросистемотехнике и представляющими собой комбинацию или кластер различных теорий, объединенных общей наносистемной картиной мира (системной онтологией) и проблемно-ориентированных на исследование и создание сложных наносистем.

### 3.5.2. Нанотехнология как кластер теорий

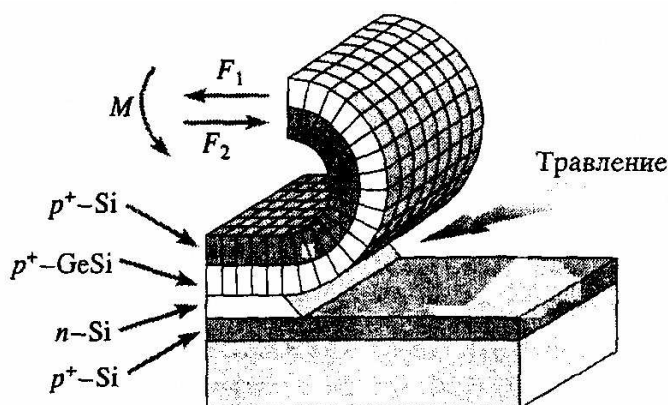
Современные представления о научной теории становятся все более близкими к ее пониманию как своего рода технической теории. В классической технической и физической теориях обнаруживается много общего, но есть и существенные различия. Технические и естественные науки занимают одну и ту же предметную область инструментально измеримых явлений. Они могут исследовать одни и те же объекты, однако методы исследования будут разными. В современной технонауке эти различия полностью снимаются, так как естественнонаучный эксперимент становится неотделимым от проектирования, а результаты такого рода исследований направлены одновременно как на объяснение и предсказание хода естественных нанопроцессов, так и на конструирование новых искусственных наноструктур. Например, при исследованиях, проводимых с помощью туннельного микроскопа, одновременно создаются новые наноструктуры (рис. 3.23).

Это легко увидеть во многих рассуждениях в области нанотехнологии: «*Конструирование* эпитаксиальных структур “германий — кремний” с квантовыми точками стало возможным *после изучения* начальных стадий осаждения германия на атомно чистую поверхность кремния методом *сканирующей туннельной микроскопии* в сверхвысоком вакууме.



**Рис. 3.23.** Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа (а) для получения изображений поверхности Ag(001) на его дисплее (б) и одновременно манипуляции молекулами с помощью сканирующего туннельного микроскопа (в)<sup>1</sup>

Управлять плотностью и размером островков германия можно, если германий *растет* на поверхности кремния со слоем оксида толщиной в несколько атомных слоев непосредственно *в установке молекулярно-лучевой эпитаксии*» (курсив мой. — Прим. В.Г.; см. рис. 3.24) [52, с. 606].

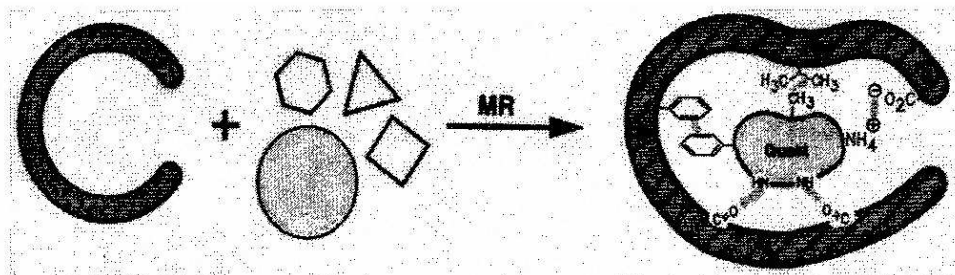


**Рис. 3.24.** Схема сворачивания эпитаксиальной гетероструктуры при удалении в селективном травителе «жертвенного» слоя. Силы межатомного взаимодействия  $F_1$  и  $F_2$  создают момент сил  $M$ , изгибающий гетероструктуру. В результате получается нанотрубка [52, с. 609]

<sup>1</sup> [http://www.physics.berkeley.edu/research/crommie/research\\_stm.html](http://www.physics.berkeley.edu/research/crommie/research_stm.html)



В нанотехнологии в принципе невозможно разделить научное исследование от разработки технологии и проектирования (рис. 3.25).



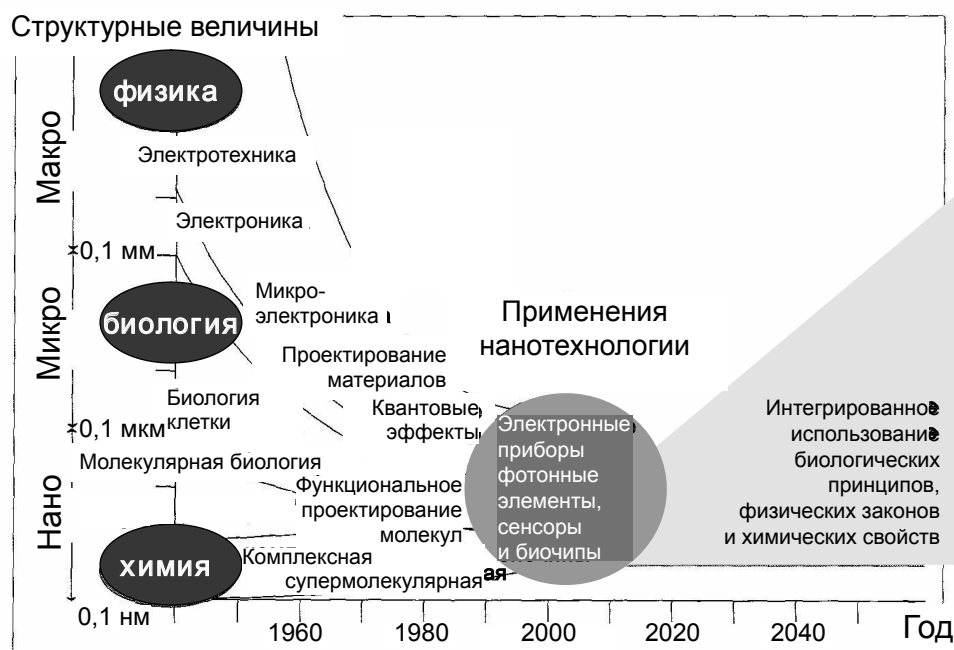
**Рис. 3.25.** Графическое представление проектирования супермолекулы [53, р. 206]

К такому пониманию приближаются прежде всего структуралистская и технологическая концепции научной теории. Согласно структуралистской концепции всякая теория состоит из ядра и множества предполагаемых приложений. Именно эта взаимосвязанная пара и образует главные элементы теории. Включение приложений, которые раньше выносились из классических учебников в пособия по решению задач, в само тело теории является весьма показательным для современной технотехники, где теорию вообще невозможно отделить от ее приложений. Причем приложения теории с точки зрения структуралистской модели включают в себя как подтвержденные, или актуальные, так и возможные, или потенциальные, приложения, частные потенциальные модели.

Одно из определений нанотехнологии, а именно так называемое «реальное» определение, просто перечисляет области ее уже существующих и возможных приложений: сканирующую микроскопию, исследование наночастиц, наноструктурированные материалы, полимеры и композиты, супрамолекулярную химию, молекулярную электронику, литографию для производства интегральных схем, микроэлектромеханические системы, биохимические сенсоры, молекулярную биотехнологию и др. [54, с. 219].

Таким образом, нанотехнология объединяет в себе все возникающие приложения нанонаук [53]. Молекулярная электроника, раннее распознавание раковых заболеваний на молекулярном уровне и лакокрасочные покрытия, способные менять цвет в зависимости от окружающей среды, отнесены экспертами к долгосрочной перспективе, а создание антиотражательных слоев, наномембран и наночастиц для автомобильных покрышек оценены готовыми к выпуску на рынок; на стадии технической реализации и создания прототипа находятся, например, на уровне наноструктур аккумуляция водорода, а на фазе применения и инноваций — рентгеновская оптика [56]. Причем раздельное поступательное развитие физики (электротех-

ника — электроника — микроэлектроника — проектирование материалов — квантовые эффекты), биологии (биология клетки — молекулярная биология — функциональное проектирование молекул) и химии (комплексная химия — сверхмолекулярная химия) в перспективе должно слиться в интегрированное использование биологических принципов, физических законов и химических свойств (рис. 3.26) [56]<sup>1</sup>.



**Рис. 3.26.** Общие тенденции развития нанотехнологии по годам

<sup>1</sup> Некоторые приложения нанотехнологии могут быть более-менее точно просчитаны. Например, углеродные нанотрубки «допускают множество возможных применений: от электродов батареек до электронных устройств и армирующих волокон для получения более прочных композитов... Однако для реализации этого потенциала необходимо разработать технологию крупномасштабного производства однослойных трубок. Существующие методы обеспечивают лишь небольшой выход конечного продукта, стоимость которого на сегодня составляет 1 500 \$ за грамм (680 000 \$ за фунт). С другой стороны, разработаны основанные на химическом осаждении методы крупномасштабного производства многослойных нанотрубок стоимостью 60 \$ за фунт, причем при увеличении спроса ожидается дальнейшее существенное падение этой цифры. Методы, используемые для увеличения масштабов производства многослойных нанотрубок, должны лечь в основу широкомасштабного производства и однослойных нанотрубок. Можно надеяться, что из-за их громадного потенциала использования будут разработаны технологии крупнотоннажного синтеза, что приведет к падению цен до цифр порядка 10 \$ за фунт» (курсив мой. — Прим. В.Г.) [55, с. 120].

Таким образом, понятие теории расширяется через особые операции специализации, образуя целостную теоретическую сеть. К.-У. Мулинес попытался проанализировать на основе структуралистской модели науки развитие равновесной термодинамики (термостатики), которую он рассматривает как не единичную теорию, а целостную группу, семейство (кластер) теорий, или «фрейм теорий», объединяющих целую группу теорий, построенных по единому парадигматическому образцу. Например, простая равновесная термодинамика является таким образцом для термодинамики в целом как семейства, кластера или фрейма термодинамических теорий. Можно указать также на фрейм теорий классической механики, фрейм теорий квантовой механики и т. д.<sup>1</sup>.

Сегодня сформировалось целое семейство дисциплин, получивших название «радиоэлектроника». Все они ориентированы на преобразованную радиотехникой фундаментальную теоретическую схему электродинамики. Физическая картина электромагнитных взаимодействий (колебаний, волн, полей) совмещается со структурным изображением радиотехнических систем, в которых эти физические процессы протекают и искусственно поддерживаются.

Таким образом, она преобразуется в картину области функционирования технических систем определенного типа. С одной стороны, она является результатом развития и конкретизации фундаментальной теоретической схемы базовой естественнонаучной теории к области функционирования технических систем, например к диапазону практически используемых радиоволн как разновидности электромагнитных колебаний. С другой стороны, эта схема формируется в процессе систематизации и обобщения различных частных теоретических описаний конструкции данных технических систем, группирующихся вокруг отдельных идеализированных конструктивных элементов этих систем, осознания общности их структуры и включает в себя классификационную схему потенциально возможных технических систем данного типа и режимов их функционирования.

Именно такой кластер теорий представляет собой нанотехнология — наиболее яркий представитель современной технонауки. Объединяет все эти часто разнородные теории ориентация на общую

---

<sup>1</sup> См.: Probabilistic Thinking, Thermodynamics and the Interaction of the History and Philosophy of Science. Proceedings of the 1978 Pisa Conference on the History and Philosophy of Science. Vol. II. Dordrecht: Reidel, 1981, p. 211–237; *Moulines C.-U.* Zur logischen Rekonstruktion der Thermodynamik. Eine wissenschaftliche Analyse. Inaugural-Dissertation zur Erhaltung des Doktorgrades. München: Ludwig-Maximilian-Universität, 1975.

картину мира — «наноонтологию». В наиболее распространенном определении нанотехнологии утверждается прежде всего, что она представляет собой «исследование и манипуляцию материальными объектами в области 1–100-нанометровой шкалы с целью изучения новых свойств и разработки новых устройств» [54, р. 218–219]. Нанообъекты, таким образом, идентифицируются лишь по их предельно общим онтологическим свойствам — конкретным размерам, причем безотносительно к их природе.

«Нанотехнология является понятием, объединяющим целую палитру технологий, которые общим имеют прежде всего то, что все они связаны со структурами и процессами нанометрической шкалы... Один нанометр — одна миллиардная часть метра ( $10^{-9}$  м) — обозначает ту пограничную область, в которой материальные взаимодействия не могут быть более описаны законами классической физики, а все большую роль начинают играть квантово-механические эффекты... Нанотехнология обозначает целенаправленное создание и/или манипулирование отдельными микроструктурами» [56, s. 27]. Здесь также вполне определенно подчеркивается проектная направленность нанонауки, неотделимой даже концептуально от нанотехнологии, т. е. фактически от технической теории.

За последние десятилетия и в сфере научно-технических дисциплин произошли, однако, существенные изменения, позволяющие говорить о становлении качественно нового неклассического этапа их развития. Этот этап характеризуется новыми формами организации знаний, направленными на повышение эффективности и результативности научной деятельности, более жесткой ориентацией на решение самых разнообразных практических (в том числе инженерных) задач, для чего требуется привлечение специалистов самых разнообразных отраслей науки и практики.

В то же время инженерные методы, проектные установки и методические приемы работы проникают в сферу науки, преобразуя традиционные нормы и идеалы научного исследования. К такого рода новым неклассическим научно-техническим дисциплинам можно отнести, например, кибернетику, системотехнику, системный анализ и т. д. Развиваясь нестандартным путем, неклассические научно-технические дисциплины отличаются от классических технических наук тем, что в последних теория строилась под влиянием определенной базовой естественнонаучной дисциплины и именно из нее заимствовались первоначально теоретические средства и образцы научной деятельности. Многие же современные научно-технические дисциплины не имеют такой единственной базовой теории, поскольку

ориентированы на решение комплексных научно-технических задач, требующих участия представителей самых разнообразных научных дисциплин (математических, технических, естественных и даже общественных наук), группирующихся относительно одной проблемной области. В то же время в них разрабатываются новые специфические методы и собственные средства, которых нет ни в одной из синтезируемых дисциплин и которые специально приспособлены для решения данной комплексной научно-технической проблемы.

К таким дисциплинам относится и нанотехнология: «этим полем деятельности занимается множество разных отраслей знаний. Работы по нанотехнологии можно найти как на университетских отделениях физики, химии, экологии, так и на отделениях инженерных дисциплин, таких как электротехника, механика, химическая технология» [55, с. 21]. Все эти описания объединяет, однако, общая устремленная в будущее цель. Именно это устремление подчеркивается в «телеологическом» определении нанотехнологии: она должна в будущем обеспечить здоровье людям, благосостояние обществу и безопасность государств и правительств, причем быстрее, точнее, прочнее и в меньших размерах, радикально изменив все — от промышленного производства до психических и социальных условий жизни [54, р. 219].

Наносистемотехника, как и макросистемотехника, включает в себя не только системное проектирование, но и комплексное исследование. Проектная установка, однако, оказывает влияние на изменение приоритетов такого комплексного исследования, способствует формированию отношения к научному знанию не только как к знанию о чем-то, но и как к средству деятельности: «главным видением нанотехнологии с самого начала была целенаправленная манипуляция материей на атомарном уровне» [56, s. 1, 25]. При этом в объяснении наноявлений часто с легкостью перескакивают от одной теории и частной научной картины мира к другой. Например, электрон в одном случае рассматривается как сферический или точечный «заряд, вращающийся вокруг некоей оси», в другом — как «облако электронного заряда между двумя связанными атомами, как клей, сцепляющий эти атомы», в третьем — «электроны в нанотрубке не являются сильно локализованными, а размазаны на большом расстоянии вдоль трубки», а в четвертом — они, как в квантовой теории, представляются в виде волны: «Если длина волны электрона не укладывается целое число раз на длине окружности трубки, она интерферирует сама с собой с погашением, так что разрешены только такие длины волн электронов, которые укладываются целое число раз на периметре трубки» [55, с. 90, 103, 116].

И. Хакинг и Р. Гири развивают технологический подход к пониманию научной теории [57, 58], который в известном смысле соответствует характеру нанотехнологических исследований. «Гири рассматривает теорию как семейство моделей или даже семейство семейств моделей, которые могут быть соотнесены с реальностью опосредованно... Реальная система определяется как подобная одной из этих моделей... При связывании теоретических моделей и представляемых ими реальных систем решающую роль начинает играть *техника*.

Подобно Хакингу Гири видит конструктивный реализм в проверке реальности в успешно организованных технологиях, в сущностях, которые можно, так сказать, ощутить руками и которые раньше имели статус чисто теоретических сущностей (таких, например, как электрон), если они применяются для того, чтобы охватить и охарактеризовать новые модели или другие теоретические сущности. (Если, например, электронное излучение успешно применяется в электронном микроскопе, чтобы решать иного рода научные задачи, то в этом технологическом смысле первоначально теоретически постулированные электроны теперь выступают как научно-технические *реальные* сущности.) Если электроны и протоны теперь полностью освоены и применяются в сложных технических измерительных инструментах для того, чтобы доказать существование других элементарных частиц и структур, как, например, кварков, тогда они являются действительно “реальными”. Таким образом, то, что мы сегодня изучаем, воплощается в исследовательских инструментах будущего» [59, с. 164–165]<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Именно таким доказательством реальности квантовых точек (КТ) может быть их использование в качестве пассивных меток в других экспериментах. «Под действием света происходит возбуждение коллоидальных КТ и генерация электронно-дырочных пар, во время рекомбинации которых испускается флуоресцентное свечение. Из-за малых размеров КТ квантовые эффекты играют в них очень важную роль, это приводит к зависимости длины волны флуоресценции от размера КТ. Уменьшение размеров частицы приводит к смещению флуоресцентного излучения в фиолетовую область. Таким образом, КТ различных размеров дают весь спектр видимого и инфракрасного диапазона... При исследованиях по принципу пассивных меток определенные рецепторные молекулы, такие как антитела, присоединяют к поверхности КТ. На первом шаге антитела захватываются поверхностью, к которой добавляется аналит. На втором шаге помеченные КТ антитела используются для визуальной и количественной оценки связанного аналита. Это позволяет осуществлять иммунологические исследования. ... В настоящее время синтез квантовых точек в органических растворителях хорошо налажен, так что возможно варьировать размер, форму и даже состав КТ» (<http://www.nanometer.ru/2007/05/05/117837865319.html>).

В нанонауке такие теоретические сущности, как квантовые точки, используются биологами для экспериментальных целей, что технологически подтверждает их реальность. Атомы, объединяясь в гетероструктуру, продолжают жить по законам квантовой физики. Такие гетероструктуры и называют «квантовыми точками». «Своими свойствами они напоминают атомы — *“искусственные атомы”*», имеющие наноразмеры. Ведь электроны в атомах, переходя с одной орбиты на другую, тоже излучают квант света строго определенной частоты. Но в отличие от настоящих атомов, внутреннюю структуру которых и спектр излучения мы изменить не можем, параметры квантовых точек зависят от нас... Оказалось, что длина волны, излучаемая квантовой точкой, пропорциональна ее размеру. Чем больше размер квантовой точки, тем меньшую частоту она излучает... Таким образом, если сделать по одинаковой технологии квантовые точки разных размеров и, сделав взвесь, поместить их в разные пробирки, то эти пробирки будут светиться разным светом...

*Квантовые точки уже сейчас являются удобным инструментом для биологов, пытающихся разглядеть различные структуры внутри клеток.* Дело в том, что различные клеточные структуры одинаково прозрачны и не окрашены. Поэтому, если смотреть на клетку в микроскоп, то ничего, кроме ее краев, и не увидишь. Чтобы сделать заметной определенную структуру клетки, биологи попросили физиков “пришить” к квантовым точкам молекулы, которые прилипали именно к данной внутриклеточной структуре...

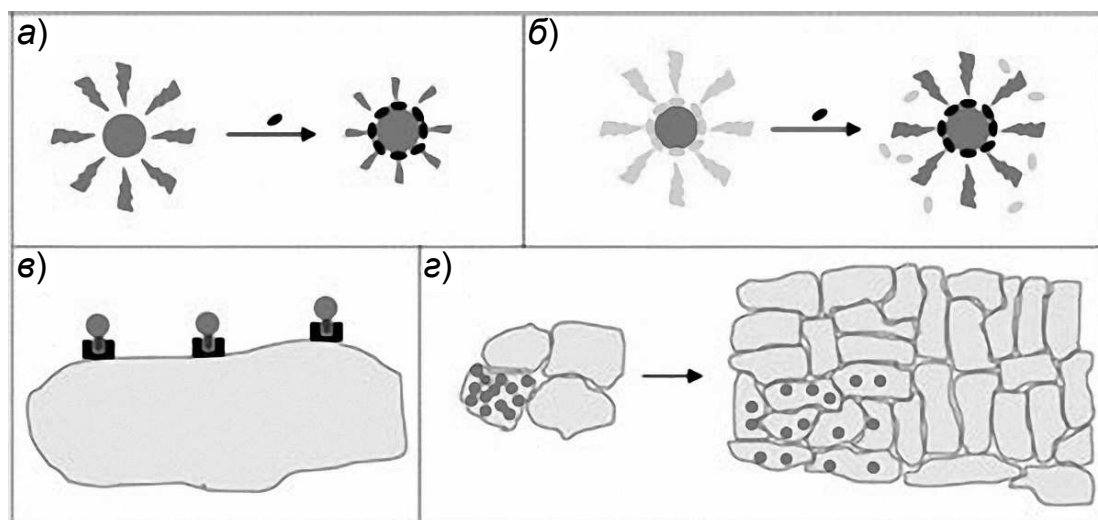
Были сделаны квантовые точки трех размеров. К самым маленьким, светящимся зеленым светом, приклеили молекулы, способные прилипать к микротрубочкам, составляющим внутренний скелет клетки. Средние по размеру квантовые точки могли прилипать к мембранам аппарата Гольджи, а самые крупные — к ядру клетки. Когда клетку окунули в раствор, содержащий все эти квантовые точки, и подержали в нем некоторое время, то они проникли внутрь и прилипли туда, куда могли. После этого клетку сполоснули в растворе, не содержащем квантовых точек, и положили под микроскоп. Как и следовало было ожидать, вышеупомянутые клеточные структуры стали разноцветными и хорошо заметными» (курсив мой. — *Прим. В.Г.; рис. 3.27*)<sup>1</sup>.

В нанотехнонауке можно перескакивать от одной специализированной картины мира к другой, например от биологической к физической, а затем к химической онтологии, от одной теоретической схемы к другой, не обращая внимания на то, что они принадлежат

---

<sup>1</sup> См.: Богданов К. Квантовые точки — рукотворные атомы наноразмеров. — <http://kbogdanov1.narod.ru/nanotechnology/QD.htm>

различным научным теориям. Например, «группа исследователей из Японии подтвердила осуществимость использования искусственно синтезированных ДНК, снабженных протеиновым мотором, действующим на основе химической энергии, в качестве систем доставки определенных молекул. Этот принцип является типичным для работы мускулов и нервных клеток, которые способны автономно двигаться за счет преобразования химической энергии в механическую работу» [60]. Предполагается, что искусственная молекулярная транспортная система на основе мобильности микротрубочек станет альтернативой передвижению с помощью давления и электрокинетического устройства. В данном случае комбинируются механическая, химическая и биологическая онтологические схемы.



**Рис. 3.27.** Доказательством реальности квантовых точек может быть их использование в качестве пассивных меток в других экспериментах<sup>1</sup>

Почти на одной и той же странице нанотехнологи перескакивают от одной физической картины мира к другой, которая ранее в истории науки рассматривалась как альтернативная первой. Электрон часто представляется не в виде локализованного в пространстве сферического тела, а как оболочка, растекающаяся по различным орбитам внутри атома. Например, в электронной силовой микроскопии можно получить картинку электронной оболочки внутри атома или электронного облака, вращающегося вокруг атома, как это сделали в университете г. Аугсбурга в Германии (рис. 3.28)<sup>2</sup>. Однако тут же говорится о единичном электроне, двигающемся в потоке электронного луча, испускаемого электронной пушкой, или вдоль проволоки в электронной цепи либо вращающемся вокруг ядра в атоме, облада-

<sup>1</sup> <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=1650.php>

<sup>2</sup> См.: Nanotechnology Innovation for Tomorrow's World. European Communities, 2004.



ющего спином, либо перескакивающим через туннельный переход. А с точки зрения квантовой теории он одновременно рассматривается как волна.



**Рис. 3.28.** «Картинка» электронной оболочки атома, полученная с помощью сканирующего атомного силового микроскопа<sup>1</sup>

Такие теоретические комбинации могут приводить к важным техническим применениям: например, появилась возможность исследовать «ранее недоступные комбинации квантовых структур и магнетизма в полупроводниках», что открыло «новую область полупроводниковой физики и техники» [61, р. 110, 129].

«С развитием нанотехнологии были исследованы различные молекулы — от простых атомов до таких сложных структур, как графены и углеродные нанотрубки, с целью определения возможности их использования как молекулярных устройств» [62, р. 111, 112]. На рис. 3.29 схематически представлены две различные специальные картины реальности — с точки зрения классической электроники и квантовой электроники, которые помогают описать и понять принцип действия одного и того же природно-технического феномена.

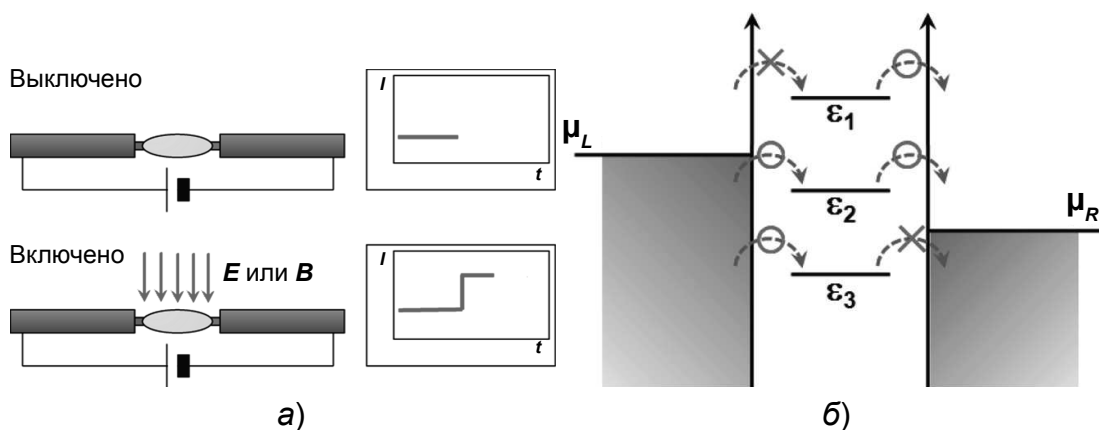
Однако переход на наноуровень, его срединное положение между макро- и микропроцессами порождают и новые проблемы, ранее неизвестные в классической электронике и требующие обращения за их разъяснением к неклассической физике.

Созданный учеными Токийского технологического института «наноамперметр» для обнаружения единичного электрона, с одной стороны, аналогичен классическому амперметру, а с другой — сталкивается с иными закономерностями микромира. «При слежении за отдельным электроном он может поглотиться самим измеряющим устройством. Электрон также может отразиться от приемника и поступить обратно в устройство, из которого он вышел». Чтобы избежать этого, было создано «устройство из двух последовательно соединенных квантовых точек, связанных, с одной стороны, с источником, а с другой — с приемником электронов. Благодаря “трех-

<sup>1</sup> Там же, р. 15.

мерной” структуре квантовых точек можно наблюдать, рассеиваются электроны или нет... Благодаря свойствам квантовых точек в амперметре электроны путешествуют с помощью механизма туннельного эффекта от одной квантовой точки к другой... Действенность устройства была доказана измерениями, проводимыми в одноэлектронном транзисторе» [63, с. 112–113].

Этот прибор, по мнению его создателей, поможет глубже изучить транспорт электронов в биологических наноструктурах и пригодится в нанoeлектронике. Интересно, что он может одновременно следить за отдельным электроном (что относится к сфере микрофизики и микроэлектроники) и в определенных пределах измерять с высокой точностью протекающий через него ток. А это уже уровень классической физики и классической теории электрических цепей [63].



**Рис. 3.29.** Схематическое изображение молекулярного переключающего устройства (а), управляемого внешним электрическим ( $E$ ) или магнитным ( $B$ ) полями, и схема энергетических уровней молекулы с контактами (б);  $\epsilon_1, \epsilon_2$ , и  $\epsilon_3$  — молекулярные энергетические уровни,  $\mu_L$  и  $\mu_R$  — химические потенциалы левого и правого электродов [62]

В нанотехнологии активно используются кибернетическая терминология и онтология: например, «тонкая структура края поглощения *дает информацию* о состоянии связей рассматриваемого атома; микроволны могут *нести полезную информацию* о материале; в образце, состоящем из наночастиц, площадь поверхности много больше, а размеры частиц — порядка глубины проникновения, что делает возможным *регистрировать сигнал от электронов проводимости*» (курсив мой. — Прим. В.Г.).

Как видим, совсем так же, как в теории информации и кибернетике, даже электрон посылает сигнал исследователю, передавая полезную информацию о себе самом и своем поведении. Остается еще только отделить сигнал от шума, как это делается в спектроскопии на основе магнитного резонанса (исследование микроволновых

и радиочастотных переходов), представляющего информацию о наноструктурах [65, с. 60, 74–77, 83].

Впрочем, точно так же Л.И. Мандельштам применял радиотехническую терминологию для описания комбинационного рассеяния света, обусловленного молекулярными колебаниями, как своего рода модуляции, когда молекула как бы сама говорит о себе. «Спектр рассеянного света в своих существенных частях воспроизводит спектр модулированного телефонного радиопередатчика... Мы здесь, говоря несколько схематично, действительно имеем нечто иное, как модуляцию падающей волны собственными колебаниями молекулы и молекулярных агрегатов. И тогда совершенно ясно, что так же, как спектр телефонного передатчика несет в себе весь ваш разговор, все, что вы хотите сказать, так и спектр рассеянного света несет то, что молекула говорит о себе. Изучая его, вы изучаете свойство молекулы, вы изучаете ее строение». Один из учеников Мандельштама Г.С. Горелик выразил эту мысль еще более приближенно к нанотехнологической терминологии: «В спектре комбинационного рассеяния “говорят” колебания атомов, а в линейчатом спектре, испускаемом разряженным газом, “говорит” электронная оболочка атома» [64, с. 175–176].

В нанотехнонауке говорится также о «молекулярной коммуникации», биохимических коммуникационных системах, использующих коммуникацию от клетки к клетке. Это уже описание в рамках кибернетической онтологии, даваемое с точки зрения теории коммуникаций, — «новая коммуникационная парадигма, в которой молекулы используются в качестве средств передачи информации» (рис. 3.30) [60].

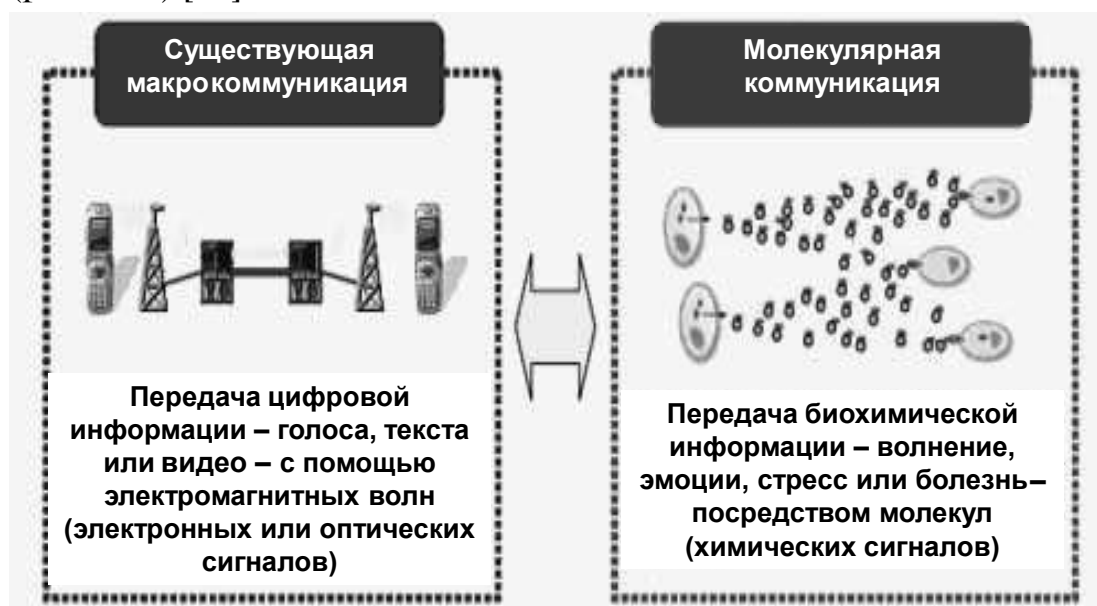


Рис. 3.30. Схематическое изображение молекулярной коммуникации [60]

Такие «прыжки» от одной теоретической схемы к другой, от одной дисциплинарной картины мира к иной возможны только потому, что нанотехнонаука ориентируется на абстрактное представление гибридных наносистем. Причем в нанотехнонауке используются теоретические конструкты различных научных теорий: классической и квантовой физики, классической и квантовой химии, а также структурной биологии и т. д., поскольку в наносистемах реализуются физические, химические и даже биологические процессы.

Сам объект комплексного нанотехнологического исследования дан первоначально лишь в виде компьютерной имитационной модели, воспроизводящей в той или иной форме функционирование будущей системы, т. е. замысел проектировщика. Система еще не создана, а только еще проектируется, но в начале всякого проектирования мы должны уже исследовать эту систему путем анализа на имитационной модели, а не только обследовать то место, куда она будет «вставлена» после изготовления. Поэтому объект комплексного исследования и системного проектирования дан первоначально лишь в этой имитационной модели.

Научное исследование всегда сопровождается компьютерной симуляцией, и то, что мы видим на экране дисплея, уже опосредовано определенной теорией, на основе которой построена данная приборная ситуация, и ее математическими представлениями, зашитыми в программе имитационного моделирования. *Наносистемная* же картина мира, или *наносистемная онтология*, выполняет функцию методологического ориентира в выборе теоретических средств и методов решения комплексных научно-технических задач, дает возможность транслировать их из смежных дисциплин или методологической сферы. Она является также методологическим ориентиром для конструирования сложных идеальных нанообъектов, их последующего имитационного моделирования и интерпретации, т. е. позволяет экстраполировать накопленный в данной дисциплине опыт на будущие проектные ситуации.

### **3.5.3. Наносистемная онтология как научная картина мира и регулятив технического действия**

Все, что мы воспринимаем, является не действительной реальностью, а лишь явлением или кажимостью. Кант обсуждает именно эту проблематику, когда рассуждает о «вещах в себе» или самих по себе,

которые располагаются «за» или «позади» наблюдаемых нами явлений. Именно поэтому для того, что «реально само по себе», следовало бы применять иное понятие действительности, чем то, которое мы используем для обозначения нашей повседневной реальности. В действительности существуют атомы — далее неразложимые частицы и ничто, — должны мы провозгласить вслед за Демокритом, или квантовые точки, проволоки, ямы и т. д. — повторяем мы вслед за современными нанотехнологами.

Таким образом, именно научная картина мира выступает в этом случае репрезентантом действительной реальности, во что верили классические ученые-естествоиспытатели, в отличие от открытой нам, как обыкновенным людям, повседневной действительности. Однако сегодня уже никто из серьезных ученых не утверждает, что, например, современная физика может дать нам готовую на все случаи жизни и времена картину мира. «Явления субатомного мира настолько сложны, — пишет Ф. Капра, — что, несомненно, невозможно сконструировать полную правильную теорию, которая бы была всеми принята; однако можно положиться на ряд частично успешных моделей, которые представляют небольшой радиус действия... Необходимо, двигаясь по шагам, формулировать сеть взаимосвязанных идей и моделей... И ни какая из этих теорий и моделей не должна быть важнее других и все они должны резонировать между собой...» [65, s. 102–103]. Или, как утверждает Х. Ленк, «кратко и точно можно, вероятно, сказать: мы представляем себе тот мир реальным, который мы подчиняем себе как реальный: “мир реален”, но каждое схватывание его или его частей или сущностей в нем является всегда выраженным с точки зрения перспектив, т. е. является “интерпретативным”, схематизированным, “теоретически пропитанным”...» [64–68].

Таким образом, с одной стороны, мы должны развести социокультурно структурированную реальность, с которой имеет дело нормальный человек в данном обществе, и научную картину мира, создаваемую и навязываемую обществу учеными через систему научного образования. Познав ее в школе и скорректировав через средства массовой информации и научно-популярную литературу, мы верим в ее истинность, как древние верили мифам. Об этом очень хорошо написал Томас Кун в своей первой и почти неизвестной российскому читателю книге «Коперниканская революция»: «Готовность ученого основывать свое объяснение на определенной научной картине мира является указанием на его связь именно с этой картиной мира; знаком его веры, что его картина мира является единственно вер-

ной. Такая привязка или такая вера является, однако, рискованной, поскольку упрощенное описание и космологическая удовлетворенность ни в коей мере не может гарантировать того, что также всегда обозначается как “истина”.

*История науки пестрит бесконечным числом реликтов представлений, в которые сначала горячо верят, а потом заменяют совершенно новой теорией.* Нет возможности доказать, что какая-либо теория является окончательной. Однако является ли это риском или нет? Можно утверждать, что *эта привязка к определенной картине мира является общим и, возможно, неустранимым феноменом*, что придает картине мира новую и важную функцию. Картины мира являются универсальными, их следствия не ограничиваются уже известным...

Двухшаровый универсум информировал ученого об отношениях солнца и звезд в таких частях мира, как южное полушарие и полярные регионы, которые он никогда не посещал. Дополнительно он информировал о движении звезд, которые он еще не наблюдал систематически... Это — *новые знания, которые первоначально были получены не из наблюдений, а непосредственно из картины мира...* Это давало Колумбу основания верить, что кругосветное путешествие возможно. Никакие путешествия не были бы предприняты и никакие наблюдения не были бы сделаны, если бы картина мира не указала путь... Путешествие Колумба — это лишь один из примеров продуктивности научной картины мира. *Они, как и теории, ведут ученого в область неизвестного и говорят ему, на что он должен обратить внимание и что ожидается ему открыть»* [69, с. 40–41]. И с этой точки зрения неважно, как, собственно говоря, выглядит действительная реальность. Важно лишь то, что ученый с ее помощью может правильно заранее спланировать и реализовать свою деятельность и получить желаемые результаты.

Предельно общие представления о наносистемах и наноструктурах, по сути дела, представляют собой нанокартину мира — наноонтологию, как некоторое время прежде выдвигалась на передний край науки системная картина мира и системная онтология, — некоторую «универсальную» для данного класса исследуемых и проектируемых объектов теоретическую схему. Эти теоретические схемы «имеют две неразрывно связанные между собой стороны: 1) они выступают как особая модель экспериментально-измерительной практики» и, добавим, проект основанного на этой модели технического действия; «2) одновременно служат системным изображением предмета исследования, выражением сущностной связи исследуемой реальности» [70, с. 163].

Кант, совершенно в духе нанотехнологии, ставит на первое место синтез: «мы ничего не можем представить себе связанным в объекте, что прежде не связали сами», что является деятельностью рассудка [71, с. 201], в отличие, например, от Кондильяка, который считал, что «только анализ определяет идеи, и мы очень далеки от точных идей, когда мы знакомы лишь с употреблением синтетических определений» и «понять какую-нибудь вещь можно по-настоящему, лишь когда умеешь произвести анализ ее», поэтому синтез «приписывает идеям происхождение, совершенно отличное от того, которое они имеют в действительности» [72, с. 177–182].

В нанотехнологии, напротив, именно синтез наноструктуры позволяет понять и объяснить ее функционирование в природе и во всем в духе Канта: «где рассудок ничего раньше не связал, ему нечего и разлагать» [71, с. 201]. Именно сконструированные априори модели нанотехнологического действия позволяют найти соответствующие им «операции природы», а не наоборот, как утверждал Кондильяк. Теоретическая модель или схема наноструктуры и нанопроцедуры ее создания и одновременно исследования «есть продукт способности воображения». «Они суть как бы *монограммы*, представляющие собой лишь отдельные, хотя и не определимые никакими правилами черты, которые составляют скорее как бы смутное изображение различных данных опыта, чем определенную картину...» [71, с. 261, 739]. Таким образом, для теоретических схем, как считает Х. Ленк, характерна конструктивная или «созерцательно конструируемая» интеграционная стратегия, обеспечивающая новый подход к природе. Именно такой подход характерен для современной техники.

По сути дела, нанонаука имеет дело с вещами в себе, находящимися «за» явлениями или на поверхности явлений, давая совершенно иное представление о действительности, чем повседневная реальность. Но для Канта, подчеркивает Х. Ленк, «вещь в себе» вводится не онтологически, а в теоретико-познавательном плане как «познание, занимающееся вообще не столько предметами, сколько видами нашего познания предметов». «Когда я говорю, — пишет Кант — что созерцание внешних объектов... представляет нам эти объекты так, как они действуют на наши чувства, я этим вовсе не хочу сказать, будто эти предметы суть лишь *видимость*. Ибо в явлении объекты и даже свойства, которые мы им приписываем, всегда рассматриваются как нечто действительно данное, но поскольку эти свойства зависят только от способа созерцания субъекта в отношении к нему данного предмета, то мы отличаем этот предмет *как явление* от того же предмета как объекта самого по себе» [68, с. 79, 131].

В нанонауке сплошь и рядом описывается эмпирический объект (например, данные, представленные с помощью спектрального анализа, просвечивания образцов лазерным лучом или измерения разности потенциалов между сканируемой поверхностью образца и иглой сканирующего устройства и т.д.) на основе его априорного схематического пространственно-временного представления. Сами же эти исходные измерительные данные часто вообще не дают никакого представления о схематизме открывающегося исследователю лишь на основе косвенных данных объекта («вещи в себе»). Затем с помощью той же априорной схемы, частично скорректированной на базе ряда альтернативных экспериментально-измерительных процедур, строится проектная деятельность и, если она является успешной, т.е. позволяющей получить новые материалы или новые заранее заданные (а часто только предполагаемые и иногда даже неожиданные) их свойства, то данная теоретическая схема рассматривается как репрезентант существующей лишь в воображении «вещи в себе» и объект оперирования.

Нанонаука, акцентируя внимание на поверхности исследуемых объектов, которую мы в первую очередь и воспринимаем нашими органами чувств, фактически изучает пограничную сферу между кантовскими «вещами в себе» и «вещами для нас». Нанотехнология, в свою очередь, направлена на целенаправленное изменение поверхностного слоя предметов с помощью внедрения в тонкие структуры вещества на границе макро- и микрообъектов. Именно этот аспект исследования и взгляд на мир ускользали ранее от внимания ученых.

Предельно общие представления о наносистемах и наноструктурах, по сути дела, представляют собой нанокартину мира — нано-онтологию, некоторую универсальную для данного класса исследуемых и проектируемых объектов теоретическую схему. Эти теоретические схемы «имеют две неразрывно связанные между собой стороны: 1) они выступают как особая модель экспериментально-измерительной практики; 2) одновременно служат системным изображением предмета исследования, выражением сущностной связи исследуемой реальности» [70]. Рассмотрим различные аспекты наносистемной картины мира и ее особенности.

**Естественное — искусственное.** Обычно считается, что ученый-естествоиспытатель имеет дело только с миром природного, естественного, а инженер — с миром технического, искусственного. Однако возникновение экспериментального естествознания было тесно связано с «миром искусственного», искусственной, технической переработкой природных явлений и процессов, с исследо-



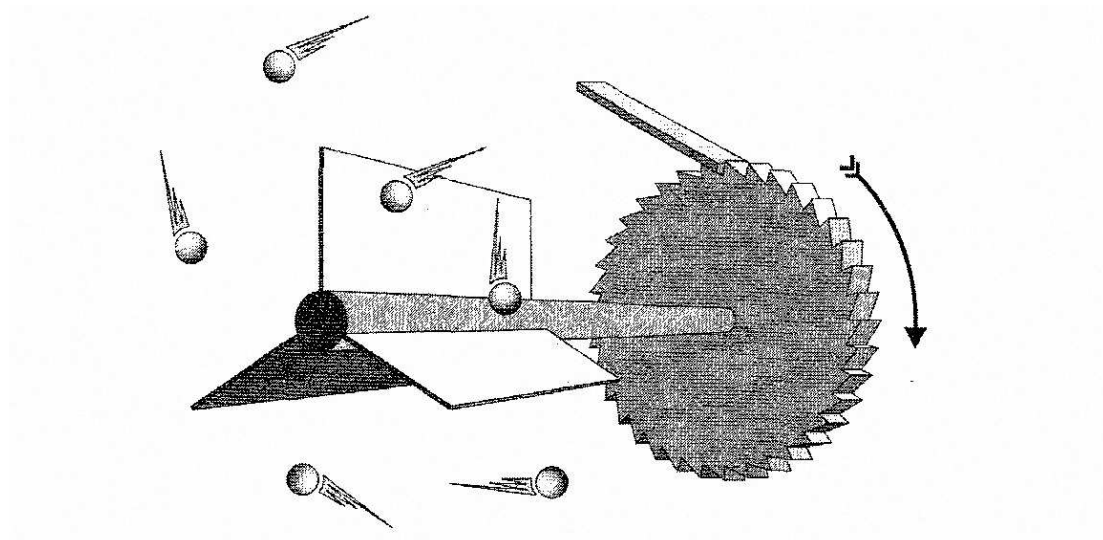
ванием и развитием мира «механических искусств». «В результате действительной почвой физического эксперимента становится “естественная техника”, или же, иными словами “механическая природа”» [73, с. 217]. Да и сами природные процессы часто осмысливаются в новой науке как рукотворные, искусственные, природа — как «инженер», искусственно создающий природные, а значит, естественные объекты. Задача ученого — раскрыть ее «хитрости», постичь то, что ею уже сделано. Таким образом, и в экспериментальном естествознании, и в инженерной деятельности устанавливаются определенные взаимосвязи между миром природного и миром искусственного.

Понятия «естественного» и «искусственного» были развиты еще в античной философии. Уже Платон различает существующее «по природе» (то, что от природы) и «по закону» (то, что приобретается старанием, упражнением, обучением, что принуждает ко многому, что противно природе), т. е. благодаря природной способности (врожденное) с помощью искусства, от учения возникшее (искусное) [74, с. 89, 138—148, 206, 223]. Аристотель различал «естественное», происходящее согласно природе, «вероятное» и «случайное». В этом случае естественное противопоставляется допустимому. Естественное — то, причина чего заключена в самой вещи, что происходит по определенному закону, либо всегда, либо по большей части [75, с. 78]. Однако естественное противопоставляется Аристотелем насильственному, неестественному. Но он также различает существующее по природе, возникающее от природы и путем искусства, образованное искусством [76, с. 82].

В Новое время в связи со становлением экспериментального естествознания проблема соотношения естественного и искусственного переосмысливается. Для Декарта всякое различие между естественным и искусственным с необходимостью исчезает, поскольку мир, природа трактуются им как машина. «Между машинами, сделанными руками мастеров, и различными телами, созданными одной природой, я нашел только ту разницу, что действия механизмов зависят исключительно от устройства различных трубок, пружин и иного рода инструментов, которые, находясь по необходимости в известном соответствии с изготовившими их руками, всегда настолько велики, что их фигура и движение легко могут быть видимы, тогда как, напротив, *трубки или пружины, вызывающие действия природных вещей, обычно бывают столь малы, что ускользают от наших чувств*. И ведь несомненно, что в механике нет правил, которые не принадлежали бы физике (частью или видом которой является механика); поэтому

все искусственные предметы — вместе с тем предметы естественные. Так, например, часам не менее естественно показывать время с помощью тех или иных колесиков, из которых они составлены, чем дереву, выросшему из тех или иных семян, приносить известные плоды» (курсив мой. — *Прим. В.Г.*) [77, с. 539–540].

Такое понимание «естественного» и «искусственного» прямо противоположно аристотелевскому представлению, согласно которому природное противопоставлялось созданному человеком, а физика — механике как искусству, а не науке. По Декарту, механика является частью физики, изучающей «трубы и пружины, вызывающие действия природных вещей» [78, с. 169]. Так же и в нанотехнологии речь идет о наноструктурах, которые столь малы, что ускользают от наших чувств, о тончайших нанотрубках, об исчезающе малых наномашинах (рис 3.31) и т. д. Например, «актуаторы — это устройства, преобразующие электрическую энергию в механическую, или наоборот» [55, с. 297].



**Рис. 3.31.** Молекулярная модель Pawl-машины, состоящей из лопаток, помещенных в термальную ванну газовых молекул, и зубчатого колеса, которое может поворачиваться только в одном направлении. Молекулы газа могут лишь случайным образом бомбардировать лопатки, чтобы они двигались [53, р. 105]

Главное достижение Галилея в решении этой проблемы состоит не столько в разграничении, сколько в соотнесении этих двух понятий, установлении их взаимопереходов. В отличие Аристотеля, он рассматривает естественное движение в искусственных условиях, в идеализированном искусственным путем эксперименте. Прямолинейного движения не существует в природе; оно является результатом идеализации, искусственного воспроизведения естественного явления

за счет устранения побочных влияний (воздействия внешних сил). Говоря, например, о плавающих телах, он пишет: «Понять причину этого явления... очень легко, поскольку мы имеем явную их аналогию в любом искусственно приготовленном нами сосуде, в котором мы увидим естественно происходящими эти явления...» [79, т. 2, с. 527].

До Галилея научное исследование по античному образцу мыслилось как получение знаний об объекте, который всегда рассматривался как неизменный. Никому не приходило в голову практически изменять изучаемый реальный объект (в этом случае он мыслился бы как другой объект)<sup>1</sup>. Описывая, например, опыты с телами, пребывающими и движущимися в воде, Галилей подчеркивает, что для проведения точного опыта нужно взять вещество, которому можно легко придать различную форму: «Кто хочет произвести подобный опыт с... удобным материалом, легко принимающим любую форму, может взять чистого воска и сделать из него шарик или другую плотную фигуру и затем прибавить к воску свинца в таком количестве, чтобы эти фигуры с трудом тонули, т. е. чтобы свинца на одно зернышко было бы уже недостаточно для их погружения. Придав тому же воску форму сосуда и наполнив его водой, найдем, что без свинца он не пойдет ко дну, а со свинцом опустится с медленностью; в общем налитая вода не внесет никакого изменения» [Там же, с. 56–66].

Такие же взаимопереходы естественного в искусственное и обратно можно обнаружить во многих рассуждениях по нанотехнологии: «Дискретный спектр энергетических состояний в таких кластерах подобен энергетическому спектру отдельных атомов, что позволяет говорить об “искусственных атомах”, несмотря на большое количество атомов в кластерах (островках)» [80, с. 606].

Точно так же говорят об искусственно созданных молекулах. До 1964 г. считалось, что в углеводородах невозможны никакие углы связей, кроме алмаза, состоящего из атомов углерода, тетраэдрически связанных друг с другом, и графита, имеющего слоистую структуру, каждый слой которой образован шестиугольниками из атомов углерода. «В 1964 году Фил Итон из Чикагского университета синтезировал квадратную молекулу..., названную кубаном. В 1983 году Л. Паллет из университета Огайо синтезировал молекулу... додэкаэдрической формы... Синтез этих углеводородных молекул с углами,

---

<sup>1</sup> Античные и средневековые ученые, напротив, старались усовершенствовать теоретическую модель, чтобы она полностью описывала поведение реального объекта (см.: *Розин В.М.* Опыт изучения научного творчества Галилео Галилея // Вопросы философии. 1981. № 5).

отличными от стандартных углов гибридизации,... был важным шагом на пути создания углеродных наноструктур, также требующих различных углов между связями» [55, с. 104–105].

Такая двойственная ориентация нанотехнологии, с одной стороны, на научные исследования естественных, природных явлений, а с другой — на производство, воспроизведение замысла искусственным путем заставляет взглянуть на свое «изделие» одновременно как на природный объект, который выступает как «естественно-искусственная» система. С одной стороны, наносистема представляет собой явление природы, которое подчиняется естественным законам, а с другой — то, что необходимо искусственно создать: сначала определить материальные условия и искусственные средства, влияющие на природу в нужном направлении, заставляющие ее функционировать так, как это нужно для человека, и лишь потом на основе полученных знаний задать требования к этим условиям и средствам, а также указать способы и последовательность их обеспечения и изготовления. В свою очередь искусственно созданные в эксперименте ситуации сами должны быть представлены и описаны в научном плане как определенные естественные процессы. Однако в классическом естественнонаучном эксперименте главный акцент все же должен делаться на естественной позиции, а в традиционной инженерной деятельности он ставится на искусственной позиции, поскольку основная цель эксперимента в классическом естествознании — подкрепить, обосновать с помощью искусственных средств теоретически выведенные естественные законы. Цель же традиционной инженерной деятельности, учитывая эти законы, — создать искусственные технические средства и системы для удовлетворения определенных человеческих потребностей. В нанотехнологии эти позиции настолько переплетаются, что нанотехнологический эксперимент становится одновременно и средством проектирования наносистем.

С точки зрения системного подхода любая система может быть описана и как естественная, и как искусственная. Система с естественной точки зрения рассматривается как самодвижущийся организм, т.е. объект, развивающийся по своим внутренним законам, не зависящим от человеческой деятельности. В этом случае основным является отношение естественного взаимодействия — воздействия среды на систему и системы на среду. С искусственной точки зрения система рассматривается как конструируемый извне механизм. В этом смысле она может быть заранее целиком создана на основе проекта и лишь потом включена в определенную естественную среду, где она будет

функционировать. Главным отношением, которое в этом случае следует иметь в виду, является отношение реализации.

Если спросить нанотехнолога, что такое полуметалл: созданный в эксперименте искусственный объект или существующий независимо от человеческой деятельности естественный объект, то он ответит: «это — естественная система, поскольку существует в рамках искусственно созданной экспериментально-технической ситуации». Таким образом, если научные знания и представления используются для создания наносистем, то мы находимся в «искусственно-естественно-искусственной» позиции, а если экспериментальные устройства создаются для обоснования и подтверждения данных представлений, то — в «естественно-искусственно-естественной» позиции. В этом и выражаются прежде всего сходство и взаимовлияние исследовательской и проектной деятельности, выполняющих в то же время различные функции в рамках нанотехнологии.

Один из наиболее распространенных примеров такого «естественно-искусственного» объекта исследования и проектирования является так называемая «кластеризованная вода». «С начала 70-х годов, то есть задолго до появления слова “наночастица”, было известно, что вода состоит не из изолированных молекул  $H_2O$ ». Было показано, что молекула воды в жидкой фазе на определенных частотах состоит как из изолированных молекул воды, так и из молекул, «связанных в кластеры посредством водородных связей. Атом водорода одной молекулы образует связь с атомом кислорода другой... При нормальных условиях 80% молекул воды связаны в кластеры, а при повышении температуры эти кластеры диссоциируют на отдельные молекулы». Интересно, что на основе этих данных и развития нанотехнологии сделано предсказание, что при определенном давлении в ударной волне можно получить новую форму воды с симметричными водородными связями. В обычном состоянии атом водорода удален от двух атомов кислорода, связанных с ним, на разные расстояния. При этом предполагается, что, вероятно, «свойства такой воды будут отличаться от свойств обычной воды» [55, с. 98–99].

Совершенно очевидно, что под «обычной водой» фактически понимается естественный объект, а под «кластеризованной водой» — искусственный, хотя в обоих случаях речь идет об одной и той же системе — «вода». Однако и в том, и в другом случае не имеется в виду «вода» как обычный природный объект, выделенный в результате социокультурного освоения человечеством окружающего нас мира («питьевая вода», «вода, текущая в реке», «водная гладь озера» и т. д.), В первом случае вода — это идеализированный объект естественно-

научного исследования (молекулы или кластеры молекул воды), а во втором — объект технологического оперирования, искусственно полученный при определенном давлении в ударной волне<sup>1</sup>.

**Наноструктуры и наноэлементы.** Структура фиксирует расположение элементов и связей в данной системе. В истории философии такого описания реальности придерживался, например, Демокрит, утверждавший, что в действительности существуют лишь неделимые атомы и пустота. «Атомизм... возникает отнюдь не в результате эмпирических наблюдений (например, движения мельчайших пылинок в солнечном луче), а в результате развития определенных теоретических понятий... Именно физическое свойство атома — его твердость, плотность — не допускает разделенности его на меньшие части... Учение Демокрита являет собой первую продуманную концепцию механического объяснения природы и в этом состоит его непреходящее значение... Это была первая в истории мысли теоретическая программа, последовательно и продуманно выдвигавшая методологический принцип, требовавший объяснить целое как сумму отдельных составляющих его частей... Характерной особенностью античного атомизма как метода “собирания целого из частей” является то, что при этом целое не мыслится как нечто действительно единое,

---

<sup>1</sup> Именно такую воду описывает Леонардо да Винчи, хотя он и наблюдает ее «в однокамерных шлюзах Милана», но наблюдает прежде всего как художник, а не как инженер. «Там, пишет он, можно видеть различия, которые обнаруживает вода, успокоясь или двигаясь на поверхности, какое действие она производит, падая... на землю или стоячую воду, что она делает только придя в движение, как она ведет себя в ровном и неровном канале и как она внезапно образует водовороты и вымоины. Бассейном называется то, что имеет форму широкую и глубокую, где воды обладают малым движением. Пучина имеет природу бассейна, за исключением того, что воды в бассейне вытекают без ударов, а в пучине они падают с большой высоты, бурлят и взлетают вверх от непрерывного круговорота воды. Река — то, что находится в самой низкой части долин и течет направленно. Поток течет только при ливнях, он также стекает в низкие места долин и сливается с реками...». Затем Леонардо да Винчи переходит к простому перечислению слов, по возможности употребимых для описания водной стихии, т.е. фактически гидродинамических процессов: «отскакивание, круговое движение, круговращение, обращение, кружение, отражение, погружение, вздымание, склон, подъем, углубление, исчерпание, удар, разрушение, опускание, стремительность ...» [81, с. 98–99]. Даже когда Леонардо рассуждает как инженер, он описывает функционирование и конструкцию шлюзов («если ты даешь направление воде, напиши о том, как открывать ее затворы сверху, в середине. или внизу» [Там же, с. 101]), а не конструирует саму «воду», как это делают нанотехнологи.

имеющее свою особую специфику, не сводимую к специфике составляющих его элементов. Оно мыслится как составное, а не как целое в собственном смысле слова... Что же касается впечатления единства и качественности, которое мы получаем от тел чувственного мира, то оно, по Демокриту, есть лишь субъективное, лишь мнение, объективно же существуют атомы и пустота» [78, с. 79, 86, 95–97].

Эта сформулированная Левкиппом и его учеником Демокритом исследовательская программа многократно воспроизводилась с различными уточнениями и изменениями в течение многих веков. Атомистические представления сохранились и до нашего времени, переключаясь в виде конкретных научных теорий в микрофизику, где, впрочем, возник ряд парадоксов, противоречащих исходной атомистической программе.

На пути от Демокрита к Ньютону преемственность и в то же время развитие этой программы прослеживаются достаточно четко. «Например, если у Демокрита бесконечные в своем разнообразии (по величине, форме и порядку) и неделимые (абсолютно плотные и содержащие в себе пустоты) атомы носились в бесконечной пустоте и, соединяясь различными способами с помощью крючков, образовывали все многообразие объектов и явлений реального мира, то у Ньютона уточняется способ соединения уже унифицированных атомов (материальных аналогов математических бесконечно малых или дифференциалов), и на смену “наивным” крючкам античности приходит сила гравитации, которая объединяет всю Вселенную и четко отражена во всемирном законе тяготения. Эти уточнения не затронули основы атомистической концепции... С развитием электромагнитной картины мира в физике достойное место заняла континуалистическая концепция строения материи. Но она выступила не как отрицание атомистической концепции вообще, а как отрицание ее лишь механистической конкретной модели... Атомизм был возрожден на более глубоком уровне строения материи — само электричество оказалось “атомистичным”, состоящим из электронов (крайне малые электрически заряженные частички)...

В 1911 г. Э. Резерфорд показал, что положительное электричество в атомах сконцентрировано в неких частицах, а не рассредоточено по всему атому. Атом оказался не плотным бильярдным шаром, а некоей “солнечной системой” в миниатюре. Главное в этой модели то, что масса атома сосредоточена в мельчайших частицах, которые занимают ничтожную часть объема атома. Получается, что атом в основном состоит из внутриатомной пустоты, что он пуст... На повестке дня физики начала XX века встала проблема построения специальной механики атомного мира.

Если у Демокрита атомы сцеплялись крючками, у Ньютона они сцеплялись гравитационным притяжением (о природе которого сам Ньютон ничего определенного не знал), то в современной физике элементарные частицы взаимодействуют путем обмена квантами соответствующих полей. Построение квантовой механики дало возможность понять сложный мир атомов и навести там порядок. Но при этом выяснилось, что сами атомы совсем являются не некими первокирпичиками в структуре материи, а суть сложными динамическими системами, составленными из разных элементарных частиц: электронов, нейтронов, протонов... Если на заре атомного века было известно слишком мало частиц, то теперь этих “первокирпичиков” оказалось слишком много, и они... разношерстны...» [82, с. 29–33].

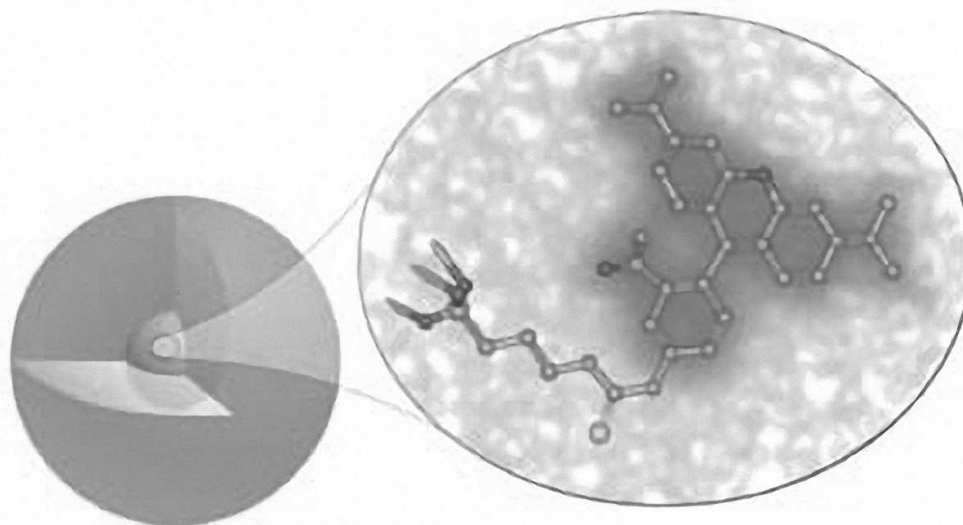
Попытки построить теории различных взаимодействий по единому образцу привели к построению квантовой электродинамики, в которой частицы и их взаимодействия были определены по-новому. Этот процесс продолжается и дальше, но все же в рамках той же самой исследовательской программы.

В нанотехнологии данная проблематика нашла выражение в концепции квантовых точек, которые являются крошечными частицами, такими, как будто они — отдельные атомы (могут поглощать энергию света, подталкивать их внутренние электроны на более высокие энергетические уровни, затем высвобождать энергию излучением света), но в то же самое время состоят из массива атомных кластеров, имеют сложную структуру, хотя и представляют собой предельный случай систем с пониженной размерностью, т.е. являются нульмерными системами.

«Хотя кластеры, или островки, обладают определенной формой и конечными размерами (единицы или десятки нанометров), для данного типа структур принят термин “наноточки”» [80, с. 606]. Например, один из видов наноточек, так называемые «корнельские наноточки» (рис. 3.32), являются наночастицами, состоящими из ядра примерно 2,2 нм в диаметре, в свою очередь содержащего несколько цветных молекул, которые окружены защитной кремниевой оболочкой, делающей целую частицу размером около 25 нм в диаметре. Исследователи назвали ее «ядерно-оболочковой архитектурой». В отличие от квантовых точек они главным образом химически инертны. «Чтобы использовать квантовые точки в виде биологических маркеров, их заключают в полимерную оболочку ... Квантовые точки содержат также тяжелые металлы, подобные кадмию, которые могут удаляться через полимерную оболочку...»<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> См.: *Steele B. Cornell dots.* — <http://www.news.cornell.edu/stories/May05/CUdots.ws.html>





**Рис. 3.32.** Схематическое представление «корнельской наноточки», в которую входит несколько молекул флуоресцентного родамина, окрашенного и включенного в центр капсулы. Окрашка может изменяться в совокупности с кремнием, показанным слева в капсуле<sup>1</sup>

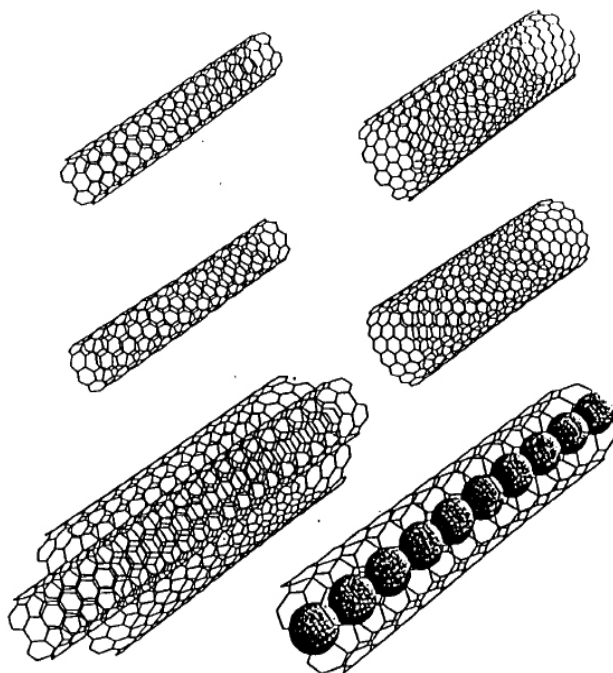
Такое иерархическое представление различного рода систем встречается во многих философских учениях прошлого, начиная с представления Анаксимандра о бесконечно делимом — апейро-не (беспредельном, неопределенном, непреходящем), лежащем в основе всего сущего, и Анаксагора, который за основу всего существующего принимал материальные частицы, сочетания которых образуют качественно подобные им тела — «гомеомерии» (подобочастные), «семена» всех вещей. Гомеомерии движутся и упорядочиваются неким космическим умом (нус), существующим независимо от них.

Провозглашенный им тезис «все во всем» фактически означал, что в сколь угодно малой частице любого вещества (в том числе в любом семени) содержатся все существующие в природе вещества и качества. Именно этот принцип реализуется в голографии, где по любой малой части голографического изображения можно воспроизвести голограмму в целом. Кажется, что каждая частица (или семя) однородна в силу того, что в ней преобладает какое-то одно из них: чего более в каждой вещи.

Точно так же и в нанотехнологии, нанотрубки, с одной стороны, являются простейшими единицами более сложных наноструктур (при синтезе получается смесь нанотрубок разных типов с различным характером и величиной электропроводности), с другой — нанотрубки могут иметь различную атомную структуру, причем трубки

<sup>1</sup> Там же.

разной структуры имеют разные свойства, например с точки зрения электропроводности в зависимости от структуры они могут быть металлическими или полупроводящими (рис. 3.33) [55, с. 113–115].



**Рис. 3.33.** Нанотрубки в нанотехнологии как наноэлементы и как сложные структуры. На рисунке показаны примеры структур, составленных из углеродных нанотрубок: многослойных или заполненных атомами металла<sup>1</sup>

Кроме того, отдельные молекулы или атомы могут образовывать кластеры, которые являются переходной единицей между макро- и наносистемами. Причем при определенных условиях кластер начинает вести себя как объемное вещество: «разные физические свойства кластеров достигают значений, характерных для объемных материалов при разных размерах кластера. Размеры кластера, при которых происходит переход к поведению объемного материала, оказывается зависящим от измеряемой характеристики» [55, с. 92–93].

**Первичные и вторичные качества.** Эта проблематика восходит к демокритовскому различению знания «по истине» (постигаемой разумом атомарной структуры) и знания «по мнению» (того, что да-

<sup>1</sup> Cox D.M. High Surface Area Materials // Nanostructure Science and Technology. A Worldwide Study. R&D Status and Trends in Nanoparticles, Nanostructured Materials, and Nanodevices. Final Report / ed. by R.W. Siegel, E. Hu, M.C. Roco. Prepared under the guidance of the Interagency Working Group on NanoScience, Engineering and Technology (IWGN), National Science and Technology Council (NSTC). WTEC, Loyola College in Maryland, 1999.

но в форме ощущений). По Демокриту, атомы различаются формой, порядком и положением, а их первичными качествами (истинными, т. е. познаваемыми разумом, но не данными в чувствах) являются, например, плотность, величина, неделимость, форма, движение.

По Галилею, к первичным относятся чувственные качества вещей, имеющие корни в объективных свойствах материи (но сами эти корни сводятся к количественным механическим элементам): величина, форма, количество материальных тел (протяжение) и их движение по законам механики. Знание о них дает математика. Вторичными же являются вкусы, запахи, цвета и т. д., имеющие своим источником только наши чувства. Эти качества присущи не объекту, а субъекту и с устранением живых существ были бы устранены и все эти качества.

Гоббс относит к первичным качествам величину (способность занимать пространство, т. е. протяжение), движение и покой. Они сводятся к бесконечным элементам — линии, фигуре, величине и плоскости, постигаемым рационально с помощью геометрии. Вторичным является знание о целостных вещах, т. е. форме, под которой нам представляется тело, даваемое чувствами.

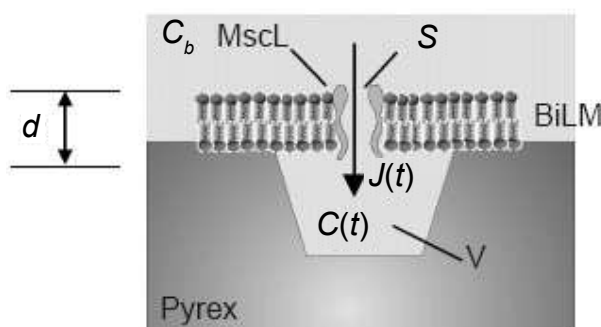
Гассенди считал, что первичными качествами являются масса, фигура, величина, тяжесть (вес), движение, а Декарт — протяжение в длину, ширину и глубину: телесная природа «не является более разделенной по всевозможным родам и видам согласно их субстанциальным формам различных субстанций, вместо этого царит выразимое на математическом языке простое и потому ясно и отчетливо понятное отношение между протяженностью и ее бесчисленными модификациями, частно определенными протяженностями, которые отличает прежде всего одно: в каждой из них обнаруживается как сущность или как атрибут одно и то же — протяженность» [83, с. 343; 84, s. 272–274]<sup>1</sup>.

Почти так же и в нанотехнологии: «Если образец мал в двух измерениях и имеет большие размеры в третьем, то такой объект называют *квантовой проволокой*. Предельный случай этого процесса уменьшения размеров, при котором размеры во всех трех измерениях лежат в нижней части нанометрического диапазона, называют *квантовой точкой*». Если же размеры в одном измерении «лежат

---

<sup>1</sup> «Никакое тело не является лишь протяженным в том смысле, что не может быть полностью описано предикатом “протяжен”. Однако все то, что еще характеризует его особенности, Декарт хотел бы редуцировать до комбинации трех измеримых определенностей — конфигурации, положения и движения» [84].

в нанометрическом диапазоне, а в двух других остаются большими, то получившаяся структура называется *квантовой ямой*» (курсив мой. — Прим. В.Г.; рис. 3.34)<sup>1</sup>.



**Рис. 3.34.** Пример наноточки, запечатанной липидной мембраной [85]

Определенные фигуры и движения вызывают ощущения (свет, теплоту и т. п.), называемые чувственными качествами, которые имеют лишь иллюзорное бытие (подобно щекотке). У Локка первичные качества — это такие, которые не отделимы от тела, т. е. объем, форма, движение, сцепление. Эти качества порождают в нас простые идеи — плотности, протяженности, формы, движения или покоя и числа. Они находятся в телах — воспринимаем ли мы их или нет. Это свойства материальных тел, не отличающиеся в принципе от ощущений этих свойств. Вторичным же качествам — цветам, звукам, вкусам и т. д. — ничего не соответствует в самих вещах, которые вызывают в нас эти различные ощущения своими первичными качествами.

Беркли признает все без исключения качества вторичными и отвергает наличие объективной основы у идеи первичных качеств. Для него геометрические и механические характеристики тел также вторичны, полностью и целиком являются плодом субъективной деятельности человека, получаются только благодаря контрастности в структуре цветов, звуков и ощущений осязания.

Таким образом, излишняя онтологизация качеств предметов привела к абсурдному заключению о их полной субъективности. В теории систем этот парадокс снимается тем, что первичные (функциональные — первого порядка) и вторичные (второго порядка) свойства элементов различаются лишь относительно их функциональной роли в исследуемой системе. При этом функциональные свойства элементов являются свойствами первого порядка, поскольку позволяют включаться в систему для выполнения общей цели, стоящей перед ней и всеми ее элементами. Свойства же второго порядка — это те нежелательные свойства, которые привносит с собой элемент в систему.

<sup>1</sup> Эпитет «квантовый» используется в обозначении этих наноструктур, «потому что в области ультрамалых масштабов возникает изменение свойств квантово-механической природы» [55, с. 198].

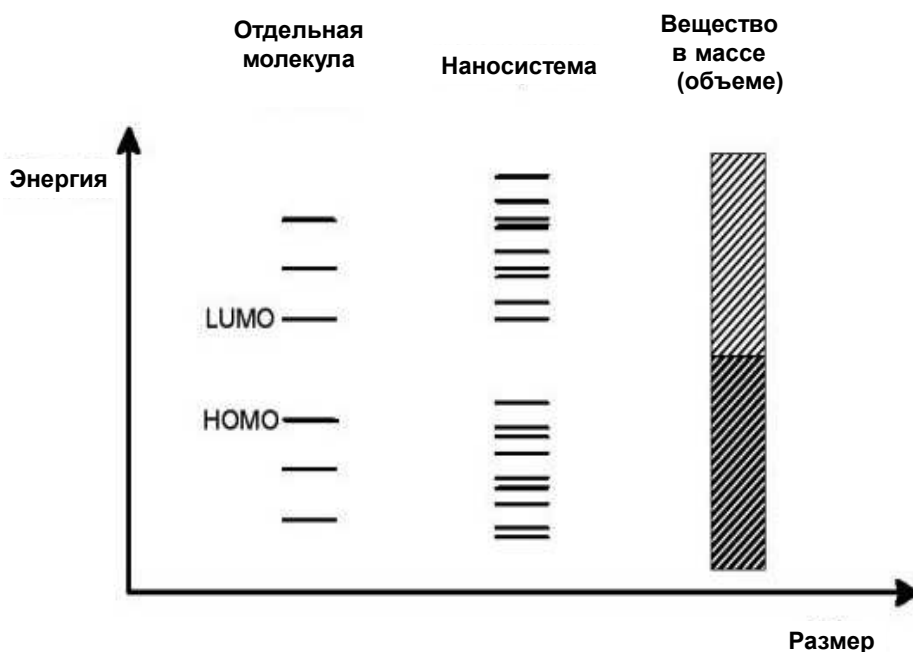
В нанотехнологии между первичными и вторичными качествами устанавливается не столько онтологическое, сколько операциональное соответствие — влияя на первичные качества, можно детерминировать появление желаемых вторичных качеств. «Например, цвет, реакционная способность, стабильность и магнитные свойства зависят от размера кластеров. В некоторых случаях *наночастицы демонстрируют новые свойства, отсутствующие у того же материала в объеме, например магнетизм кластеров, состоящих из немагнитных атомов.*

Помимо постановки перед учеными задач, связанных с объяснением природы возникновения нового поведения, эти результаты имеют огромный потенциал использования на практике, позволяя *выбирать свойства материала путем варьирования размерами частиц.* Очевидно, что наноразмерные материалы могут быть основой *нового класса атомарно сконструированных материалов* (курсив мой. — Прим. В.Г.)» [55, с. 102]. При этом становится совершенно безразличным, приписываем ли мы их субъекту или объекту. Важно, что с помощью построенных в нанонауке теоретических моделей первичных качеств нанотехнология конструирует требуемые для определенных целей вторичные качества, «ощущаемые» нами или созданными нами приборами (например, радиолокаторами), т. е. «физические, химические и электронные свойства наночастиц сильно зависят от количества и типа атомов, составляющих наночастицу» [Там же].

Трехмерные тела могут быть составлены из простых элементов — наночастиц и сверхструктур с улучшенными свойствами. «Фактически изолированные молекулы проявляют свойства, которые следуют квантово-механическим правилам, в то время как химические и физические свойства вещества в массе [или в объеме] подчиняются законам квантовой механики. В середине находятся наносистемы, которые отображают электронные, фотохимические, электрохимические, оптические, магнитные, механические или каталитические свойства, существенно отличающиеся не только от свойств молекулярных единиц, но также и от свойств макроскопических систем.

Квантово-размерные эффекты возникают в наномерных объектах, поскольку их глобальные размерности сравнимы с характеристиками длины волны для основных состояний (возбуждений) в материалах. Эти состояния (или возбуждения), включая длину волны электронов, фотонов и т. д. (частиц), несут кванты энергии через материалы и, следовательно, управляют динамикой их распространения и изменения от одной формы к другой. Однако если размер

структуры уменьшается до того же самого порядка, что и величина этих характеристик волновых функций, распространение и поведение квантов становятся заметно возмущающим и, следовательно, подчиняющимся квантово-механическим правилам, которые обычно не проявляются с очевидностью на макроуровне. Например, в случае с металлами такие типично “металлические” свойства, как электропроводность, снижаются с уменьшением размеров и при существенном уменьшении числа конституирующих атомов в образце. Действительно, зона электронной проводимости металла постепенно развивается от уровня большого слитного куса материала до дискретных состояний как функции редукции размеров, результирующихся в ширине запрещенной энергетической зоны» (рис. 3.35) [86].

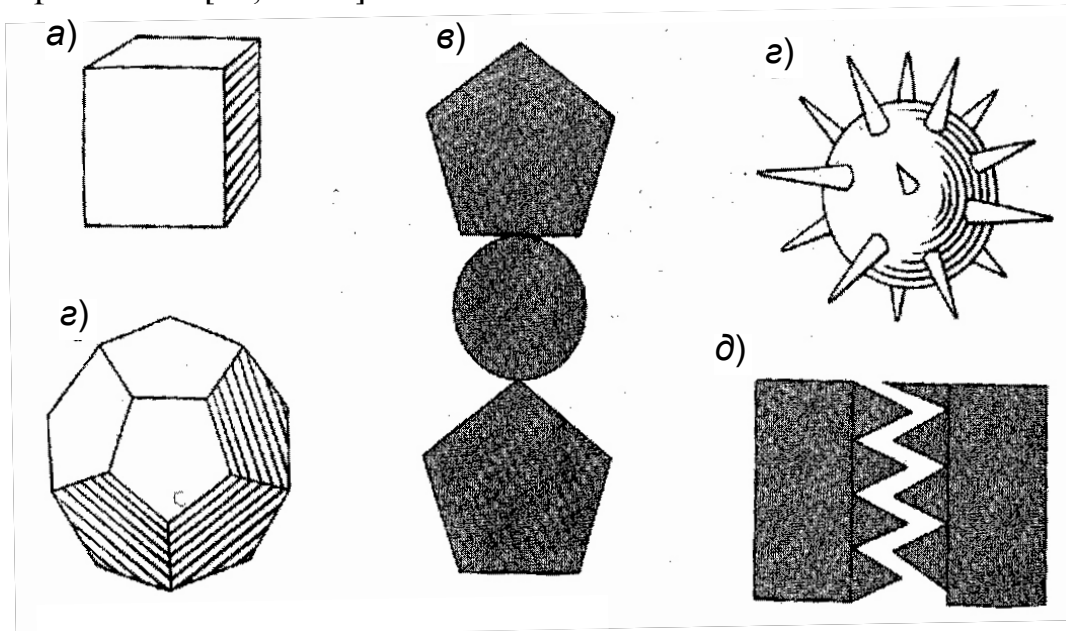


**Рис. 3.35.** Электропроводность вещества, наносистемы и отдельной молекулы

«Атомы в наноструктурах имеют более высокую среднюю энергию, чем атомы в больших структурах, поскольку их там больше, чем атомов на поверхности материала... В результате в наномире свойства наносистем в значительной степени находятся под влиянием иногда незначительных изменений в размерах, форме или поверхностном состоянии этих структур» [86].

Интересно, что аналогичный взгляд на микроструктуру материалов и возможность манипулирования этой микроструктурой для получения нужных свойств материалов развил еще в XVII в. голландский ученый Никлас Хартсэкер в своей книге «Принципы физики», опубликованной в 1696 г. Он пишет о частицах, составляю-

щих основу различных веществ (рис. 3.36). Например, ртуть состоит из округлых частиц. В основании металлов с высокой температурой плавления, как он считает, лежат корпускулы кубической формы, а с более низкой — в форме додекаэдра (двадцатигранника), железо же состоит из треугольно-клинчатых частичек с дырой посередине, что объясняет, по его мнению, явление коррозии. Частицам поваренной соли приписывается своеобразная форма шара с шипами. Хартсэкер «связывает форму атомов с такими специфическими свойствами материалов, как точка плавления, но модель ... не получила дальнейшего развития» [87, s. 151].



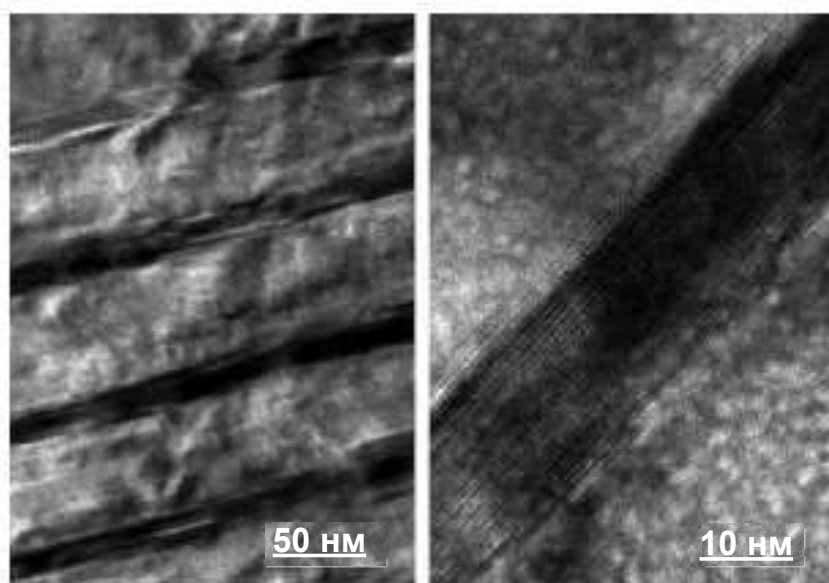
**Рис. 3.36.** Форма атомов, составляющих основу различных веществ [Там же, s. 149]

Атомам, зеркально отражающим свет металла приписывается кубическая форма (рис. 3.36, а), а поддающимся лигированию — форма додекаэдра (рис. 3.36, б). Ртуть должна состоять из шаровидных частиц, которые могут быть лигированы с пентагональными атомами золота (рис. 3.36, в) и быть связаны с хлором, образуя соль с характерными иголками (рис. 3.36, г). Железо же состоит из зубцеобразных частичек, которые при нагревании до температуры плавления раздвигаются и металл переходит в разжиженное состояние (рис. 3.36, д).

Эмпирические догадки и находки относительно роли мелких частиц для получения различных видимых эффектов существовали и в древности. Например, в Средние века было известно, что добавление золотой или серебряной пыли в стекло в расплавленном состоянии может привести к изменению его цветовых качеств. Это, однако, было лишь догадкой, и целенаправленное конструирование необходимых, заранее запланированных свойств полученного методом проб и ошибок

материала было невозможным. Но именно такую возможность и обеспечивает нанотехнология<sup>1</sup>. Например, нантехнонаука помогает разгадать тайну изобретения дамасской стали около 500 г. н.э. в Дамаске, из которой еще в древности изготавливали сабли необычайной твердости, остроты, эластичности и красоты поверхности. «Это была непреднамеренная техника производства наночастиц. После того, как были разработаны современные устройства для анализа материалов на наноуровне, ученые смогли проверить, что было сделано и получили интересный объект исследования для современной науки».

На рис. 3.37 мы можем видеть объяснение технологии изготовления дамасской стали, полученной интуитивно в древности, с точки зрения современной научной картины мира.



**Рис. 3.37.** Нанопроволока или нанотрубки (темные полоски длиной в несколько сотен нанометров), обнаруженные нанотехнологами в дамасской стали [88, p.1]

Завораживающая легендарная история<sup>2</sup> о том, как она (дамасская сталь) чисто разрубает камень, при этом остается такой острой, что может разрезать шелковый шарф, спадающий по лезвию [88, p. 1–2]. Кузнецы держали рецептуру изготовления дамасской стали в стро-

<sup>1</sup> Annual report 2006, published May 2007. iNANO – Interdisciplinary Nanoscience Center to The Faculty of Science, University of Aarhus Ny Munkegade, Building 1521, DK-8000 Aarhus C, Denmark. – [www.inano.dk](http://www.inano.dk)

<sup>2</sup> Согласно одному из вариантов этой легенды сталь сначала измельчали, скармливали цыплятам, а затем вышедшие из их организма частицы снова переплавляли и, наконец, закаливали в моче (см.: *Salloum H. The Legendary Swords of Damascus – Now Only Museum Pieces. Toronto, Ontario, Canada, 2005.* – <http://www.theworldly.org/ArticlesPages/Articles2005/January05Articles/DamascusSwords.html>).



гом секрете. Даже своим подмастерьям они передавали только часть знаний об этой сложной технологии, секрет которой был утерян. Археологи отмечали важную роль мелкозернистых примесей в составе руды [89].

**Материя – форма – материал.** С функциональной точки зрения безразлично, каким образом материализованы (или из какого материала изготовлены) элементы в той или иной системе, в частности наносистеме. Однако функции обязательно должны быть отнесены к материальным элементам, что в известном смысле детерминирует способ расчленения данной сложной системы. В истории философии это представление наиболее полно было разработано в аристотелевской теории материи (бесструктурной, бесформенной субстанции) и формы, оформляющей материю в конкретную вещь, предмет.

Аристотель в «Метафизике» на поставленный им самим же вопрос, что значит делать отдельную вещь из имеющегося в качестве материала субстрата, отвечает: «реализовывать эту форму в другом (т. е. в субстрате)». Например, делать медь круглой – значит реализовывать эту форму в материале: «человек делает медный шар... так что из этого вот (материала), именно – из меди, он делает вот это – именно шар... он вносит форму в этот материал» и в результате получается медный шар, т. е. фигура, всюду одинаково отстоящая от центра.

Человек «создает и производит из этой вот основы вещь с таким-то качеством», а «целое – это уже такая-то форма в этих вот костях и мясе», т. е. материале [90]<sup>1</sup>. Только для Аристотеля форма, как, впрочем, и материя, заданы до всякой вещи.

В «Физике» он продолжает эту тему: «как относится медь к статуе, дерево к ложу или материя и неоформленное вещество до принятия формы, так и лежащая в основе природа относится к сущности, определенному и существующему предмету». Человек производит «переоформление», и именно так статуя (отдельная вещь) возникает из меди (материала). Далее Аристотель подробно обсуждает понятие «место»: «Физику необходимо знать и относительно места, существует оно или нет и как существует, и что оно такое». Эта проблема возникает у Аристотеля в связи с определением главной проблемы в его физике – установления причины движения, понимаемого как механическое перемещение (измене-

---

<sup>1</sup> Первоначально для Аристотеля материя и форма – это «просто материал и оформление: бронзовая сфера – стандартный пример для Аристотеля – составлена из определенного материала, а именно из бронзы, и определенного оформления, а именно сферичности. (Конечно, бронза и сферичность не являются в буквальном смысле частями бронзовой сферы и единство бронзовой сферы не подобно единству, так сказать, стола, который составлен из крышки и четырех ножек)». Позже, однако, отношение материи и формы имеет у него зачастую мало общего с соотношением материала и его оформления [91, р. 97].

ние места). «Что место есть нечто, это ясно из взаимной перестановки вещей: где сейчас находится вода, там после ее выхода, как из сосуда, снова находится воздух, а иногда тоже самое место занимает другое тело... ясно, что было место как нечто (пространство), отличное от них обоих, в которое и из которого они переходили».

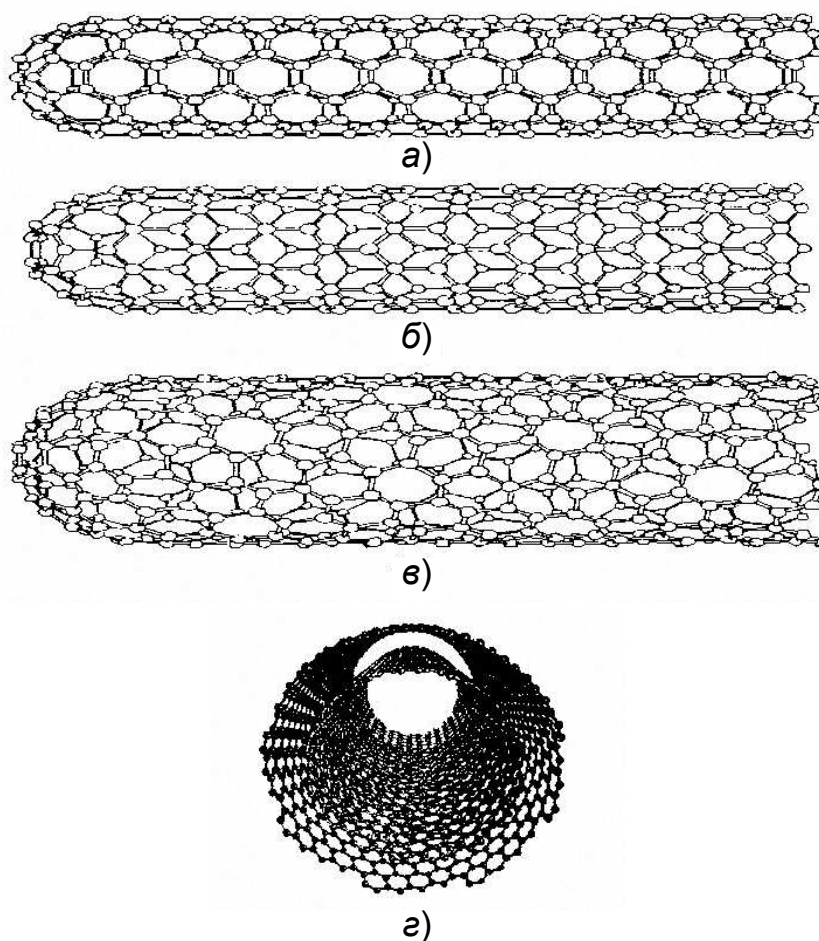
Таким образом, место, по Аристотелю, представляет собой нечто наряду с телами и всякое чувственно воспринимаемое тело находится в месте. Место — это граница в ограничиваемом теле, это граница каждого. Оно не является ни формой, ни материей, «так как последние неотделимы от предмета, а для места это возможно». «По-видимому, место есть нечто вроде сосуда, так как сосуд есть переносимое место, сам же он не имеет ничего общего с содержащимся в нем предметом».

Далее он переходит к вопросу о том, что означает выражение «одно содержится в другом»: «во-первых, как палец на руке и вообще часть в целом; во-вторых, как целое в своих частях (не существует целого помимо частей); в-третьих, как род в виде; в-четвертых, как форма в материи; в-пятых, как вообще в цели (а это есть “то, ради чего”) и т.д., а в своем собственном значении — как в сосуде и вообще в каком-либо месте» [92].

Эта проблема заново формулируется в нанотехнологии, например, при исследовании нанотрубок: «углеродную нанотрубку можно представить как лист графита, свернутый в цилиндр». Таким образом, однослойная нанотрубка представляет собой, с одной стороны, «квазиодномерную структуру», которая может служить, например, проволокой, а с другой — как «место» («граница в ограничиваемом теле»), приобретающее различную структуру (кресельную, зигзагообразную или хиральную, рис. 3.38) в зависимости от способа их изготовления.

Хотя механизм их роста до сих пор неясен, обычно «при синтезе получается смесь нанотрубок разных типов с различным характером и величиной электропроводности», т.е. неоформленное вещество приобретает форму. Они могут служить или полупроводниками, или проводниками, по которым протекает электрический ток (как вода в сосуде у Аристотеля). В «металлическом состоянии» нанотрубки служат прекрасными проводниками, поскольку их проводимость очень высока и они «могут пропускать миллиард ампер на квадратный сантиметр», а кроме того у них мало дефектов, вызывающих рассеяние электронов, а потому низкое сопротивление и большая теплопроводность (вдвое выше, чем у алмаза). Значительный ток не нагревает трубку так сильно, как, например, медный провод, который расплавляется уже при миллионе ампер на квадратный сантиметр [55, с. 112—117]. В данном случае человек использует различный материал (медь или графит) для выполнения одной и той же функции или же, согласно Аристотелю, реализует эту форму в другом субстрате. Человек именно таким образом и создает «из этой вот основы

(лист графита) вещь (нанопроволока) с таким-то качеством» (низкое сопротивление и большая теплопроводность), а «целое» — это уже определенная форма (нанотрубка) в данном материале (графит).

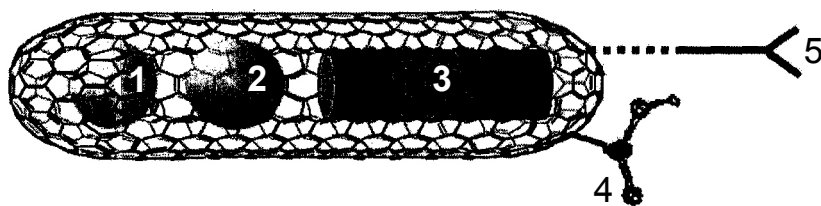


**Рис. 3.38.** Структуры углеродных нанотрубок: кресельная (а), зигзагообразная (б), хиральная (в), «труба в трубе»(з) [55, с. 121].

В то же самое время нанотрубки могут быть функционализированы, т.е. сами служить субстратом или наполнением для выполнения определенных функций (функциональных элементов), например, для создания транзисторов, являющихся переключающими элементами.

На рис. 3.39 показано схематическое представление функционализированной углеродной нанотрубки с вставленными внутрь такого рода наноконтейнера с такими различными функциональными материалами, как, например, ферромагнетик в качестве нагревательного элемента или датчик температуры, а также биофункционализированной внешней оболочкой<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Klingerer R., Kramberger Ch., Müller Ch., Pichler Th., Leonhard A., Büchner B. Funktionalisierte Kohlenstoffnanoröhren: Materialforschung in der Nanowelt // Wissenschaftlichen Zeitschrift der Universität Dresden, 2007, Bd. 6, Heft 1–2, s. 109



**Рис. 3.39.** Схема углеродной нанотрубки с функциональными материалами: 1 — терапевтика; 2 — датчик температуры; 3 — ферромагнетик; 4 — биофункционализированная внешняя оболочка; 5 — нагревательный элемент

При этом функциональные свойства элементов являются свойствами первого порядка, поскольку позволяют включаться в систему для выполнения такой общей цели, стоящей перед ней и всеми ее элементами, как маленькое время переключения и высокая тактовая частота у полупроводниковых углеродных нанотрубок, что «в 1000 раз быстрее существующих процессоров» [Там же, с. 121]. Свойства же второго порядка — это те нежелательные свойства, которые приносит с собой элемент в систему (как, например, низкая теплопроводность у медного провода). Совокупность свойств первого порядка, рассмотренных обособленно от свойств второго порядка, и называется в теории систем функциональным местом элемента. Функциональные места могут быть погружены на определенный материал (по-разному наполнены), в результате чего отношения между ними заменяются реальными связями (металлическими нанотрубками в качестве проводников), а сами они превращаются в элементы (переключающие элементы, составленные из полупроводниковых нанотрубок). Таким образом, нанотрубки в различных системах выполняют разные функции — они многофункциональны. Углеродные нанотрубки очень прочны («модуль Юнга углеродной нанотрубки почти в десять раз больше, чем у стали») и упруги при изгибе («гнется как соломинка, но не ломается и может распрямиться без повреждений», они «примерно в 20 раз прочнее стали»). Поэтому они «должны оказаться очень хорошим материалом для упрочнения композитов<sup>1</sup>...

<sup>1</sup> Композит (composit) — это любой материал, сделанный из более чем одной составляющей, который обладает свойствами обеих своих составляющих. Современные композиционные материалы обычно состоят из двух компонент: волокна и матрицы, т.е. непрерывной фазы. Композиционные материалы, усиленные волокнами (волокниты), имеют два важных достоинства — они прочные и легкие. Сегодня характерен переход к стадии широкого комплексного исследования служебных характеристик композиционных материалов, которые теперь рассматриваются как сложные системы (в частности, наноструктуры). В Исследовательском центре г. Карлсруэ ведутся исследования по созданию (с помощью целенаправленного измене-

Теоретические оценки показывают, что при оптимальной доле трубок в материале около 10 объемных процентов его прочность на разрыв должна увеличиться в шесть раз». Так как нанотрубки плохо пропускают электромагнитные волны, их можно применить для экранирования, например, электронных устройств с целью защиты от оружия, генерирующего электромагнитные импульсы, могущие вывести из строя компьютерные системы управления стратегического назначения. «Другим возможным использованием нанотрубок является хранение в них водорода, что может быть использовано при конструировании топливных элементов как источников электрической энергии в будущих автомобилях» [55, с. 118–121, 125]. В дальнейшем водород может использоваться для получения энергии в нескольких вариантах, однако наиболее перспективным в настоящее время считается получение электрической энергии в топливных элементах с последующим ее направлением напрямую в электрический привод «мотор – колесо».

### **3.5.3. Роль в нанотехнологии «универсальных» средств компьютерного имитационного моделирования**

Нанонаука ориентируется, с одной стороны, на общие методологические наносистемные представления, поскольку не существует единой теории для всех участвующих в нанотехнологической деятельности научных дисциплин и для соотнесения частных теоретических схем необходимо обращаться непосредственно к общенаучной картине мира. С другой стороны, ее теоретические модели всегда опосредуются универсальными (но проблемно ориентированными) средствами имитационного компьютерного моделирования, где уже «защита» определенная математическая схема для представления объекта исследования. Научное исследование в данном случае всегда сопровождается компьютерной симуляцией (рис. 3.40), и то, что мы видим на экране дисплея, уже опосредованно теорией, на основе которой построена приборная ситуация, и ее математическими

---

ния наноструктур материалов и их слоев) так называемых нанокомпозитов (nanocomposites), используемых в микросистемотехнике, биологии, медицине и самой нанотехнологии, аэрокосмической индустрии, автомобилестроении и т. д. Подробнее см., например, <http://www.pslc.ws/russian/composit.htm>.

представлениями, содержащимися в программе имитационного моделирования [53, р. 178].

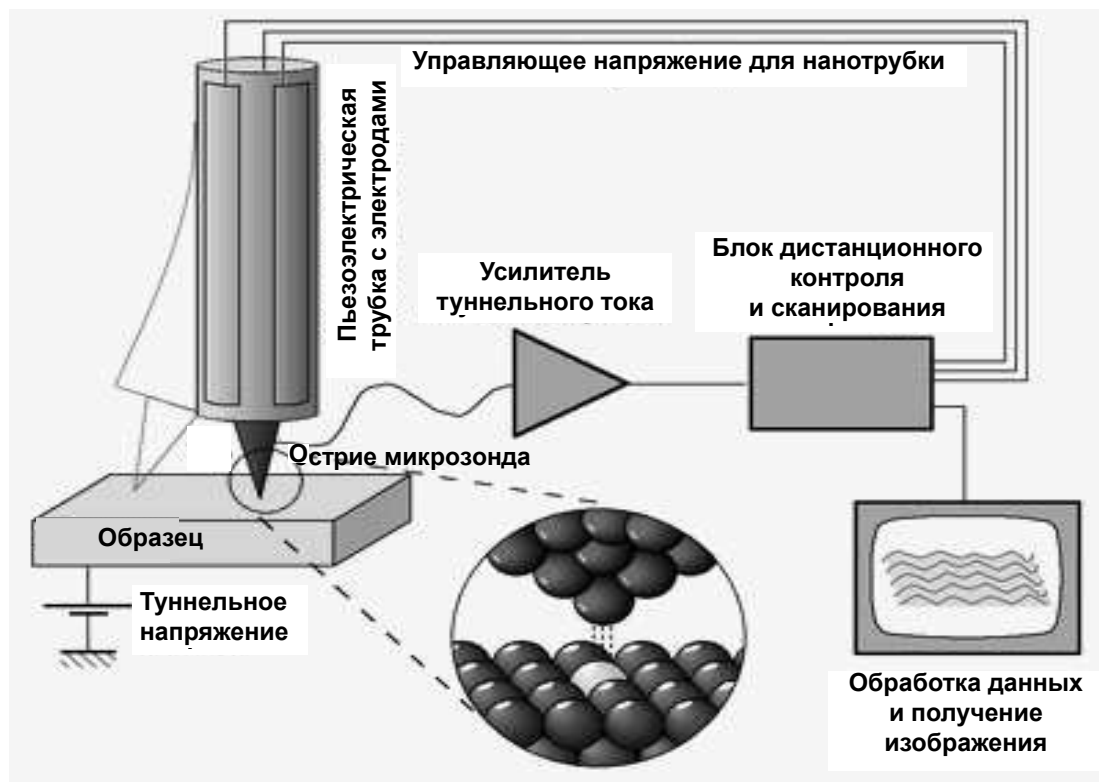


Рис. 3.40. Сканирующий туннельный микроскоп<sup>1</sup>

И. Ленард в статье «Компьютерное моделирование и нанонаука» приводит пример, как с помощью никелевого острия растрового силового микроскопа ученые, собирая атомы с поверхности образца и выстраивая их один за другим, создавали тончайший (толщиной лишь в несколько атомов) золотой провод. Картинки на имитационной модели были первоначально лишь результатом имитационного эксперимента в компьютере, и в сущности наблюдения первоначально велись за симмитированными феноменами на дисплее компьютера, а не были в обычном смысле данными эмпирических наблюдений (рис. 2.46)<sup>2</sup>. Поэтому возникали вполне правомерные

<sup>1</sup> [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f9/ScanningTunnelingMicroscope\\_schematic.png/400px-ScanningTunnelingMicroscope\\_schematic.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f9/ScanningTunnelingMicroscope_schematic.png/400px-ScanningTunnelingMicroscope_schematic.png). D.P. См. также: *Beach B.* Scanning tunneling microscopy. 29.04.2005. — [http://www.indstate.edu/ect/ECT680/spring05\\_papers/Srikanth%20transaction.pdf](http://www.indstate.edu/ect/ECT680/spring05_papers/Srikanth%20transaction.pdf); *Müller T.* Scanning Tunneling Microscopy: A Tool for Studying Self-Assembly and Model Systems for Molecular Devices. Veeco Instruments Inc., 2005. — [www.veeco.com/pdfs.php/268/?showPDF=true](http://www.veeco.com/pdfs.php/268/?showPDF=true)

<sup>2</sup> Сканирующий атомный силовой микроскоп (зондирует объекты с помощью иглы) находится в изолированном от звука помещении, в вакууме и смонтирован на массивной бетонной станине, которая в свою очередь по-

вопросы: не носят ли эти картинки лишь виртуальный характер и что же им соответствует и вообще соответствует что-либо им в реальном мире?

Искусственно смоделированный таким образом на компьютере эффект оказался, однако, успешным предсказанием, подтвержденным двумя годами позже эмпирическими результатами — была получена нанопроволока. На этом примере, во-первых, хорошо видно, что естественнонаучное предсказание определенного нанофеномена, полученное теоретическим путем, является, по сути, проектом некоторого класса экспериментальных ситуаций и одновременно новой технологии, позволяющей реализовать этот феномен в виде конкретного технического продукта с улучшенными физическими, химическими и другими свойствами. Во-вторых, сама исходная имитационная модель была дискретным аналогом дифференциальных уравнений Шредингера, взятых из квантовой теории<sup>1</sup>. Но именно «связь между общими уравнениями Шредингера и [сверхтонким] золотым проводом остается невидимой» внешнему наблюдателю.

Таким образом, компьютерная симуляция хотя и не дает исчерпывающего теоретического объяснения некоторого явления, но все же ее вполне достаточно, чтобы понять, каким образом можно получить конкретный технический результат (в данном случае сверхтонкий провод, обладающий рядом отчасти неожиданно полезных для определенных прикладных целей свойств). Это соответствует высказанному Р. Фейманом утверждению: «Если у нас есть понимание

---

коится на подложке из пластиковой массы. Для охлаждения используется жидкий гелий (иногда азот). Управляющий блок и компьютерная система находятся в отдельном помещении. Принцип его работы состоит в том, что игла с острием из вольфрама в один атом, которое постоянно обновляется, движется вдоль образца. Управление ею осуществляется с помощью пьезоэлектрического блока, который обеспечивает постоянство силы между образцом и острием зонда. На основе данных, полученных в результате сканирования специально подготовленного для этого образца (например, кремниевой пластины с тщательно очищенной поверхностью), на дисплее компьютера строится представление, весьма похожее на карту местности [93].

<sup>1</sup> «Волновая функция, дающая описание квантовых систем и их изменений со временем, выражаемая уравнением Шредингера, позволяет на основании знания современного состояния системы определить точные значения ее параметров в сколь угодно отдаленном будущем и прошлом... С другой стороны, основным принципом квантовой механики является принцип или соотношение неопределенностей, согласно которому ряд важных параметров квантовых систем, в частности положение и импульс, энергия и время, не могут быть определены одновременно с достаточной точностью и вообще не могут существовать одновременно» [94, с. 130].

того, что должно случиться в данных обстоятельствах без решения уравнения, значит мы “поняли” это уравнение применительно к тем самым обстоятельствам». В этом смысле любая модель, а в особенности компьютерная, служит лучшему пониманию как эмпирических данных, представляя их в целостной и более легко обозримой форме, так и математических формализмов, лежащих в основе теоретических представлений [95].

Возможность такого перехода была заложена уже в работах неоплатоников, попытавшихся объединить несоединимое — платоновское учение об идеях — с философией природы Аристотеля с помощью учения об эманации. В то время как у Платона идеи являются самостоятельными и существуют в высшем мире независимо от вещей, для Аристотеля они являются сущностью вещей, находящейся в самих вещах. Плотин над мировым духом с его многообразием идей расположил «единое», а под миром идей — подчиненное ему многообразие вещей и, наконец, материю. Этим ступеням соответствуют и ступени совершенства, которое уменьшается при движении по ступеням вниз.

Мир образовался в результате эманации первоначального единого — потенции всех вещей, подобного Солнцу, излучающему тепло. Тем самым неоплатонизм с помощью эманации соединил мир идей с реальным миром природных вещей. Отсюда понятны место и роль математики и ее соотношение с физикой.

Этой проблеме посвящены комментарии к «Началам» Евклида Прокла, который считал, что математическое бытие не принадлежит «ни к самым первым, находящимся в сущем родам, ни к низшим и — в отличие от простого бытия — разделенным», а занимает «среднюю область между не имеющими частей, простыми, несоставными и неделимыми реальностями и реальностями, состоящими из частей и находящимися во всевозможных сочетаниях и разнообразных разделениях». Наличие в рациональных построениях геометрии того, что «вечно тождественно, неизменно и неопровержимо, показывает, что она стоит выше так называемых вещественных видов» [96, с. 43—59].

Прокл критикует аристотелевское представление о математических сущностях как производных от чувственно воспринимаемых вещей путем их отвлечения или сведения частных в единое обобщенное рациональное построение. Он склоняется к интерпретации математических сущностей Платоном, как обладающих самостоятельной реальностью, существующих еще до самих вещей. Они получаются из души, придающей совершенство несовершенному и точность неточному, и не могут быть абстрагированными из ве-



щественных фигур, которые по определению являются неточными и несовершенными. Именно душа порождает математические виды и рациональные построения, которые существуют в ней первично, а затем уже порождают чувственно воспринимаемые предметы.

«Следовательно, доказательные науки отнюдь не должны обращать внимание на чувственно воспринимаемое — позднее возникшее и более неясное, а должны рассматривать постижимое разумом и более совершенное, нежели ведомое ощущению и мнению» [96, с. 65]. Тогда математика — это наука о рациональных построениях разума, а изучение ее сводится к припоминанию вечных рациональных построений, которые уже находятся в душе.

Таким образом, математика, соприкасаясь сверху с постижением первых начал, со знанием, существующим в чистой мысли, спускаясь вниз, доходит до чувственно воспринимаемых результатов. У Прокла математика рассматривается как ее причина, ее онтологическая предпосылка, поскольку для него физические вещественные связи являются лишь отражением математических отношений.

Итак, Прокл, в соответствии с учением об эманации, восходящим к Плотину, мыслит физический мир как следствие математики, в котором математика, так сказать, сверху упорядочивает этот мир. При этом Космосу придается шаровидность не из-за того, что это соответствует нашим чувственным восприятиям и повседневному опыту (или эксперименту), а потому, что это — исходное и простейшее тело вообще, которому соответствует определенная математическая фигура, существовавшая еще до возникновения всякого физического тела, а именно — шар. Математические схемы тогда — это своего рода априорные схемы, в соответствии с которыми построен мир, а не средство для расчетов [97, с. 176–177]. Геометрические объекты — своего рода «кентавры», где соединены вместе несовместные части. Они отчасти являются идеальными, но в то же время воплощенными в материи идеальными образованиями. Для Плотина, как и для Платона, они — не «бледные» отражения реальных вещей, но, напротив, отражения идей.

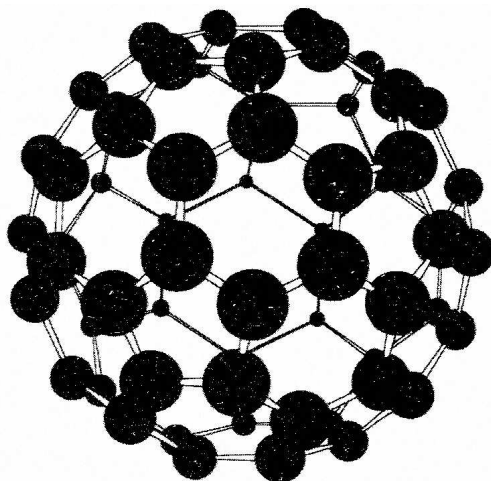
В этом контексте весьма интересен еще один пример из нанотехнологии с открытием молекулы, похожей на футбольный мяч и состоящей из 60 атомов углерода, которое явилось результатом исследований природы материи в Космосе, а именно: «поглощения света межзвездной пылью, т. е. малыми частицами вещества, находящимися в межзвездном и межгалактическом пространстве... Это поглощение приписывалось рассеянию света на гипотетически малых частицах графита, находящихся в межзвездной среде... Дональд Хаффман из университета Аризоны и Волфганг Крачмер из Института ядерной

физики имени Макса Планка не были удовлетворены этим объяснением...». Они продолжили исследования и с помощью электрической дуги между двумя графитовыми электродами в атмосфере гелия создали мельчайшие частицы сажи, которые осадили на пластинку из кварцевого стекла и стали измерять колебательные частоты молекул с помощью спектроскопии. «Хотя похожую на футбольный мяч молекулу из 60 атомов углерода с химической формулой  $C_{60}$  химики-теоретики предсказали уже много лет назад, никаких доказательств ее существования обнаружено не было... К удивлению Хаффмана и Крачмера, четыре наблюдаемых полосы поглощения осажденного “графитового” вещества хорошо соответствовали предсказанным для молекулы  $C_{60}$ ».

Для подтверждения этого вывода были проведены и другие эксперименты иными методами, что дало твердое доказательство существования новой молекулы, состоящей из 60 атомов углерода, связанных в виде определенной геометрической фигуры — сферы. Результаты были опубликованы в 1990 г. в журнале «Nature». Эта молекула получила название фуллерена  $C_{60}$  — по имени архитектора Р. Бакминстера Фуллера, сконструировавшего геодезический свод, напоминавший структуру  $C_{60}$ .

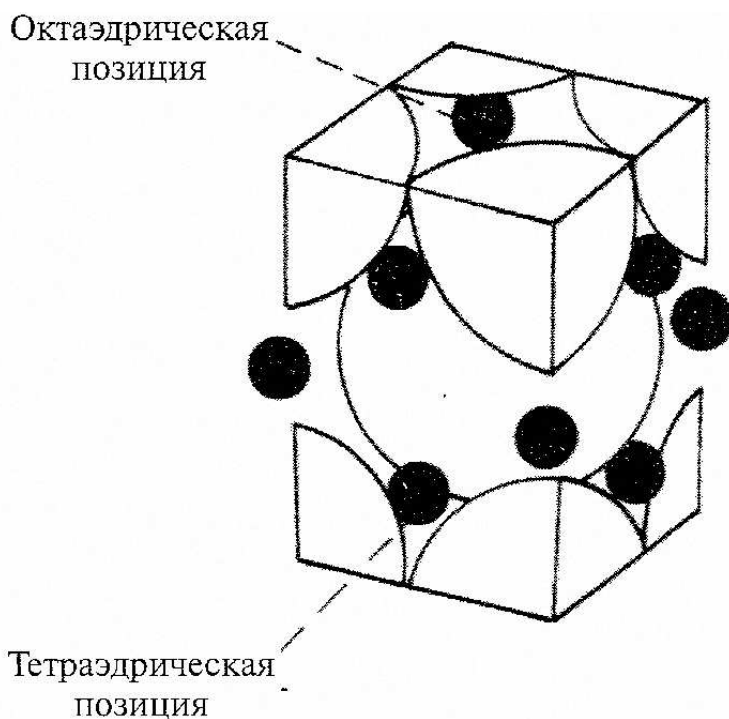
Были проведены и другие эксперименты иными учеными, например, с целью получения малых кластеров атомов при помощи высокоэнергетических лазерных импульсов, что, как считалось, имитировало условия во внешних слоях звезд — красных гигантов. «Хотя данные этого эксперимента не дают информации о структуре углеродного кластера, авторы предположили, что молекула может быть сферической и построили ее геодезическую модель» [55, с. 106–108].

Так что же в данном случае было первичным: техническая модель геодезического свода, геометрическая фигура («она имеет 12 пентагональных (пятиугольных) или 20 гексагональных (шестиугольных) симметрично расположенных граней, образующих форму, близкую к шару» (рис. 3.41), данные эксперимента или наблюдения астрономических объектов? Никто, в сущности, не видел эту молекулу ни до, ни после проведения подтверждающих экспериментов, видели лишь спектральные линии разного цвета и показания приборов (например, масс-спектрометра, предназначенного для измерения массы молекул) и интерпретировали их. Геодезический свод Фуллера дал лишь отправной образ для математической модели, да сам был, видимо, ее конструктивной реализацией. Таким образом, получается, что исходной является математическая модель в духе Платона и Прокла.



**Рис. 3.41.** Структура молекулы фуллерена  $C_{60}$

Сами эти шарообразные молекулы, как утверждают нанотехнологи, могут соединяться друг с другом в твердом теле, образуя гранецентрированную кристаллическую решетку (ГКЦ), т.е. опять же особую геометрическую фигуру (рис. 3.42).



**Рис. 3.42.** Элементарная ячейка кристаллической решетки молекулы фуллерена  $C_{60}$  (большие шары), легированного щелочными атомами (темные кружки)

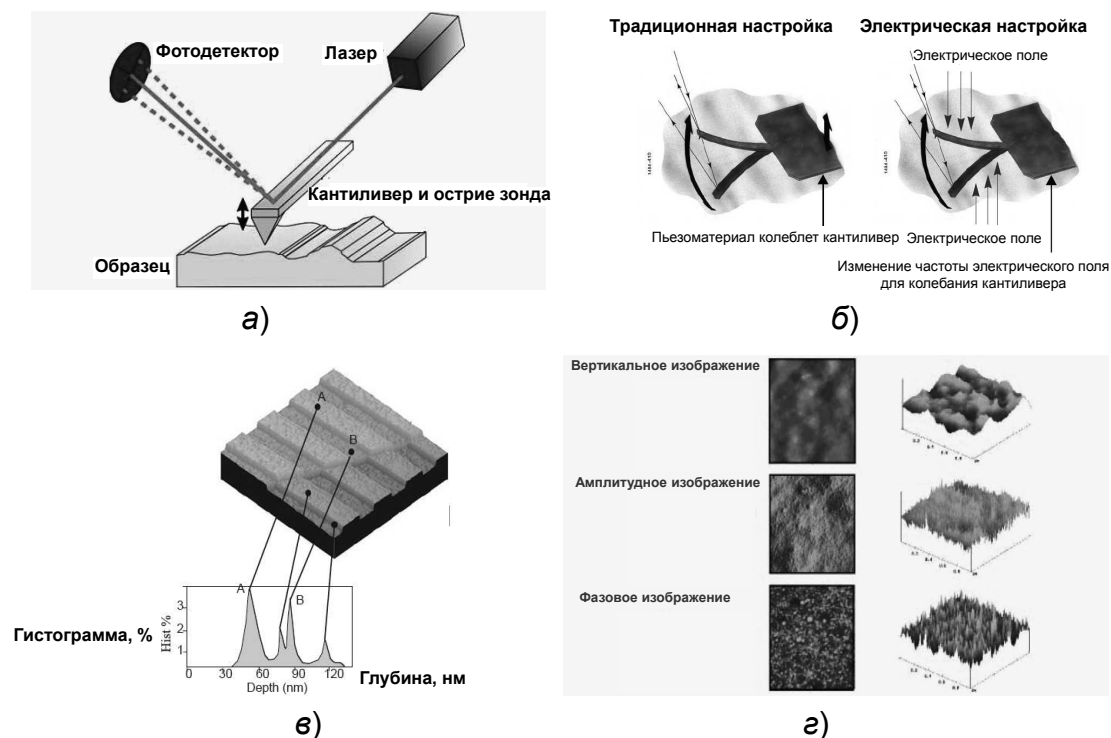
Далее на основе этой абстрактной геометрической модели строятся некоторые предположения и осуществляются определенные технические действия: предполагается, что в «ГКЦ-структуре фуллеренов 26% объема элементарной ячейки пустует, так что щелоч-

ные атомы могут легко разместиться в пустотах между сферическими молекулами вещества», далее кристаллы  $C_{60}$  и металлический калий помещают в трубку, из которой откачивается воздух, и нагревают до  $400^\circ$ . После этого пары калия диффундируют в пустоты, а кристаллы  $C_{60}$ , бывшие до этого диэлектриком, при лигировании щелочными атомами становятся проводниками. «В 1991 году, когда А.Ф. Жебард с группой в Bell Telephone Laboratory залегировал кристалл  $C_{60}$  калием по вышеописанной методике и проверил полученное таким способом вещество на сверхпроводимость, то к всеобщему удивлению были найдены свидетельства перехода в сверхпроводящее состояние при температуре 18 К» [55, 109–110].

Итак, манипуляции с этим квазиприродным объектом (кристалл  $C_{60}$ ) показали конструктивность исходной геометрической модели и позволили получить и выявить новые его свойства, не существовавшие до того в природе, а в дальнейшем оперировать с ним для решения различных проектных задач (например, «заткнуть» этим мячеподобным предметом нанотрубки).

Компьютерная имитация является также в известном смысле реализацией кантовского учения о схематизме познания. Как отмечает Х. Ленк, «Иммануил Кант сделал понятие схемы продуктивным для теории познания, поскольку он использовал его для описания процедурно характеризуемой и операционно “реализуемой” связи между чувственным восприятием, с одной стороны, и понятийным схватыванием, с другой» [98, s. 16–17]. Такая схема является необходимой для представления множества результатов измерения в обозримом виде и в нанотехнологии, где они соотносятся с самыми различными научными теориями (и построенными на их основе экспериментами) и, по определению, являются трудно между собой стыкуемыми. Такая абстрактная теоретическая схема, например, молекулы фуллерена может, в сущности, и не иметь ничего общего с реальным эмпирическим объектом.

Сканирующий атомный силовой микроскоп, например, «поставляет не изображения или звуковые сигналы, а данные. И данные не от мира в себе, а данные, которые протоколируют *взаимодействие* острия зонда и поверхности образца». Здесь важны процессы интерпретации и подготовки полученного эмпирического материала, т. е. данных измерений. Главную роль в этих процессах играет специальный софтвер для графической обработки данных, предлагающий средства для работы с изображением: прояснить, затуманить его, сделать рельефным. Компьютерные программы позволяют приспособить абстрактные данные к нашим привычным зрительным восприятиям (рис. 3.43).



**Рис. 3.43.** Способы компьютерной имитации<sup>1</sup>: а – сканирующий атомный силовой микроскоп; б – сравнительная настройка кантилевера; в – гистограмма глубины; г – типы изображения

Они синтезируют концептуальное и чувственно воспринимаемое, собственно говоря, берут на себя функцию, которую Кант приписал схематизмам. Первое, что необходимо сделать – придать данным измерения форму ортогональной проекции (т.е. задать представление в прямоугольных координатах), «таким образом, представить, какими атомные группы теоретически предполагаются быть. Они также очищают изображение от шумов, т.е. артефактов измерительного процесса. Программа даже может представить все в цвете. Хотя на атомарном уровне нет никаких цветов, большинство наноизображений являются, тем не менее, цветными. С помощью преобразований Фурье можно убрать из изображения шумы и помехи, которые мешают отображаемой на картинке «иллюзии реальности». Именно программа придает данным вид поверхности или глубинной структуры» [93].

В принципе эта работа ничем не отличается от разведки местности с помощью радиолокационного устройства, например со спутников. Полученные данные также проходят через многоступенчатый процесс фильтрации и устранения помех, проясняющих изображение, причем характер последнего зависит от поставленной цели. Если

<sup>1</sup> Nanoscope Software 6.13 User Guide. Veeco Instruments Inc., 2004 – [www.veeco.com/pdfs.php/268/?showPDF=true](http://www.veeco.com/pdfs.php/268/?showPDF=true)

нужно картографировать рельеф местности, то дается один тип изображения, а если, например, исследовать донные отложения в водоемах и реках или залегание горных пород, — другой тип.

Как и в случае с атомным силовым микроскопом, который тестирует поверхность образца с помощью тончайшего зонда, радар проводит сканирование поверхности, посылая и принимая сигналы от поверхности различных тел и обрабатывая их на компьютере. В сущности, острое наконечника зонда не соприкасается с поверхностью образца — измеряются силы их притяжения или отталкивания. К системе «образец — игла» в сканирующем туннельном микроскопе приложена разность потенциалов, и электроны, как бы перескакивая с образца на иглу, создают туннельный ток, величина которого экспоненциально зависит от расстояния между исследуемым образцом и острием зонда.

Сканирующий электронный микроскоп вообще осуществляет сканирование сфокусированным пучком электронов, что еще более сближает его с радиолокацией, которая сегодня использует для локации объектов не только волны радиодиапазона. Радиоволны при этом рассматриваются лишь как один из типов волн произвольной природы наряду с инфракрасными и световыми колебаниями, а также рентгеновским и гамма-излучением или механическими ультразвуковыми колебаниями упругой среды. Собственно, и полученное с помощью радара необработанное изображение мало что может сообщить об исследуемой поверхности, если не произведена его реконструкция с использованием специального программного алгоритма [99].

Следует отметить, что такого рода изображения покоятся на геометрических построениях. Еще Давид Гильберт показал, что пространственная геометрия является фактически физической теорией («древнейшей ветвью физики») и что могут быть также построены разные варианты непространственной геометрии, например в учении об электричестве или учении о наследовании геометрических признаков, где вместо пространственных фигур используются другие признаки, например, различные цвета (так сказать цветогеометрия) [100, s. 85–86, 89]. Эту ситуацию хорошо описал Карл Гемпель: «Физическая геометрия, т. е. теория, в которой идет речь о пространственных аспектах физических феноменов, состоит из системы чистой геометрии в силу того, что существует специфическая интерпретация этой корневой системы в физических терминах». В качестве физической пары по отношению к евклидовой геометрии выступает физическая система, в которой величина объектов является незначительной по сравнению с их удаленностью друг от друга. Тогда

*точки могут быть интерпретированы* и как булабочные головки или узелки на нитке, и как планеты, звезды и даже целые галактики, где прямыми их соединяющими являются лучи света. Такого рода интерпретации преобразуют постулаты и теоремы чистой геометрии в предложения физики [101, s. 37–39].

Можно представить себе такую гипотетическую ситуацию, когда ученик сталевара, изучая технологический процесс приготовления стали, сидит в изолированной комнате, наблюдая за дисплеем компьютера, на который заведены всевозможные данные измерений, скажем, в бессемеровском конвертере или мартеновской печи в режиме реального времени, но отображены они в виде абстрактной картинки. Ученик слышит передаваемые ему по радио команды мастера и регистрирует изменения, происходящие на экране. Он может, в принципе, никогда и не увидеть реальный технологический процесс, но научиться варить сталь. В сущности, и мастер видит только показания многочисленных приборов и по ним принимает решения, когда и что добавить в печь и т.д. Точно так же и Галилей интерпретировал изображение Луны в своем телескопе как наличие гор и впадин на ней, хотя ни он, ни его тогдашние коллеги не могли видеть действительного приближенного изображения. Коллеги Галилея интерпретировали то же самое изображение как сочетание темных и светлых пятен на гладкой поверхности. И только космонавты, облетевшие Луну или приземлившиеся на ней, смогли нам достоверно подтвердить, что Галилей был прав.

В случае же с нанотехнологией вряд ли предвидится такая возможность «посмотреть» на «вещи в себе», составляющие наноструктуры, но и без этого вполне достаточно того, что посредством сконструированных благодаря способности воображения априорных теоретических схем и моделей имеется возможность осуществлять успешные технические действия.

В результате получается, по образному представлению Х. Ленка, как с картинкой в калейдоскопе: когда его встряхивают, картинка меняется. Точно так же и наблюдение за радугой зависит от перспективы, с которой ведется наблюдения. В этих случаях мы имеем дело не с «воспринимаемыми объектами», а с некоторыми объективными феноменами, которые можно даже зарегистрировать и интерсубъективно зафиксировать, но они и их регистрация зависят от способа их возникновения и представления. Нанофеномены представляют собой именно такие явления, которые являются измеримыми, но не всегда локализуемыми и делимыми как «объекты» макромира. Например, электрон часто представляется не в виде локализованного в пространстве сферического тела, а как оболоч-

ка, растекающаяся по различным орбитам внутри атома. Да и корпускулярное представление в квантовой механике основывается на определенном математическом формализме, а именно — матричных представлениях. «Мир же в целом, — заключает Ленк, — единственный, ограниченный, неделимый объект» [102, s. 269–271] в духе учения Парменида (о едином, вечном и неизменном бытии, никуда не стремящемся и нерасчлененном целом) и американского физика Давида Бома.

Мир, по Бому, — это неразложимое целое, некая тотальность, в которой части могут быть выделены нашим мышлением лишь условно и упрощенно. Общей же мыслительной схемой физики, критикуемой им, до сих пор была именно фрагментация. «Два импульса соподчиненной полевой структуры спаиваются в едином неразбиваемом целом и протекают совместно. Такое представление в лучшем случае оставляет идею отдельных и независимо существующих частиц абстракцией, только в ограниченной области, дающей удовлетворительное приближение. В конечном счете весь универсум (со всеми его “частицами”, включая те, что люди получили в своих лабораториях с помощью своих инструментов) должен быть понят как единственное нерасчлененное целое, в котором анализ по отдельным и независимым частям не получит никакого основополагающего значения... Весь универсум должен рассматриваться как неразбиваемое целое. В этом целом каждый элемент, который мы можем мысленно абстрагировать, демонстрирует свои основные свойства (волны или частицы и т. д.), которые зависят определенным образом от его общего поля, так что они в большей мере напоминают соединенные вместе органы живого существа, чем интегрированные вместе части машины» [102].

Д. Бом считает, что именно целостность мира — реальность, а фрагментарность задана лишь фрагментарными действиями человека на эту реальность. Природа реальности должна быть «понята как взаимосвязанное целое, которое никогда не является статическим или завершенным и представляет собой бесконечный процесс движения и развертывания». В данном случае Д. Бом использует образ «нерасчлененного целого в текучем движении», «универсального текущего потока», который невозможно схватить явным образом, но лишь представить имплицитно и субстанция которого в каком-либо одном месте никогда не является одной и той же. «Современная физика утверждает, что действительно из атомов образуются потоки (подобно тому, как течет вода)...». Сами дух и материя становятся лишь различными аспектами единого целостного и неразложимого на части движения, хотя в этом никогда нерасчленяемом и нахо-



дящимся в текущем движении целом и могут быть абстрагированы различные фигуры, имеющие некоторую стабильность и автономию [103, s. 9, 31, 77, 226–231].

В результате целого ряда фильтраций и преобразований, зашитых отчасти уже в соответствующей компьютерной программе, получается визуализированное изображение нанообъектов, которое выдается за репрезентант особой наноонтологии. Однако всякому исследователю ясно, что этот результат многократных компьютерных преобразований представляет собой имитационную модель — своего рода компьютерный имитационный эксперимент (рис. 3.44).

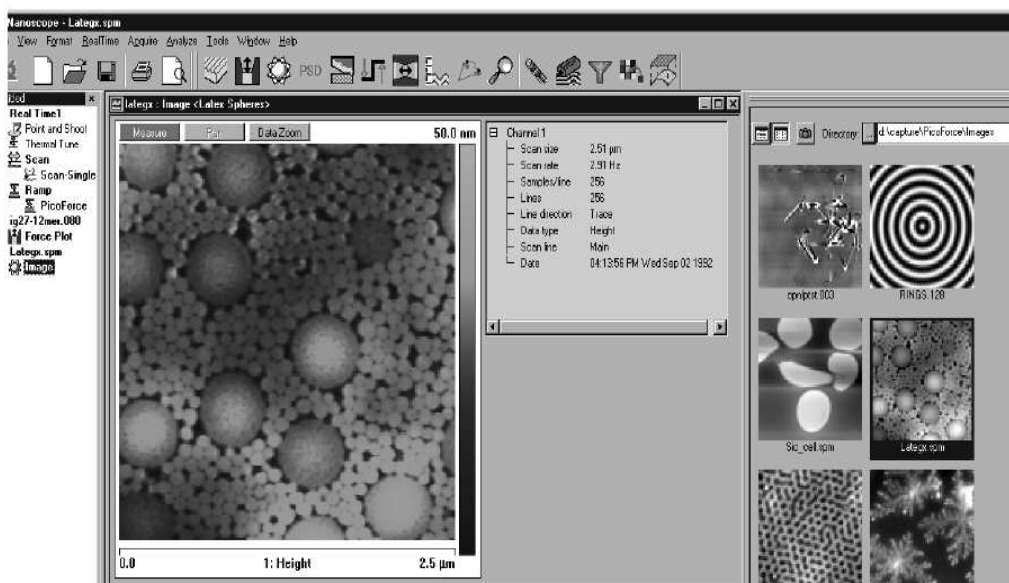


Рис. 3.44. Специальное программное обеспечение для визуализации наносистем<sup>1</sup>

Таким образом, в нанотехнологии постоянно осуществляется движение в трех различных оперативных полях: *математическом* (геометрическая фигура из 12 пятиугольных и 20 шестиугольных симметрично расположенных граней, образующих форму, близкую к шару), *созерцательно-техническом* (модель геодезического свода молекулы фуллерена) и *квазиприродном* (данные экспериментов, измерений и наблюдений). Например, Рудольф Карнап в докторской работе «Пространство. Вклад в учение о науке» [104] анализирует понятие «пространство» в трех различных смыслах, а именно формального, созерцательного и физического. Формальное пространство представляет собой абстрактную систему, поэтому наши знания о нем — логического свойства. Созерцательное пространство анало-

<sup>1</sup> См.: Nanoscope Software 6.13 User Guide. Veeco Instruments Inc., 2004. — [www.veeco.com/pdfs.php/268/?showPDF=true](http://www.veeco.com/pdfs.php/268/?showPDF=true)

гично кантовскому «чистому созерцанию», основанному, однако, не на трехмерной евклидовой структуре, а на топологических свойствах<sup>1</sup>. Знание о физическом пространстве является полностью эмпирическим. В нанотехнологии этот тип пространства охватывает не только физические, но и химические, биологические и другие свойства исследуемых объектов.

Этим трем типам пространства соответствуют фактически три типа теоретических схем: математические, структурные (конструктивно-технические) и поточные, описывающие природные процессы, протекающие в наноструктурах, или (если их рассматривать с искусственной точки зрения) процессы их создания и функционирования. Причем математические схемы задают средства описания как структурных, так и поточных схем. Это связано с тем, что в нанотехнологии любые измерительные или проектные процедуры опосредованы компьютерным моделированием, в основе которого лежат алгоритмические описания и кибернетические представления.

### 3.5.5. Абстрактные структурные и алгоритмические схемы современной технонауки

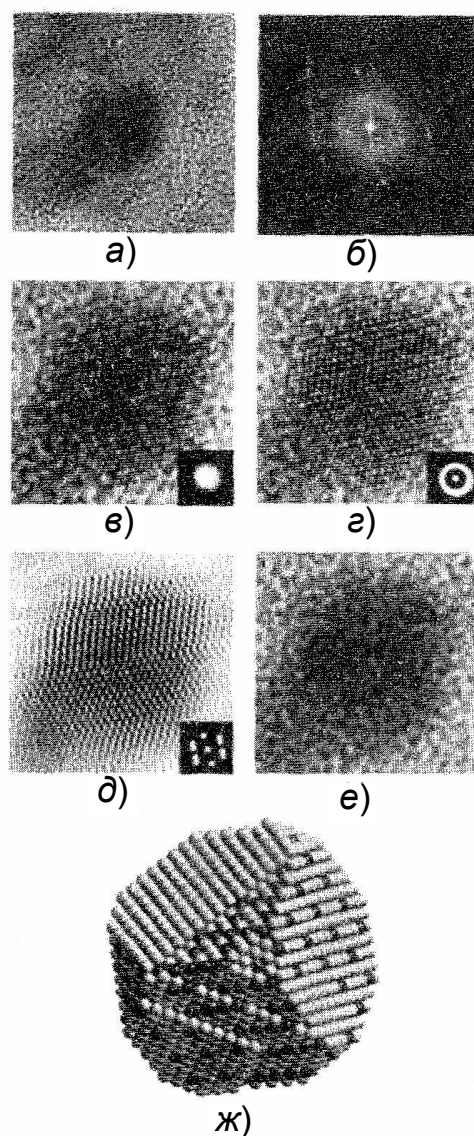
Как во всякой современной технической теории в наносистемотехнике важную роль играют *абстрактные структурные схемы*, которые позволяют изучать объект в наиболее чистом виде, анализировать конфигурацию системы, степень связности и надежности ее элементов безотносительно к их конструктивному исполнению. Однако в современной технической теории эти схемы обязательно дополняются *абстрактными алгоритмическими схемами*<sup>2</sup>, обобщенными в кибернетике и описывающими преобразования потока субстанции (вещества, энергии и информации) независимо от его реализации, которые дают идеализированное представление функционирования любых систем (в том числе и наносистем, и самого нанотехнического исследования) и могут стать исходным пунктом компьютерного моделирования. «Увеличение вычислительных мощностей компьютеров и разработка новых теоретических под-

---

<sup>1</sup> В более поздних работах созерцательное пространство, которое явно введено под влиянием философии Канта, из работ Карнапа исчезает.

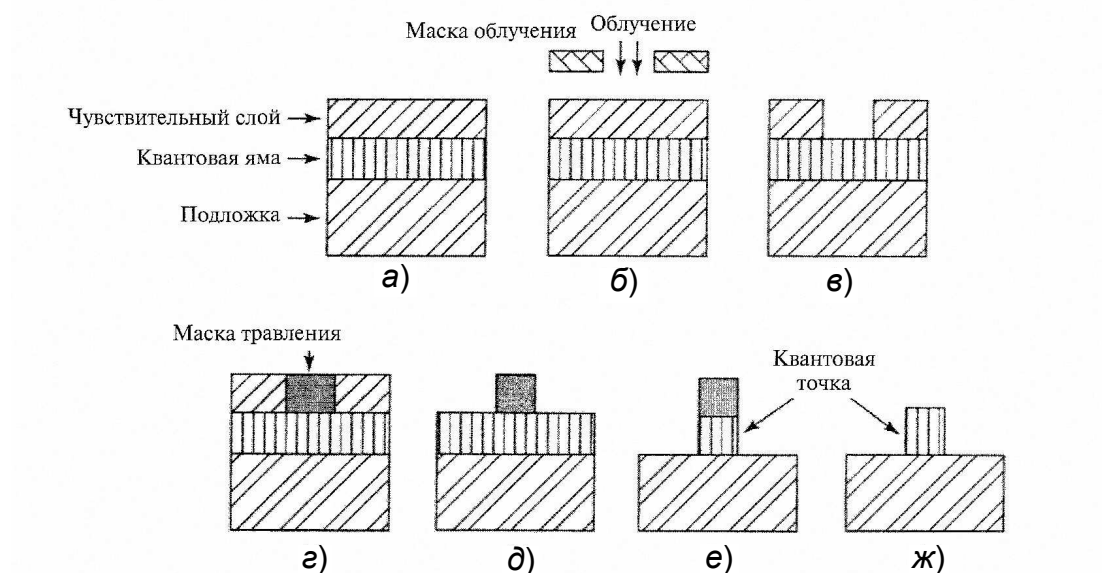
<sup>2</sup> По сути дела и у Канта речь идет о двух типах схематических представлений: как фигур в пространстве и как схематического представления во времени, к которому Кант относит, например, каузальное объяснение [98, s. 17–18]).

ходов сделало возможным определение геометрической и электронной структуры больших молекул... с высокой точностью». Например, в нанотехнологии для реконструкции изображений субстрата и наночастиц с целью увеличения количества информации явным образом описывается алгоритм обработки такого рода изображений, в результате чего строится «модель наночастицы, воссозданная на основе полученных данных» (рис. 3.45) [55, с. 60].



**Рис. 3.45.** Просвечивающая электронная микроскопия: обработка изображения частиц Ni на  $\text{SiO}_2$ -субстрате с просвечивающего электронного микроскопа: *а* — первоначальное изображение; *б* — пространственное быстрое преобразование Фурье первоначального снимка; *в* — изображение, полученное с апертурным фильтром; *г* — дальнейшая обработка изображения с другим апертурным фильтром; *д* — окончательное изображение; *е* — изображение  $\text{SiO}_2$ -субстрата, полученное вычитанием изображения частицы; *ж* — модель наночастицы, воссозданная на основе полученных данных [55, с. 60]

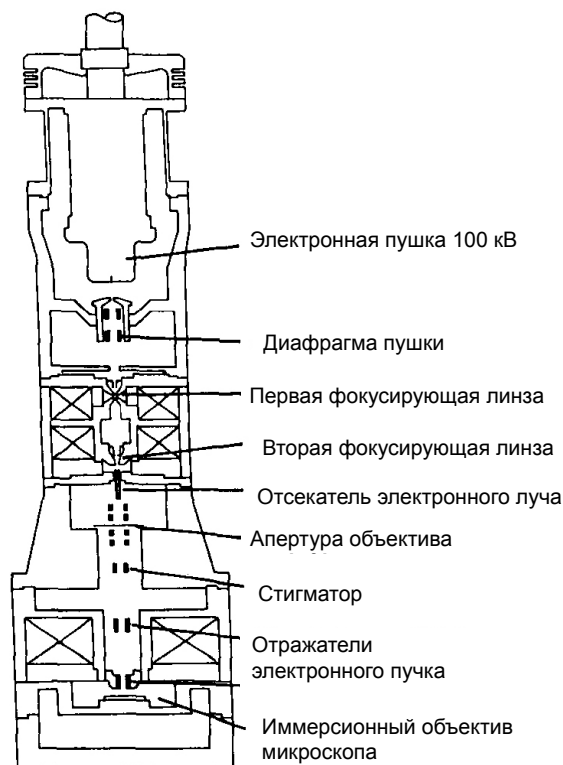
В наносистемотехнике, однако, как и в макросистемотехнике, даются не только алгоритмические описания исследовательской деятельности, что было показано выше, но и строятся алгоритмы проектирования наноструктур, например формирования квантовой проволоки или точки методом электронно-лучевой литографии (рис. 3.46) [55, с. 200–201].



**Рис. 3.46.** Этапы формирования квантовой проволоки или точки методом электронно-лучевой литографии: *а* – изначальная покрытая защитным слоем квантовая яма на подложке; *б* – облучение образца через маску; *в* – конфигурация после растворения проявителем облученной части радиационно-чувствительного защитного слоя; *г* – формирование маски для последующего травления; *д* – состояние после удаления оставшейся части чувствительного защитного слоя; *е* – состояние после травливания частей материала квантовой ямы; *ж* – окончательный вид наноструктуры после удаления маски травления [55]

При этом сканирующий электронный микроскоп, например, превращается из сложного экспериментального прибора одновременно в промышленную установку Nanowriter электронно-лучевой литографии для производства наноструктур (рис. 3.47) [105, р. 1145].

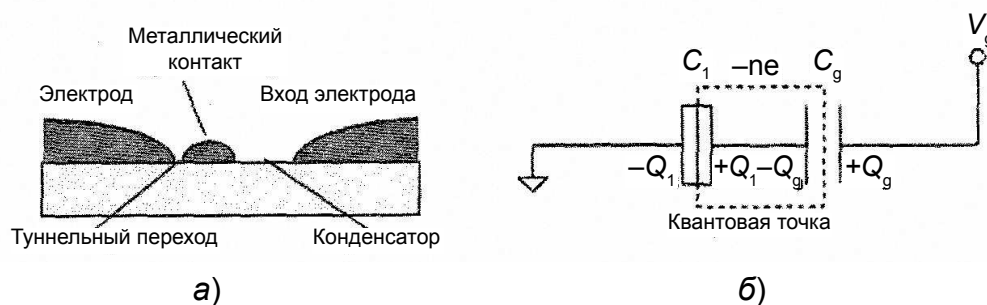
Таким образом, в основе нанонауки и нанотехнологии лежат схематические представления, замещающие «предмет опыта» «предметом познания», т. е. интерпретационным конструктом, представляющим собой идею или понятие, причем содержащим то, что еще и не найдено в опыте, выражающем извечное стремление человека к построению единой картины мира [106, с. 269, 274]. Это стремление проявляется и на уровне общенаучной картины мира, и на уровне отдельных научных понятий.



**Рис. 3.47.** Nanowriter – прибор для научного исследования и одновременно для фабрикации наноструктур [Там же]

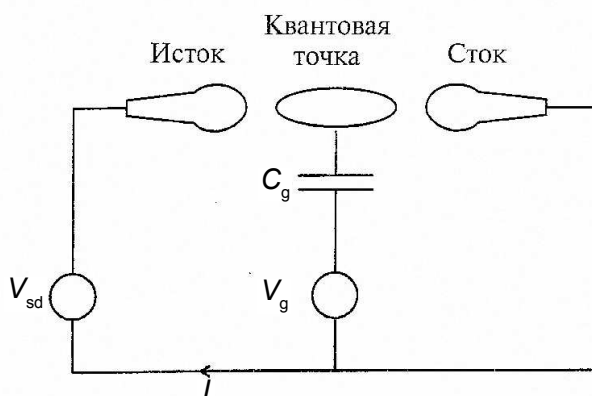
По Канту, в основе научных понятий лежат не образы, но схемы: «представление о всеобщем способе, каким способность воображения доставляет понятию его образ, я называю схемой [для] этого понятия» [107, с. 259; 108, s. 35–36]. В этом смысле схема понятия, например фуллерена, возникает в нанотехнологии еще до всяких или, по крайней мере, полноценных опытных данных, которые лишь дополняют эту схему частными результатами измерений и наблюдений. Сама же эта схема как абстрактный объект (предмет познания) позволяет распознать во все новых экспериментальных ситуациях действительный эмпирический объект (предмет опыта).

Таким образом, как и в любой технической теории, в нанотехнологии строятся теоретические схемы замещения, позволяющие производить различные вычисления и конструировать структурные схемы наносистем (рис. 3.48). Входящие в них конструктивные блоки, однако, могут иметь различную физическую основу. Вокруг каждого такого блока группируются особые теоретические знания. Другими словами, эти блоки сами представляют собой различные частные теоретические схемы, являющиеся, в свою очередь, обобщением «конструктивных» схем конкретных наносистем. Для более наглядного описания этой процедуры вводятся более абстрактные и более крупные блоки, а сама схема замещает более сложное описание этой модели во всех подробностях.



**Рис. 3.48.** Структура переключателя, выполненного с помощью одного электрона (а) и призванного осуществить функции транзистора, может быть описана с помощью эквивалентной цепи (б) [53, р. 149]

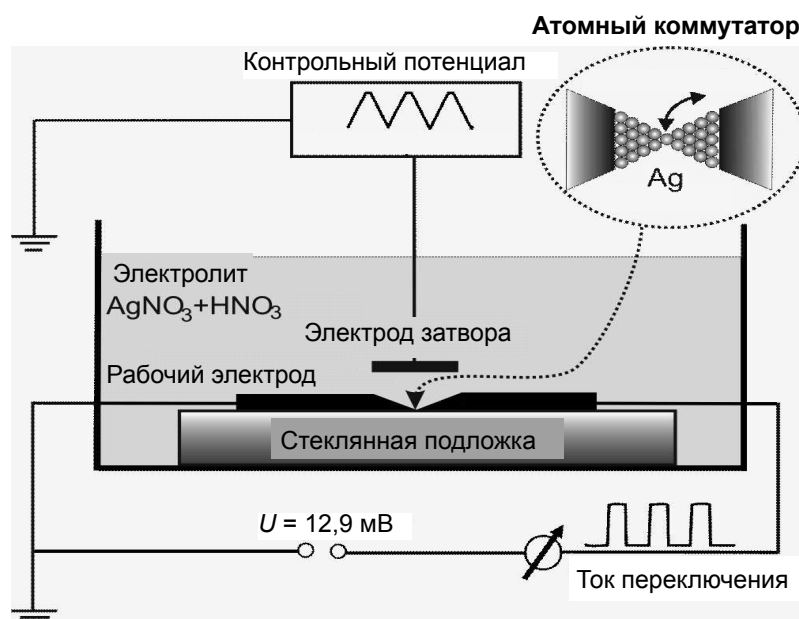
Абстрактные структурные схемы наносистемотехники могут быть представлены, например, квантовыми цепями (рис. 3.48) или схемой одноэлектронного блока (рис. 3.49).



**Рис. 3.49.** Схема квантовой цепи: трехэлектродное управляемое устройство на основе квантовой точки. Подключение к внешней цепи осуществляется с помощью электродов «исток» и «сток», на которые подается напряжение  $V_{sd}$ . Подавая на третий электрод – «затвор», емкостно связанный с квантовой точкой, напряжение  $V_g$ , можно управлять сопротивлением электрически активной области [55, с. 245]

Таким образом, как видно из приведенных выше примеров, в наносистемотехнике конструируются структурные схемы новых наносистем, как, например, транзистор, который работает на атомарном уровне (рис. 3.50) и «может переключаться с квантованного токопроводящего состояния “Включено” на непроводящее состояние “Выключено” и обратно с помощью подачи управляющего напряжения на третий независимый электрод. Для этой цели точечный контакт формируется на атомарном уровне путем электрохимического осаждения серебра внутри промежутка нанометрического размера между двумя золотыми электродами, которое впоследствии может быть удалено или снова нанесено, позволяя таким образом открывать и закрывать этот промежуток».

Здесь имеет место эффект электрохимического циклического процесса и обсуждается «механизм формирования и действия квантового транзистора атомарного уровня» [109].

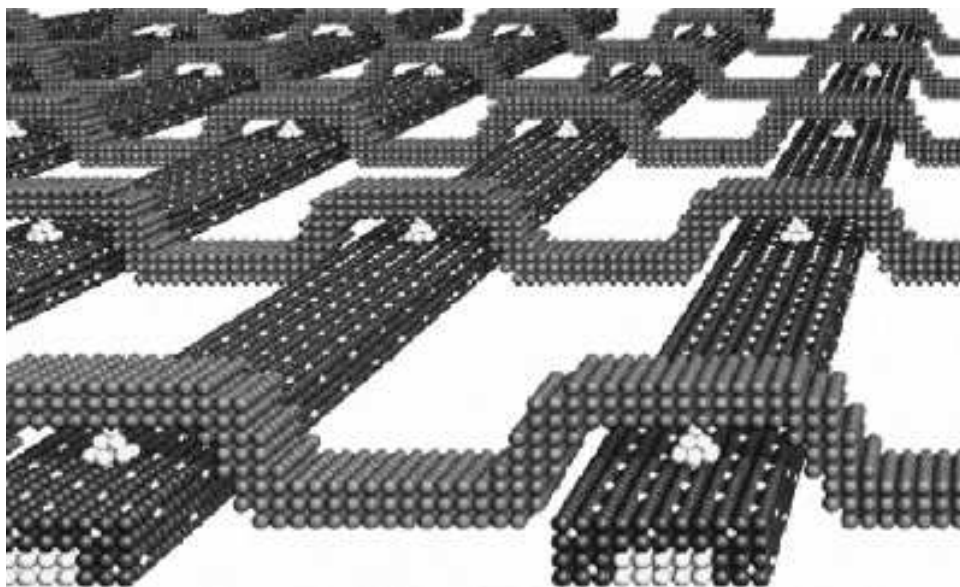


**Рис. 3.50.** Иллюстрация экспериментального устройства, работающего как нанотранзистор, где серебряные квантовые точечные контакты выращены электрохимическим способом внутри нанозазора между двумя электродами, осажденными на подложке из стекла. После повторного электрохимического процесса осаждения/растворения формируется бистабильная (т. е. с двумя устойчивыми состояниями) конфигурация контакта. Воспроизводимое коммутирование контакта между двумя рабочими серебряными электродами достигается с помощью независимого электрода затвора [110, p. 14]

Важной сферой так называемого «молекулярного производства» является *системное проектирование* чрезвычайно сложных молекулярных систем<sup>1</sup>. «Поскольку переключатели являются такими крошечными, они функционируют на уровне квантовой физической

<sup>1</sup> «Хотя проектирование должно осуществляться преимущественно раздельно на уровне подсистем, большое количество вычислений, требуемое для проектирования и оценки, является весьма важным. Эксплуатационная оценка таких технических ограничений, как, например, физическая совместимость и химическая стабильность, также является необходимой» (см.: *Huw Arnall A. Future Technologies, To day's Choices Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; A technical, political and institutional map of emerging technologies. A report for the Greenpeace Environmental Trust. Department of Environmental Science and Technology Environmental Policy and Management Group, Faculty of Life Sciences, Imperial College London, University of London, Juli 2003. www.greenpeace.org.uk*).

реальности, что открывает возможность использования этого переключателя для создания многобитового запоминающего устройства... Исследователи используют эти переключатели также для построения стандартных двоичных логических вентилей, необходимых для создания микропроцессоров» (рис. 3.51) [111, р. 16].



**Рис. 3.51.** Расположение электромеханических переключателей на наноуровне. Светлые пирамидки под мостиками — это кусочки серебра, которые формируются при наличии электрического напряжения. Эти серебряные пирамидки закрывают промежуток и включают переключатель<sup>1</sup>

Таким образом, наносистемотехника может быть рассмотрена как «совокупность методов моделирования, проектирования и конструирования изделий различного функционального назначения, в том числе наноматериалов, микро- и наносистем с широким использованием квантово-размерных, кооперативно-синергетических, гигантских эффектов и других явлений и процессов, проявляющихся в условиях материальных объектов с нанометрическими характеристическими размерами элементов» [112, с. 32, 212].

### 3.5.6. Новейшая история развития нанотехнологии как технонауки

В современной науке происходят лавинообразные изменения, свидетелями которых становятся представители одного поколения. Даже фундаментальные исследования в естествознании становятся

---

<sup>1</sup> <http://www.trnmag.com/Photos/2005/012605/Nano%20bridge%20builds%20logic%20Image.html>



все более проблемно- и проектно-ориентированными на решение конкретных научно-технических задач, что делает их весьма сходными с технической наукой и находит свое выражение в обозначении этого нового этапа развития науки — технонауки, наиболее ярким представителем которой является нанотехнология. Нанотехнология признана ключевой научной сферой не только потому, что она ведет к изменению всего современного научно-технического ландшафта, но прежде всего потому, что общество в ближайшем будущем ожидает от нее позитивных экономических, экологических и социальных результатов. В связи с процессами сращивания науки и техники, например в нанотехнологии, возникает целый ряд новых, по сути дела, науковедческих проблем, настоятельно требующих своего специального рассмотрения. Несмотря на то что нанотехнология — наука молодая, можно говорить уже об этапах ее исторического развития.

**Результаты наукометрического анализа развития технонауки.** Нанотехнология является, с одной стороны, проектно-ориентированной наукой, а с другой — в ней важнейшую роль продолжают играть фундаментальные исследования, о чем свидетельствует табл. 3.1 [113, s. 113].

Таблица 3.1

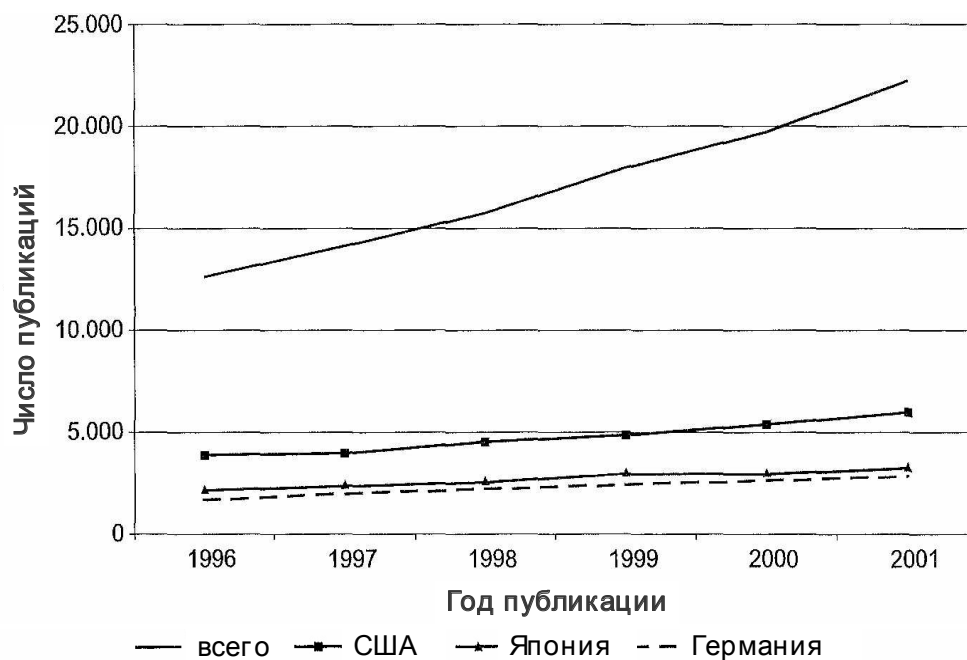
**Публикации в целом по SCI и в области  
нанотехнологии в 2001 г. в мире в целом**

	<b>Число публикаций</b>	<b>Доля, %</b>
<i>Наука в целом:</i>		40
Чисто фундаментальные исследования	229 553	28
Фундаментальные исследования, ориентированные на приложения	156 713	21
Технические науки	118 750	11
Прикладная технология	63 349	
<i>Нанонаука:</i>		
Чисто фундаментальные исследования	9 772	47
Фундаментальные исследования, ориентированные на приложения	8 150	39
Технические науки	2 799	13
Прикладная технология	37	1

**Источник:** Science Citation Index (SCI)

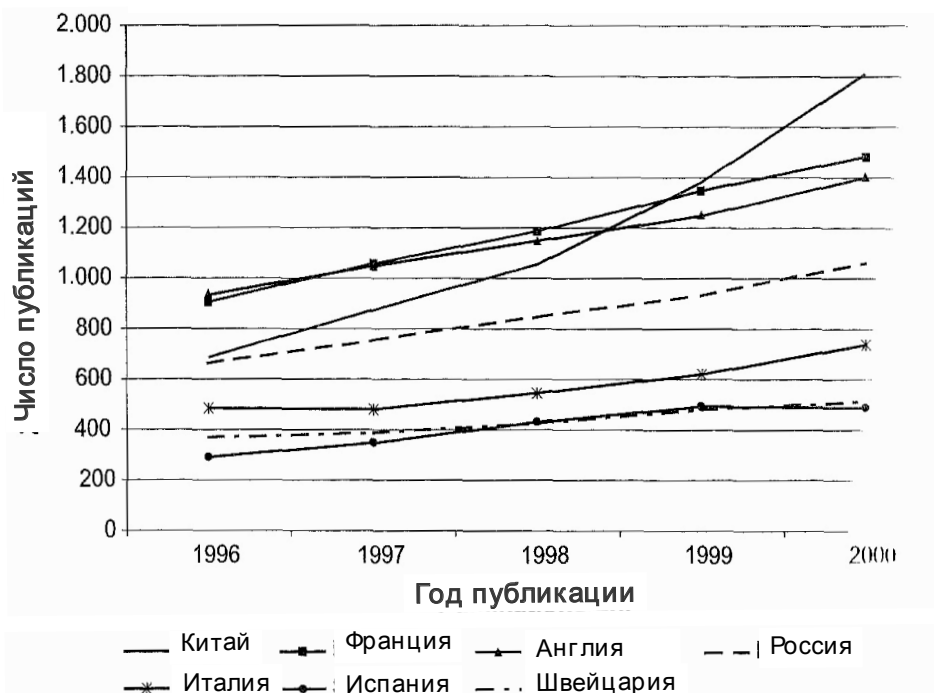
В этой таблице приведены данные о процентном соотношении публикаций по чисто фундаментальным исследованиям, фундаментальным исследованиям, ориентированным на приложения, инженерно-техническим разработкам и прикладным технологиям по всей науке вообще и отдельно по нанотехнологии. Как видно, доля чисто фундаментальных исследований по науке в целом составляет 40 %, то по нанотехнологии она выше — 47 %. Доля фундаментальных исследований, ориентированных на приложения, составила соответственно 28 и 39 %, а инженерно-технические разработки — только 21 и 11 %. Доля же публикаций по прикладным технологическим применениям в нанотехнологии исчезающе мала. Библиометрические исследования нанотехнологии демонстрируют отчетливый рост и публикационного массива. Начиная с 1992 г., средний годовой прирост числа публикаций по нанотехнологии составляет 20 % [113, s. 108, 109].

Германскими учеными проведена социальная оценка развития нанотехнологии в Германии. Основные исследования в этой области основываются на подсчете роста числа публикаций во времени. На рис. 3.52 показан сравнительный рост числа публикаций по нанотехнологии вообще в мире, в США, Японии и Германии (которые занимают первые три места по числу публикаций в области нанотехнологии) с 1996 по 2001 г. Из этого графика видно, что число публикаций отчетливо растет, а опережающей страной по числу публикаций в этой области оставались США [56, s. 52].



**Рис. 3.52.** Сравнительный график роста числа публикаций по нанотехнологии в мире, США, Японии и Германии

На рис. 3.53 показан сравнительный рост публикаций по нанотехнологии в Китае, Франции, Великобритании, России, Италии, Испании и Швейцарии. Как видно, Россия занимает устойчивое срединное положение, а рост числа китайских публикаций по нанотехнологии с 1998 г. резко возрастает и к 2000 г. выходит на четвертое место [Там же, s. 53].



**Рис. 3.53.** Сравнительный график роста числа публикаций в области нанотехнологии в 1996–2000 гг.

Об экспоненциальном развитии нанотехнологии свидетельствует рост финансирования исследований и разработок в этой области в экономически развитых странах уже в начале нового столетия.

**Основные периоды развития нанотехнологии.** Исходя из результатов биометрических исследований, развитие нанотехнологии можно разделить на три временные периода.

Первый период (1984–1994 гг.) связан с началом проведения в первую очередь фундаментальных исследований в наносфере и появлением понятия «нано». В это время появляются и первые исследовательские институты, использующие в своих названиях обозначение «нано», и первые публикации по нанотехнологии. В 1984 г. компания Nanometr Inc. (Калифорния, США), работавшая в области полупроводников, выпустила первые три публикации, а двумя годами позже был основан первый академический институт на электротехническом факультете университета в Глазго (Великобритания). Эта исследовательская группа по наноэлектронике два года спустя превратилась уже в исследовательский центр.

В 1987 г. Корнельский университет дает новое название «Национальный факультет нанопроизводства» факультету исследования субмикронных структур, который был основан Национальным научным фондом в 1977 г. На долгие годы этот факультет становится одной из самых активных исследовательских организаций в области нанотехнологий.

В 1988 г. японская корпорация исследовательских разработок запускает проект по наномеханизмам, который до 1993 г. остается единственным нанотехнологическим исследовательским институтом Японии. С 1990 г., однако, доминирующим в сфере нанонауки институтом становится Национальная лаборатория наноустройств на Тайване.

В течение 1990-х гг. в США и Европе возникает множество исследовательских институтов по нанотехнологии. В США в 1993 г. даже создается целая скоординированная сеть таких исследовательских организаций нескольких американских университетов. Однако наиболее активные лаборатории и центры нанотехнологических исследований существуют в США в целом ряде университетов независимо от этой сети. Внеуниверситетские государственные исследовательские организации США, напротив, в 1990-х годах демонстрируют отсутствие интереса к нанотехнологической области (за исключением Лаборатории военно-морского флота США). Только начиная с 1999 г. в них появляются небольшие подразделения нанотехнологического толка, но их вклад в публикационный массив нанотехнологической литературы остается весьма незначительным. Университетские же исследовательские организации продолжают развиваться и далее, выдавая треть всех публикаций по нанотехнологии в США. В Европе институализация нанотехнологических исследований также начинается в 1990-х гг. главным образом в университетах [114, р. 677–678].

Второй период (1995–2000 гг.) характеризуется выходом в свет первых обобщающих монографических работ<sup>1</sup> и повсеместным распространением понятия нанотехнологии, а также появлением первых многообещающих прикладных разработок, находящихся, впрочем, на разной стадии реализации.

В 1999 г. Исследовательский центр г. Карлсруэ (Германия) открывает совместно с Техническим университетом г. Карлсруэ большой Нанотехнологический институт, в 1997 г. Национальный исследовательский совет Испании начинает финансировать нанолaborаторию в Мадриде. В Японии нанотехнологические исследования в течение последних десяти лет финансируются в рамках Атомного технологического проекта [114, р. 678–679]. Для этого периода характерно фор-

---

<sup>1</sup> См., например: *Drexler K.E. Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation.* John Wiley & Sons, Inc, 1998.1

мировое устойчивого нанотехнологического исследовательского сообщества, уже идентифицируемого самими исследователями, но еще мало заметного для широкой общественности (см. табл. 3.1, демонстрирующую взрывной рост числа публикаций в средствах массовой информации по проблемам нанотехнологии начиная с 2000 г.).

Для третьего периода (2000–2007 гг.) характерно, с одной стороны, взрывное развитие научно-популярной литературы по нанотехнологии и различного рода публикаций, исследующих саму нанотехнологию как новейшее научно-техническое направление, и появление первой учебной литературы [115], а с другой – формирование перспектив становления новой нанотехнологической промышленности. Начало этого периода связано с тем, что именно в январе 2000 г. президент США Клинтон учредил так называемую Национальную нанотехнологическую инициативу (NNI), которая включила в себя почти все главные министерства и ведомства с целью координации нанотехнологических исследований и разработок в национальном масштабе. До 2000 г. институализация нанотехнологических исследований в США происходила значительно медленнее, чем в Европе и Азии. С образованием NNI этот процесс значительно ускорился.

Начиная с 1999 г. многочисленные наноинституты были организованы в Китае. В 2004 г. мировые инвестиции в сферу разработки нанотехнологий по сравнению с 2003 г. почти удвоились и достигли \$10 млрд. Финансирование нанотехнологии в Германии только через Федеральное министерство образования и научных исследований составило к 2003 г. 112,1 млн евро [56, s. 58].

Таким образом, в это время лавинообразно растет финансирование через национальные проекты и со стороны фирм. Нанотехнология приобретает характер широкого научного движения. Под знамена этого направления встает все большее количество отдельных исследователей, исследовательских групп, исследовательских институтов и центров, которые используют бренд «нано», образуя глобальную нанотехнологическую сеть.

В этот период нанотехнология попадает в фокус библиометрического анализа, но анализируется лишь второй период ее развития. Это обусловлено тем, что именно с этого времени происходит самоидентификация исследователей и в название их работ попадает понятие «нано». Иначе просто невозможно в социометрическом анализе по формальным основаниям отделить нанорелевантные работы от публикаций в других, возможно весьма близких содержательно, областях исследования.

Третий период захватывается пока лишь частично, поскольку библиометрические данные или труднодоступны в силу разных причин, или результаты таких исследований носят пока закрытый

характер, или еще не опубликованы в широкой печати. Тем не менее Й. Шумер (Германия) — главный редактор журнала по философии химии *HYLE: International Journal for Philosophy of Chemistry* — провел подробное исследование различных аспектов институализации нанотехнологических исследований и разработок начиная с 1992 г. и кончая 2006 г. Он проводит сравнение динамики институционального роста нанотехнологии и таких уже устоявшихся областей науки, как физика и материаловедение по одинаковым показателям и с помощью корреспондирующих методов измерения. Из сравнения видно, что институциональный рост физики, соответствующий институциональному росту науки в целом, составляет только 4,4 % в год, в материаловедении — 10,8 %, а в нанотехнологии он просто астрономический — 54 %. Этот взрывной рост сохраняется уже почти 20 лет и удваивается каждые 19 месяцев. Как говорится, комментарии излишни. Конечно, как показывают биометрические исследования роста научных публикаций в 60-е гг. XX в., проведенные в науковедении, этот рост в конечном счете стабилизируется и кривая станет более пологой, что мы, собственно, и видим на примере физики. Поэтому выводы Шумера [114] об экстраполяции этих кривых на последующие несколько лет следует принимать с осторожностью.

Можно сказать, что, являясь междисциплинарным направлением науки, нанотехнология уже консолидировалась как новая область исследования, состоящая из нескольких исследовательских направлений и предполагающая развитие организационных форм научной коммуникации — советы, ассоциации, научные собрания, конференции и т. д. Однако для становления научной дисциплины требуется добавить к этому еще и *организацию подготовки научных кадров* (курсы и кафедры в высших учебных заведениях), а также формирование особого эшелона публикаций — учебников. В этом отношении нанотехнология еще только вступает в стадию создания системы подготовки научных кадров и специализированного *исследовательского сообщества*, хотя уже имеет частично сформировавшуюся (и активно в настоящее время формирующуюся) профессиональную организацию — лаборатории, научно-исследовательские институты, ученые советы и др.

Многие университеты США, Европы и Австралии уже проводят нанорелевантные курсы [53, р. 440]. Эти курсы классифицируются по их нахождению, например в центрах нанотехнологии или же на физических факультетах, а также по их направленности на более фундаментальные темы или имеющие инженерную ориентацию. Проведенный анализ курсов по нанотехнологии, читаемых сегодня на уровне подготовки магистра, ясно показал, что организовать систему обучения в этой области, одновременно покрывающую все аспекты нанонауки и нанотехнологии, практически нельзя. Более

того, если осуществлять подготовку магистров согласно Болонскому процессу (один год обучения или 60 кредитных курсов и один семестр проектной работы), невозможно подготовить полноценного специалиста в этой, по сути дела, междисциплинарной области науки и техники. Следовательно, академическое обучение в сфере нанотехнологии должно иметь трехступенчатую организацию:

1. Получение степени бакалавра в одной из существующих областей науки, вроде физики, биологии или технических наук.

2. Обучение на уровне магистра в области нанонауки или нанотехнологии.

3. Аспирантская программа по нанотехнологии/нанонауке [53, р. 440].

Следующий вывод из проведенного исследования гласит, что учебный план подготовки нанотехнологов на соответствующих факультетах не сильно отличается от программ этих факультетов (например, физиков, химиков, биологов или специалистов в технической науке). Это отнюдь не исключает, но даже предполагает наличие особых курсов типа «Введение в нанотехнологию» вне факультетских программ для повышения мотивации студентов специализироваться именно в этой области.

Институализация нанотехнологии в университетах осуществляется в форме создания как лабораторий и исследовательских групп, так и факультетов и центров. Второй тип организации наноисследований преследует в первую очередь цели обучения, а первый — концентрируется на исследованиях и разработках. Существуют также иные формы организации нанотехнологических исследований и разработок — программы, инициативы, проекты и т.д., которые однако не играют заметной роли в процессе институализации нанотехнологии [114]<sup>1</sup>. Это подтверждает тенденцию к организации не только исследовательского сектора нанотехнологии, но и системы нанотехнологического образования, что в конечном счете может считаться вступлением этой междисциплинарной области науки и техники в состав научно-технических дисциплин, хотя и совершенно нового типа, где междисциплинарность сочетается с дисциплинарностью, а исследование с проектированием. Впрочем, это становится отличительной особенностью современной (постнеклассической) техники. Сюда же следует еще добавить встраивание в новую дисциплинарную структуру также исследований социальных последствий нанотехнологии, наноэтику и многочисленные наноутопии.

---

<sup>1</sup> В заключение Шумер делает вывод, что процесс институализации в области нанотехнологии в рамках университетов начался примерно в 1998 г. с относительно низкого уровня и достиг пика к 2006 г., когда университетская форма институализации составила 80% общего числа всех возможных таких форм.

## Литература

1. *Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С.* Введение в радиолокационную системотехнику. М.: Сов. радио, 1971.
2. *Гуд Г.Х., Макол Р.Э.* Системотехника. Введение в проектирование больших систем. М., Сов. радио, 1962 (оригинальное издание: *Good H.H., Machol R.E.* System Engineering. An Introduction to the Design of Large—Scale Systems. N.Y., Toronto, London: McGraw—Hill Book Co., Inc., 1957).
3. Systems Engineering. Methodik und Praxis. 10. Aufl. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 1999.
4. *Jenkins G.M., Youle P.V.* Systems Engineering. A Unifying Approach in Industry and Society. L.: Watts, 1971.
5. *Aslaksen E., Belcher R.* Systems Engineering. N.Y., L.: Prentice Hall, 1992.
6. *Hall A.D., Fagen R.E.* Definition of System // Systemtheorie und Systemtechnik. Hrsg. F. Handle und S. Jensen. München: Nymphenburger Verlagshandlung, 1974.
7. Handbook of Systems Engineering and Management / A. P. Sage, W.B. Rouse. N.Y.: John Wiley & Sons, 1999.
8. *Bertalanffy L. von.* The History and Status of General Systems Theory // Systemtheorie und Systemtechnik. Hrsg. F. Handle und S. Jensen. München: Nymphenburger Verlagshandlung, 1974.
9. *Садовский В.Н.* Основания общей теории систем. М.: Наука, 1974.
10. *Laslo E.* Introduction to Systems Philosophy. Toward a New Paradigm of Contemporary Thought. N.Y.: Cordon and Breach, Science Publication, 1972.
11. *Ropohl G.* Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der Allgemeinen Technologie. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1979.
12. *Бусленко В.Н.* Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. М.: Наука, 1977.
13. *Мартин Ф.* Моделирование на вычислительных машинах. М.: Сов. радио, 1972.
14. *Нейлор Т.* Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем. М.: Мир, 1975.
15. *Шэннон Р.* Имитационное моделирование систем: искусство и наука. М.: Мир, 1978.
16. *Barton D.* Radar System Analysis. Prentice-Hall, 1964.
17. *Нечипоренко В.И.* Структурный анализ систем (эффективность и надежность). М.: Сов. радио, 1977.
18. *Серебренников Г.Г.* Структурный анализ производственных систем: принципы, элементы и методы. — Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006.
19. *Long J.* Relationships between Common Graphical Representations in System Engineering. Vitech Corporation, 2002.



20. *Hubka V., Eder E.* Theoretical Approach to Design Methodology // Designers. The Key to Successful Product Development. L.: Springer, 1998.
21. *Shenhar A.J.* Systems Engineering Management: The Multidisciplinary Discipline // Handbook of Systems Engineering and Management / A. P. Sage, W.B. Rouse. N.Y.: John Wiley and Sons, 1999.
22. *Hubka V., Schregenberger J.* Paths towards design science // Proceedings of the 1987 international conference on engineering design. N.Y.: The American Society of Mechanical Engineers, 1987.
23. *Suh N.P.* The principles of design. N.Y., Oxford: Oxford University Press, 1990.
24. *Eder E.* Theory of technical systems – prerequisite to design theory // Proceedings of the 1987 international conference on engineering design. N.Y.: The American Society of Mechanical Engineers, 1987.
25. *Kurumatani K., Yoshikama H.* Representation of design knowledge based on general design theory // Ibid.
26. *Daenzer W.F., Huber F.* Systems Engineering. Methodik und Praxis. 7. Aufl. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 1992.
27. *Сколник М.* Введение в технику радиолокационных систем. М.: Сов. радио, 1965.
28. Теоретические основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1970.
29. *Богомолов А.Ф.* Радиолокационная станция // Большая Советская Энциклопедия: в 30 т. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.
30. *Попов Е.П.* Следящая система // Большая Советская Энциклопедия: в 30 т. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.
31. Моделирование в радиолокации. М.: Сов. радио, 1979.
32. *Вакман Д.Е., Седлецкий Р.М.* Вопросы синтеза радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1973.
33. *Первов М.А.* Зенитное ракетное оружие противовоздушной обороны страны (Интернет-изд.). М.: АвиаРус-XXI, 2003.
34. *Chertok B.E.* Rockets and People: Creating a Rocket Industry (Vol. II). Washington, DC: NASA History Division, 2006.
35. *Черток Б.Е.* Ракеты и люди. – 2-е изд. М.: Машиностроение, 1999.
36. *Альперович К.С.* Годы работы над системой ПВО Москвы. 1950–1955. Записки инженера. М.: НПО «Алмаз», 2003.
37. *Малиновский Б.Н.* История вычислительной техники в лицах. – <http://www.lib.ru/MEMUARY/MALINOWSKIJ/0.txt>
38. *Snow C.P.* Science and Government. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1961.
39. *Aggteleky B.* Systemtechnik in der Fabrikplanung. München/Wien: Hanser, 1973.
40. *Willeke S.* Die Technokratiebewegung zwischen den Weltkriegen und der «Kulturfaktor Technik» // Technische Intelligenz und «Kulturfaktor Technik». Münster, New-York, München, Berlin: Waxmann, 1996.

41. *Заде Л.* От теории цепей к теории систем // Труды института радиоинженеров, 1962. Т. 50. № 5. Ч. 1.
42. *Титов В.В., Горохов В.Г.* Методологические принципы формирования аппарата управления предприятием // Вопросы радиоэлектроники: науч.-техн. сб. Сер. Автоматизированные системы управления. М.: Министерство радиопромышленности СССР, 1972. Вып. 4.
43. Автоматизированные системы управления предприятия: сб. ст. Киев: Наукова думка, 1966.
44. *Черняк Ю.И.* Системный анализ в управлении экономикой. М.: Экономика, 1975.
45. *Первышин Э.К.* Кустовые автоматизированные системы управления // Вопросы радиоэлектроники: науч.-техн. сб. Сер. Автоматизированные системы управления. М.: Министерство радиопромышленности СССР, 1972. Вып. 4.
46. *Черняк Ю.И.* Анализ и синтез систем в экономике. М.: Экономика, 1970.
47. *Ренжин В.И., Горохов В.Г.* Метод функционально-ориентированного конструирования АСУ // Техника средств связи: науч.-техн. сб. Сер. Автоматизированные системы управления (АСУ). М.: Министерство радиопромышленности СССР, 1977. Вып. 1 (3).
48. *Матаев В.Я., Горохов В.Г., Скарин Г.Г.* К проблеме методологического анализа систем оперативно-производственного планирования на предприятиях // Вопросы радиоэлектроники: науч.-техн. сб. Сер. Автоматизированные системы управления. Министерство радиопромышленности СССР, 1972. Вып. 4.
49. *Глушков В.М.* Введение в АСУ. Киев: Техника, 1972.
50. *Drexler K.E.* Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation. John Wiley & Sons, Inc., 1998.
51. *Discovering the Nanoscale / Eds. D. Baird, et al.* Amsterdam: IOS Press, 2005.
52. *Асеев А.Л.* Нанотехнологии в полупроводниковой электронике // Вестник РАН. 2006. Т. 76. № 6.
53. *Schmid G. et al.* Nanotechnology. Assessment and Perspectives. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
54. *Schummer J.* Cultural diversity in nanotechnology ethics // Interdisciplinary science review. 2006. Vol. 31. №. 3.
55. *Пул-мл. Ч., Оуэнс Ф.* Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2006.
56. *Paschen H., Coenen Chr., Fleischer T. u.a.* Nanotechnologie. Forschung, Entwicklung, Anwendung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2004.
57. *Hacking I.* Representing and Intervening. Cambridge – New York: Cambridge University Press 1983.
58. *Giare R.N.* Explaining Science: The Cognitive Approach. Chicago – London: Chicago University Press, 1988.

59. Ленк Х. Эпистемологические заметки относительно понятий «теория» и «теория проектирования» // *Философия, наука, цивилизация*. М.: Эдиториал УРСС, 1999.
60. Berger M. Molecular delivery system could lead to blood tests using a cell phone // Nanowerk LLC, 2008.
61. Ohno H. Properties of ferromagnetic III–V semiconductors // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1999. Vol. 200.
62. Kim W.Y., Kim K.S. Tuning Molecular Orbitals in Molecular Electronics and Spintronics // *Accounts of Chemical Research*. 2010. Vol. 43. № 1.
63. Мир материалов и технологий. Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения – 2008 год: сб. / под ред. П.П. Мальцева. М.: Техносфера, 2008.
64. Печенкин А.А. Леонид Исаакович Мандельштам. Исследование, преподавание и остальная жизнь. М.: Логос, 2011.
65. Capra F. *Wendezeit. Bausteine für ein neues Weltbild*. Berlin, München, Wien & Scherz, 1982.
66. Lenk H. Zu einem methodologischen Interpretationskonstruktionismus // *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*. 1991. № 22.
67. Lenk H. *Interpretation und Realität*. Frankfurt a. M.: Suhrkamp, 1993.
68. Lenk H. *Erfassung der Wirklichkeit. Eine interpretationsrealistische Erkenntnistheorie*. Würzburg: Königshausen & Neumann, 2000.
69. Kuhn T. *Kopernikanische Revolution*. Braunschweig – Wiesbaden: Vieweg, 1981.
70. Степин В.С. Теоретическое знание. М.: Прогресс-Традиция 2000.
71. Кант И. Сочинения на немецком и русском языках. М.: Наука, 2006.
72. Кондильяк Э.Б. де. Трактат о системах в которых вскрываются их недостатки и достоинства. М.: Гос. соц.-экон. изд-во, 1938.
73. Ахутин А.В. История принципов физического эксперимента (от античности до XVII века). М.: Наука, 1976.
74. Платон. Соч.: в 3 т. М.: Мысль, 1968. Т. 1.
75. Зубов В.П. Аристотель. М.: АН СССР, 1963.
76. Аристотель. Соч.: в 4 т. М.: Мысль, 1981. Т. 3.
77. Декарт Р. Избр. произведения. М., 1950.
78. Гайденко П.П. Эволюция понятия науки (XVII–XVIII вв.). М.: Наука, 1987.
79. Галилей Галилео. Избр. труды: в 2 т. М.: Наука, 1964.
80. Асеев А.Л. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике // *Вестник РАН*. 2006. Т. 76. № 6.
81. Зубов В.П. Леонардо да Винчи. М.: АН СССР, 1961.
82. Ахундов М.Д., Баженов Л.Б. Философское понятие материи и развитие физики элементарных частиц // *Философия физики элементарных частиц (тридцать лет спустя)*. М.: ИФРАН, 1995.

83. *Шюмм Х.П.* Современность Декарта // Ежегодник Российско-Германского колледжа 1999/2000 / под. ред. В.Г. Горохова. М.: Изд-во МНЭ-ПУ, 2000.
84. *Schütt H.-P.* Substanzen, Subjekte und Personen. Eine Studie zum Cartesischen Dualismus. Heidelberg: Mautius Verlag, 1990.
85. *Dudia A.* Nanofabricated Biohybrid Structures for Controlled Drug Delivery Proefschrift Universiteit Twente. Enschede: Gildeprint Drukkerijen B.V., 2007.
86. *Psaro R., Guidotti M., Sgobba M.* Nanosystems // Inorganic and Bio-inorganic Chemistry Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Developed under the Auspices of the UNESCO. Eolss Publishers, Oxford, UK, 2006.
87. *Holliday L.* Atomismus und Kräfte in der Geschichte // Newtons Universum. Materialien zur Geschichte des Kraftbegriffes. Heidelberg.: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, 1990.
88. *Kurniawan F.* New Analytical Applications of Gold Nanoparticles. Dissertation, Faculty of Chemistry and Pharmacy. University of Regensburg, Germany, 2008.
89. *Verhoeven J.D., Pendray A.H., Dauksch W.E.* The Key Role of Impurities in Ancient Damascus Steel Blades // JOM. 1998. Vol. 50. №. 9.
90. *Аристотель.* Метафизика. М.-Л.: Гос. Соц.-эконом. изд-во, 1934.
91. *Barnes J.* Metaphysics // The Cambridge Comparison to Aristotle. Cambridge University Press, 1995.
92. *Аристотель.* Физика. М.-Л.: Гос. соц.-эконом. изд-во, 1937.
93. *Soentgen J.* Atome Sehen, Atome Hören // Nanotechnologien im Kontext. Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektive. Berlin: Akademische Verlagsgesellschaft Aka GmbH, 2006.
94. *Молчанов Ю.Б.* Современные аспекты проблематики ЭПР-парадокса // Философия физики элементарных частиц (тридцать лет спустя). М.: ИФРАН, 1995.
95. *Lehard J.* Mit dem Unerwarteten rechnen? Computersimulation und Nanowissenschaft // Nanotechnologien im Kontext. Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektive. Berlin: Akademische Verlagsgesellschaft Aka GmbH, 2006.
96. *Прокл Дуадох.* Комментарий к Первой книге «Начал» Евклида. Введение. М.: Греко-латинский кабинет, 1994.
97. *Schmitz M.* Euklids Geometrie und ihre mathematiktheoretische Grundlegung in der neoplatonischen Philosophie des Proklos. Würzburg: Königshausen & Neumann, 1997.
98. *Lenk H.* Schemaspiele: über Schemainterpretation und Interpretationskonstrukte. Frankfurt a.M.: Suhrkamp Verlag, 1995.
99. *Azevedo S., Mcewan T.E.* Micro Power Impulse Radar // Science & Technology Review January/February, 1996.
100. *Hilbert D.* Wissen und Mathematisches Denken. Vorlesung 1922/23. Überarbeiteter Nachdruck. Göttingen: Mathematisches Institut, 1988.

101. *Hempel C.* Grundzüge der Begriffsbildung in der empirischen Wissenschaft. Düsseldorf: Bertelsmann Universitätsverlag, 1974.
102. *Lenk H.* Einführung in die Erkenntnistheorie. München: Wilhelm Fink Verlag, 1998.
103. *Bohm D.* Die implizite Ordnung. Grundlagen eines dynamischen Holismus. München: Dianus-Trkont Buchverlag GmbH, 1985.
104. *Carnap K.* Der Raum. Ein Beitrag zur Wissenschaftslehre. Berlin: Verlag von Reuther & Reichard, 1922.
105. *Ahmed H.* Nanostructure Fabrication // Proceedings of the IEEE. 1991. Vol. 79. № 8.
106. *Lenk H.* Vernunft als Idee und Interpretationskonstrukt. Zur Rekonstruktion des Kantischen Vernunftbegriffs // Zur Kritik der wissenschaftlichen Rationalität. Freiburg/München: Karl Alber Verlag, 1986.
107. *Иммануил Кант.* Сочинения на немецком и русском языках. М.: Наука, 2006.
108. *Lenk H.* Denken und Handlungsbindung. Mentaler Gehalt und Handlungsregeln. Freiburg/München: Karl Alber Verlag, 1986.
109. *Xie F.-Q., Obermair Ch., Schimmel Th.* Configuring a Bistable Atomic Switch by Repeated Electrochemical Cycling // V International Conference on Microelectronics and Computer Science. Nanoscale Phenomena – Fundamentals and Applications. «NANO-2007». 20-22 September 2007, Kishinev, Moldova.
110. *Xie F. Q., Maul R., Augenstein A. et al.* Independently Switchable Atomic Quantum Transistors by Reversible Contact Reconstruction // NanoLetters. 2008. Vol. 8.
111. *Smalley E.* Nanobridge builds logic, 2005.
112. *Лучинин В.В.* Индустрия наносистем. Системный подход // Ч. Пул-мл., Ф. Оуэнс. Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2006.
113. *Heinze T.* Die Kopplung von Wissenschaft und Wirtschaft. Das Beispiel der Nanotechnologie. Frankfurt; New York, 2006.
114. *Schummer J.* The global institutionalization of nanotechnology research: A bibliometric approach to the assessment of science policy // Scientometrics. 2007. Vol. 70. № 3.
115. *Poole Ch.P. Jr., Owens J.Fr.* Introduction to nanotechnology. Wiley-Interscience: A John Wiley & sons, Inc., Publication, 2003.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Исследование социальных последствий техники и оценка рисков научно-технического развития как отличительная особенность современного этапа развития технических наук**

Техника является одной из важнейших составляющих современного мира. Без нее многие достижения человечества просто невозможно себе представить. Мощь техники часто иллюстрируют полетами в космос, постройкой гигантских электростанций и плотин, атомной бомбой, разрушающей целые города, и т. д. Однако главная особенность современной техники заключается в том, что она стала неотъемлемой частью многих аспектов нашей повседневной жизни. Мы используем технику буквально везде: дома, на транспорте, для обучения, игр и коммуникации, с ее помощью изготовлены наша одежда и жилище. Она становится даже определяющим фактором нашей социальной идентичности: тем, на каком автомобиле ездим, оценивается наше положение в обществе. В этом — кардинальное отличие современного мира от того, который окружал человека сто и даже несколько десятков лет назад.

«Техника определяет нашу современную жизнь». Именно такими словами начинается подготовленная Массачусетским технологическим институтом книга «Техника и общество: построение нашего социотехнического будущего» под редакцией Д. Джонсон и В. Джексона в 2008 г., представляющая собой сборник выпущенных за последние десятилетия статей различных авторов (Форстера, Фукуямы, Латура и др.) [1]. Объединяет все эти статьи рассмотрение техники как явления амбивалентного: с одной стороны, она отождествляется часто с самим прогрессом, поскольку позволяет решать нам те задачи, которые без нее не смогли бы решаться, а с другой — она зачастую одновременно привносит с собой негативные социальные и экологические эффекты, может использоваться одними группами людей против других или же для достижения деструктивных следствий, причем эти следствия могут проявляться постепенно и неожиданно. Кроме того, развитие и функционирование современной техники больше рассматриваются не как дело узких специалистов, призван-

ных осчастливить человечество, а как результат принятия решений многими акторами: от правительств до частных инвесторов, от ученых и инженеров, участвующих в разработке новой техники, до простых пользователей, решающих использовать ее у себя дома, в бюро или на заводе.

Из этого сборника наиболее отчетливо видно, что в центре внимания современных исследований техники находится не техника сама по себе, а процесс ее взаимодействия с обществом. Поскольку же отдельные индивиды, целые социальные институты или общество в целом вынуждены принимать решения о ее развитии, зачастую не имея достаточных знаний о последствиях ее внедрения, современное общество постоянно сталкивается с проблемой технологических рисков. А чтобы преодолеть или хотя бы уменьшить эти риски, оно опять вынуждено ставить вопросы перед самой же наукой и техникой.

Технические риски в последнее время стали местом кристаллизации общественной небезопасности и страхов. Сама вера в технический прогресс натолкнулась на свои собственные границы и породила недоверие по отношению к социальным институтам, носителям научно-технического развития. Делегитимация экспертов — это лишь следствие данных изменений социальных установок, что проявляется также в утрате доверия к государственным методам принятия решений. В конце 60-х гг. XX в. возникла и начала активно развиваться оппозиция новым технологиям. В результате появился новый рынок для прикладной науки — экспертизы риска и общественной позиции по отношению к технологическим рискам. Потребность в этой независимой от государства экспертизе исходила от компаний и институтов, связанных с разработкой и внедрением новых технологий, которые стали предметом общественной критики. Эти исследования концентрировались сначала в основном вокруг дебатов по поводу химической и ядерной технологий, как наиболее, очевидно, негативно влиявших на человека и окружающую среду.

В данной работе мы рассмотрели историю становления и развития технических наук, которые появились на свет как приложения математики и естествознания к технике, но постепенно завоевывали статус особых самостоятельных наук, развивших свои собственные методы и представления не только прикладных, но и теоретических исследований — техническую теорию. Выход в сферу создания сложных человеко-машинных, а затем и социотехнических систем ставит, однако, сегодня проблему взаимоотношения техники и технических наук не только с естествознанием и математикой, но и с социально-гуманитарным знанием.

Традиционно проблемы технологических рисков, техники безопасности, изучения вероятности отказов техники или наступления аварийных ситуаций находились в ведении инженеров, вооруженных естественнонаучными знаниями и математическими методами. Однако в последние десятилетия проблема технологических рисков является предметом обсуждения специалистов не только технических, но и социально-гуманитарных наук. Это связано с тем, что она вышла за пределы узконаучных интересов и попала в центр внимания самой широкой общественности. Учащающиеся техногенные катастрофы, связанные как с ошибками проектирования и природными катаклизмами, так и с внештатным использованием новой техники, вывели эту проблематику на трансдисциплинарный уровень. Всем стало очевидно, что социальные последствия как внедрения новой техники и технологии, так и эксплуатации старой требуют просчета рисков и разработки превентивных мер, предусматривающих не только штатные, но и внештатные ситуации [2, р. 1131].

Проблема оценки риска внедрения новых технологий является центральной в рамках нового направления прикладной философии техники, институализировавшегося в 1990-е гг., — социальной оценки техники в связи с развитием систем раннего предупреждения, например об опасности радиоактивного или химического заражения окружающей среды в результате не только аварий, но часто и «штатных» выбросов в процессе эксплуатации АЭС, химических предприятий и др. Причем в ходе дебатов, проходивших с точки зрения самых различных научных дисциплин, обращение с рисками в обществе стало более дифференцированным.

В развитии современной науки наблюдается четкий тренд в сторону необходимости диагностировать потенциал и риски новых технологий, оценивать социальные и экологические последствия их внедрения. Этот тренд в свою очередь вызван потребностью научно-технической политики выработать рекомендации или директивы для последующей деятельности. В этом фактически и заключается суть социальной оценки техники как нового прикладного направления философии науки и техники, которое в западноевропейской традиции имеет за своими плечами уже несколько десятилетий теоретического и практического опыта [3, 4].

При этом следует иметь в виду, что социальная оценка техники подразумевает сегодня уже не только исследование и оценку последствий внедрения новых технологий естественнонаучными и математическими методами, как это планировалось в начале пути, но и выработку рекомендаций по превентивным мерам, т. е. по социальному проектированию техники. Хотя в оригинале названия — «Technology



Assessment» (по-английски) или «Technikfolgenabschätzung» (по-немецки) — отсутствует слово «социальный», мы намеренно переводим его именно так, поскольку, в отличие от утвердившегося в русском языке понимания оценки техники как естественногонаучного и научно-технического прогнозирования ее развития или технической, а иногда еще и технико-экономической оценки ее отрицательных, например аварийных, последствий, на Западе с самого начала делается акцент на анализе социальных и экологических последствий новых технологий. При этом подразумевается междисциплинарный подход при ведущей роли социально-гуманитарных наук.

Предполагается, что такого рода исследования возможных технологических рисков и шансов науки и техники в современном обществе, а также предпосылок и последствий научно-технического развития должны проводиться на основе научных методов и рационально обоснованных оценочных критериев. Целью же их становится поддержка принятия научно обоснованных решений в сфере научно-технической и социально-экономической политики, а также формирования общественного мнения при внедрении новейших технологий. Эта деятельность осуществляется в Западной Европе группами экспертов и особыми социальными институтами, к которым принадлежит, например, Бюро по оценке техники германского бундестага.

В результате дискуссий и на основе первого опыта работы был сделан вывод, что эти исследования должны быть направлены на анализ будущих технологий и контроль существующей техники с точки зрения ее безопасности и оценки ее воздействия на окружающую природную и социальную среду. Поскольку решение этой задачи функционально встроено в типичные действия государственного управления, то и исследования в этой области в значительной степени определяются национальными государственными структурами. Таким образом, здесь возникает некоторое противоречие с тенденциями глобализации и формирования мирового сообщества, которые уже достаточно продолжительное время обсуждаются, в особенности в социально-гуманитарных науках. В сфере же социальной оценки техники этой проблеме до сих пор уделялось недостаточно внимания.

Еще одним важным пунктом в дискуссиях, посвященных социальной оценке техники на Западе, является *проблема социального формирования технических изменений*, оптимального использования инновационного потенциала общества и ответственного обращения с технологическими рисками. Под социальным формированием техники в данном случае фактически понимается то, что в нашей ли-

тературе часто обозначается как социальное проектирование. При этом особо отмечается необходимость специального фундаментального исследования различных возможных последствий внедрения новых технологий как основы для научно обоснованного социального проектирования техники.

В данном случае важную роль также играют знания о том, какие акторы, действующие лица (имеются в виду не только отдельные персоны, но и главным образом социальные институты современного общества), каким образом и с помощью каких средств вовлечены в процесс научно-технического развития, распространения и использования технических инноваций. Здесь обсуждались различные представления о возможностях и формах такого рода влияния на научно-технический прогресс, выраженные в понятиях эволюции, формирования и управления научно-техническим развитием.

Таким образом, дискуссии в области социальной оценки техники сконцентрировались, во-первых, на этической рефлексии, во-вторых, на социально-научной рефлексии, в-третьих, на рефлексии с точки зрения перспектив управления научно-техническим развитием и, в-четвертых, на проблематике системного анализа как основной концепции социальной оценки техники. Это связано с тем, что сегодня для оценки таких, например, областей, как энергетическая политика и политика в области климатических изменений, необходим и широко применяется именно системный анализ, который направлен на оценку уже существующих и исследование будущих новейших технологий (*foresight*).

**Этическая рефлексия техники.** Прежде всего следует указать на то, что такой подход — обсуждение и исследование в рамках самой науки и техники, или, как сейчас все чаще принято говорить, «технонауки», социальных и этических вопросов — вообще является характерной отличительной чертой так называемой постнеклассической науки<sup>1</sup>.

При опоре на современные технологии человек начинает мнить себя космиургом, строителем мира, который он может перекраивать на разные лады в соответствии со своими потребностями. Эту фундаментальную иллюзию современной техногенной цивилизации с болью констатирует С.Н. Булгаков в своей «Философии хозяй-

---

<sup>1</sup> «Постнеклассический тип научной рациональности расширяет поле рефлексии над деятельностью. Он учитывает соотношенность получаемых знаний об объекте не только с особенностью средств и операций деятельности, но и с ценностно-целевыми структурами. Причем эксплицируется связь внутринаучных целей с вненаучными, социальными ценностями и целями» [5, с. 327].

ства», опубликованной еще в 1912 г. Но человек сам является частью природы, подчеркивает он, и не может заменить ее полностью искусственной природой, хотя и небезуспешно пытается это сделать. В результате природа мстит ему учащающимися катастрофами, глобальным изменением климата и другими необратимыми изменениями, подрывающими саму основу его существования как вида. Рецепт преодоления этого миропонимания Булгаков видит в преобразовании механизма в организм, постепенном и осторожном вживании искусственного в естественное, а не в замене естественного искусственным.

По Булгакову, технология также представляет собой систему всех возможных средств воздействия на природу. Сама возможность ее существования заключена в принципиальной доступности природы для человеческой деятельности. Но человек — не Бог; он не может создавать из ничего все, что ему захочется. Человек действует свободно и оригинально, если он только находит способ использования своей собственной природы. Однако его собственную природу, так же как и окружающую его среду, он получает в качестве данных [6, с. 88–89].

Сказанное в полной мере относится, например, к нанотехнологии, где наряду с обещаниями радужных перспектив для человечества начинают всерьез исследовать возможные негативные последствия такого рода вмешательства в тонкие природные наноструктуры (например, в нейронные процессы головного мозга) [7, 8]. Это выводит наноэтику на первый план не только этических, но и вообще самых разнообразных, в том числе и специально-научных, дискуссий в области нанотехнонауки.

В последнее время этические проблемы техники выходят все более и более на первый план в связи с повышением социальной ответственности ученого, инженера, проектировщика в современном обществе, потому что конечная цель техники — это служение людям, но без ущерба другим людям и природе. В связи с этим сегодня активно обсуждается вопрос о том, что такое экологическая, компьютерная, хозяйственная и т. п. этика. Сюда же может быть отнесена и наноэтика. Перенесенный в социальную сферу этот теоретический вопрос приобретает практическое звучание: каковы условия реализации профессиональной, в частности инженерной, этики?

Ученый и инженер обязаны прислушиваться не только к голосам других ученых и технических специалистов и собственной совести, но и к общественному мнению, особенно если результаты их работы могут повлиять на здоровье и образ жизни людей, затронуть памятники культуры, нарушить природную среду и т. д. Каждый раз, при-

нимая какое-либо конкретное техническое решение, ученый и инженер несут за него и моральную ответственность. Может оказаться, что неверно принятое решение повлечет за собой негативные или даже катастрофические последствия. Не всегда инженер несет за это прямую или юридическую ответственность, но это не меняет дело. Поскольку техническая деятельность призвана служить общественным нуждам, она морально подотчетна. Даже сухие технические стандарты служат в конечном счете достижению безопасности и надежности производимой техники. Например, именно аварии паровых котлов на кораблях, унесшие множество человеческих жизней, заставили американское общество инженеров-механиков принять в начале XIX столетия специальный технический стандарт в качестве обязательного руководства для инженеров-конструкторов паровых двигателей. Этические же кодексы, такие, например, как «Основной канон» Национального общества профессиональных инженеров в США, дополняют технические стандарты с целью «помочь сделать практику инженерной работы социально более полезной» [9, р. 9].

Изначальная цель инженерной деятельности — служить человеку, удовлетворению его потребностей и нужд. Однако современная техника часто употребляется во вред человеку и даже человечеству в целом. Это относится не только к ее использованию для целенаправленного уничтожения людей, но и к повседневной эксплуатации. Если инженер и проектировщик, наряду с ее экономичным и четким с точки зрения технических требований использованием, не предусмотрели также ее безопасное, бесшумное, удобное, экологичное и т. п. применение, из средства служения людям техника может стать враждебной человеку и даже подвергнуть опасности само его существование. Это выдвигает сегодня на первый план проблему этики и социальной ответственности инженера и проектировщика перед обществом и отдельными людьми.

Если исходить из предпосылок технологического детерминизма, то этика выступает лишь как своеобразное «музыкальное сопровождение» к научно-техническому развитию. «Если техническое развитие детерминировано, тогда вообще не возникает вопросов управления этим развитием в том направлении, которое желательно для общества или является этически справедливым». Остается лишь прогнозировать его, с тем чтобы как можно раньше приспособиться к нему. Однако каждая конкретная техническая разработка осуществляется с какой-то определенной целью, причем иногда она модифицируется при изменении цели или может быть даже прекращена. Но если имеет место постановка цели, то это означает, что техника планируема, поддается модификации и ее последствия можно предупредить.

Аналогичная проблема с ответственностью возникает в том случае, если утверждается принципиальная непредсказуемость или непрогнозируемость побочных последствий внедрения новой техники и технологии. Как же тогда можно привлекать к ответственности за то, что не было известно? «Выдвигая тезис о недостаточной прогнозируемости, нельзя забывать, что многие аспекты технического развития все же прогнозируемы или же поддаются рациональному предвосхищению... Деятельность в условиях риска предъявляет к этике большие требования, чем деятельность в безопасных условиях» [10; 11, s. 41–59; 12]. При этом научная и техническая этики не ограничиваются только профессиональной этикой ученого, инженера и проектировщика. Они предполагают также этическое отношение к использованию техники, что затрагивает общество в целом и всех его членов в отдельности.

В нашем технизированном мире неосторожное обращение со сложной техникой ее пользователей может привести к катастрофическим последствиям. Кроме того, техника может использоваться в иных целях, чем те, ради которых она создавалась, например в террористических целях. Это создает дополнительный риск функционирования техники в современном обществе, которое становится от него зависимым. Но это же увеличивает ответственность человека, который «занимает в порядке природы особо выделенную в ней позицию — постольку, поскольку только *он* познает “природу”, т. е. может успешно продуцировать объяснения и предсказания на основе своих теорий и, используя свои познания, успешно манипулировать природными частями и предметами, приспособливать их к своим целям, “эксплуатировать” ее. Эта власть — даже если она представляет собой негативную разрушительную технологическую власть над природными подсистемами — все равно является выражением его особого положения. Однако *власть и знания порождают ответственность* — особенную ответственность знающего и властвующего. Эта ответственность людей простирается не только на себе подобных и их будущее, но и на весь жизненный мир» [13, s. 61].

Наиболее ярким примером возрастания такого рода ответственности дает развитие ядерной науки и техники. Достаточно назвать в этой связи имена Сахарова и Оппенгеймера, который сравнил укрощение атомного ядра с грехопадением человека в райском саду. Атомный проект явился, пожалуй, одним из ключевых проектов минувшего столетия. Впервые вокруг сначала, казалось бы, чисто научной проблемы сгруппировались вопросы политики, власти, высоких технологий и собственно науки.

Аналогичную ситуацию мы наблюдаем сегодня в области нанотехнологии. Еще не разобравшись даже со специально научной точки зрения, что нам могут принести, например, нанотрубки или внедрение разнообразных имплантатов на нанооснове в человеческий организм и даже в мозг, большое число созданных в последние годы фирм предлагают нанопродукты [14].

Действительно, представителей современной нанотехнонауки, как и ученых-атомщиков, можно сравнить с персонажем известного стихотворения Гёте «Ученик чародея», который начал «творить чудеса», имея представления, какие это может вызвать последствия, и не смог остановить запущенный им процесс («эксперимент»): «Вызвал я без знания Духов к нам во двор и забыл чуранье, как им дать отпор!».

Неосведомленность обошлась дорого человечеству. Так, расщепление ядра предоставило огромные источники энергии, когда либо доступные человечеству, но связанные с их освоением затраты и трудности оказались не менее могучими. Они принесли такой ущерб окружающей среде и здоровью людей, что человечество обречено залечивать эти раны целые десятилетия и даже столетия.

В США и СССР эта область была долгое время закрыта для обсуждений и свободного получения информации о несчастных случаях и катастрофах. Поэтому о какой реалистической оценке технологических рисков для общества здесь вообще могла идти речь? В данном случае срабатывала милитаристкая идеология: на войсковых учениях, как и на войне, обязательно калькулировали определенный процент жертв. То, что он принимал зачастую гигантские размеры, в расчет не принималось, и даже врачи после таких катастроф давали подписку хранить государственную тайну и не разглашать степень риска, которому подверглось местное население. Поэтому до сих пор нет возможности установить действительное количество жертв производства атомного оружия. Даже в США, где закон дает гражданам значительные возможности потребовать отчета государства за свои ошибочные действия, многое остается неизвестным [15, s. 197–201].

Однако в отличие от ситуации, описанной в стихотворении Гёте, в случае с атомными и нанотехнологиями такого учителя, который исправил бы ошибки «подмастерьев», просто не существует. Это значит, что неизмеримо возрастает социальная и моральная ответственность самих ученых.

Об этом очень хорошо написал в своем исследовательском эссе Ханс Ленк: «Рудольф Людвиг Мессбауэр, немецкий физик, специалист в физике атомного ядра и элементарных частиц, лауреат

Нобелевской премии по физике за 1961 г., в одном из своих интервью<sup>1</sup> так ответил на вопрос о том, что думают ученые-естествоиспытатели о проблеме ответственности: В области фундаментальных исследований вообще нет никакой ответственности. Мы пытаемся лишь понять, как устроена природа. Несколько иначе дело обстоит с прикладной физикой. Но и здесь ее значение чрезмерно преувеличено. Я имею в виду технику построения ядерных реакторов... Вы не можете науку просто запретить. И если мы в Германии прекратим заниматься какой-либо определенной наукой, ей займутся где-то в другом месте. В Германии благодаря враждебному отношению к науке загонят весь исследовательский сектор в критическую ситуацию... Вопрос об ответственности в фундаментальных исследованиях — особенно внешний по отношению к обществу или даже всему человечеству (и не только в прикладной физике) — имеет длительную традицию. В особенности со времени Манхеттенского проекта, связанного с разработкой атомной бомбы, эта проблема много и широко обсуждалась и обсуждается до сих пор. Однако наука уже намного раньше потеряла “свою невинность” [16].

Здесь можно назвать, например, исследования Фрица Габера в области боевых отравляющих веществ, который не только спланировал, но и форсировал использование ядовитых газов во время Первой мировой войны и продолжал эти исследования и после ее окончания... Конечно, невозможно требовать, чтобы ученый заранее предусмотрел все негативные последствия своего открытия. Но он несет за него ответственность не только как обычный гражданин, но и особую моральную ответственность — как ученый. В области прикладных исследований и технических разработок к этому добавляется еще ответственность, связанная с возможностью ученого влиять на принятие конкретных решений по развитию тех или иных технологий» [17].

Ощущение необратимости проектных воздействий приводит к появлению чувства опасности результатов технической деятельности (да и ее самой) не только для данного конкретного человека, работающего с той или иной технической системой (например, в качестве оператора), но и для людей к ней не причастных. Например, вредные химические производства вредны не только для работающих на них людей (которые хотя бы знают это и сознательно идут работать на них, принимают защитные меры, наконец, получают льготы за вредность), но и для живущих рядом с ними, дышащих отравленным воздухом, потребляющих их отходы через воду, пищу и т. д. Отсюда вытекает возрастание роли моделирования, имитирующего еще не

---

<sup>1</sup> Ventil Nr. 94, 1994, Studentenzeitschrift der Universität Karlsruhe.

осуществленную деятельность как стремление спрогнозировать возможные последствия. Одновременно приходит понимание ограниченности этой имитирующей, прогностической деятельности, т.е. понимание невозможности всего заранее предусмотреть средствами научного анализа, понимание принципиальной неисчерпаемости, проблематичности, незавершенности объекта исследования и проектирования и самих процессов исследования и проектирования. Так, например, как отмечает А. Грунвальд, «в качестве непредвидимых системных кумуляционных эффектов множества отдельных действий пользователей техники» выявляются принципиально заранее непрогнозируемые последствия использования техники или же возможные неполадки в функционировании могут быть предсказаны лишь с определенной степенью вероятности [10].

Осознание того, что нет и не может быть одного-единственного оптимального проекта или плана, по которому может быть раз и навсегда пересоздан мир, приводит к осознанию альтернативности проектного действия, равноправности, а часто и взаимодополнительности альтернатив, необходимости постоянной корректировки проектного воздействия, многократного возвращения к исходному пункту (а значит, должна быть с самого начала предусмотрена возможность такого возвращения), своевременного признания и исправления ошибок, перепроектирования. Разрушение чувства «непогрешимости» проектанта перед лицом пассивного объекта, подвергающегося проектному воздействию, стимулирует развитие у проектировщика чувства сопереживания, сопричастности, формирование не только технического, но и этического отношения к объекту исследования и проектирования.

Конечно, оценка социальных последствий техники и обращения с рисками зависит от социально-политического контекста. Но она зависит также от господствующей в обществе морали и от личной моральной и социальной ответственности ученых, инженеров, создателей новой техники и участвующих в ее эксплуатации. Таким образом, все сходится на вопросах этики ученого, инженера, пользователя сложных социально-технических систем.

Как отмечает известный американский философ техники К. Митчам [18], проблема исследований технологических рисков возникла в рамках обсуждения технической этики, когда понятие свободного и информированного согласия на риск переносилось из сферы медицины в область технологических рисков. Это было связано с моральной оценкой рисков со стороны неспециалистов, которая зачастую оказывалась более рациональной и взвешенной, чем оценка риска со стороны научно подкованных экспертов.



**Социально-научная рефлексия техники.** Известный германский философ и социолог науки и техники В. Крон в своей статье «Технологические изменения как социальный процесс» [19, s. 25–36; 20; 21] убедительно показал, что технические инновации нельзя рассматривать лишь как следствие приложения естествознания в духе идеологической установки Фр. Бэкона и Р. Декарта, поскольку они являются «гипотетическими социальными структурами» [22, s. 29]. С одной стороны, социальные структуры должны приспособляться к этим инновациям, а с другой — их внедрение неизбежно вызывает структурные социальные изменения, причем не всегда позитивные. Он интерпретирует процессы внедрения технических инноваций в социальные структуры как попытки или опыты по «социальной реализации изобретений», которые, однако, протекают не в рамках лаборатории, а происходят в социотехнической деятельности, вторгающейся в профессиональную, общественную и даже частную социальную сферу. В таком случае современное общество становится полем перманентного экспериментирования с новыми технологиями, следствия которого могут быть и являются не только позитивными, но и негативными как для общества в целом, так и для отдельных его граждан, которые поневоле становятся подопытными кроликами и объектом злоупотреблений.

Такое изменение соотношения социальных и технологических изменений в современном обществе, с одной стороны, вызывает рост осознания технологических рисков, связанных с внедрением и эксплуатацией сложных системотехнических комплексов, электростанций, производства потенциально токсичных субстанций, а с другой стороны, усиливается ощущение экологических угроз со стороны неконтролируемо разрастающихся масштабов фактически новой индустрии утилизации практически всех промышленных продуктов. В. Крон подчеркивает, что сложные и изменчивые процессы взаимовлияния постоянно предлагаемых обществу концепций внедрения новых инновационных технологий и действительного опыта внедрения их в социальную практику выходят из-под контроля капиталистического общества. Иллюзия того, что рыночная экономика способна автоматически регулировать этот процесс, моментально исчезнет, если вспомнить, с какими техногенными катастрофами связано развитие крупных технологических комплексов в XX столетии.

*Социальная оценка техники* является инструментом консультирования принимающих решения политиков, причем речь идет о таких различных формах политического консультирования, как слушания, экспертные советы, анкетные комиссии и т. д. Такого рода экспертиза должна быть, конечно, профессиональной, но в то же время и об-

щественной (в смысле как привлечения представителей населения, затрагиваемого тем или иным конкретным проектом, так и независимости от лоббирующих данный проект групп ученых, инженеров и менеджеров). В особенности это относится к так называемым инфраструктурным инновациям. Опыт анализа инфраструктурных инновационных процессов в сферах энергетики, водоснабжения и очистки сточных вод, информационной, коммуникационной и транспортной инфраструктуры, обеспечения здоровья населения показывает, что для всех этих систем характерно то, что они представляют собой некоторые центральные инфраструктуры, пронизывающие практически все социальные сферы.

При внесении в них инноваций всегда возникают сложные внедренческие проблемы, несмотря на многообещающие успехи, отмечаемые предварительным анализом, которые могут нарушить стабильность данных систем. Стандартным примером здесь может служить внедрение электромобилей вместо автомобилей на бензиновых двигателях с целью оптимизации индивидуальных транспортных систем. Всем известно, что они послужат высоким целям устойчивого развития. Однако их внедрение связано также с интересами нефтяных компаний, развитием специальных заправочных станций, т.е. с социально-экономическими и инфраструктурными, а не только с чисто техническими проблемами. Инновации могут принести много полезных изменений, но они одновременно могут угрожать стабильности функционирования этих систем. В результате образуются система движения, блокирующая транспортные потоки товаров и людей, система обслуживания больных, делающая людей больными, финансовое хозяйство, которое препятствует инновациям, и т.д.

В социотехнических сценариях достижения устойчивого развития энергетической системы Австрии, например, отмечается, что процесс трансформации этой системы требует сложного социального проектирования и формирования общественного мнения, что невозможно без взаимного обучения многочисленных участвующих в этом процессе акторов: от проектировщиков и производителей до политиков и простых потребителей. Поэтому необходимые в данном случае системные инновации могут быть внедрены в жизнь лишь при скоординированных согласованных действиях разработчиков технологии, социальных практиков и разнообразных социальных институтов с учетом господствующих в данном обществе социокультурных ценностей.

Без хотя бы относительно независимой оценки новой техники и технологии заинтересованными в ее разработке и внедрении учеными, инженерами, менеджерами и политиками крупные техно-

генные катастрофы или более мелкие, но не менее опасные аварии как негативные последствия техники невозможно предотвратить. Современные продвинутое технологии приносят с собой не только новые удобства для потребителей, прибыли и преимущества в экономической и политической сферах, но и новые виды рисков и опасностей, которые ставят перед государством задачи не столько компенсировать уже нанесенный ущерб, сколько выработать *превентивные* меры, снижающие степень риска. Становится необходимым долгосрочное планирование научно-технического развития с целью как предвосхищения новых технических возможностей, так и расчета степени риска и разработки упреждающих мероприятий по устранению рисков. Чтобы правильно решить эти задачи, государство должно мобилизовать достаточно крупный научно-технический потенциал, т.е. возникает настоятельная необходимость тесной связи науки и политики.

Однако ожидание от таких социальных технологий того, что они способны сделать технологические опасности и катастрофы точно калькулируемыми, принципиально неверно. Они предполагают широкий диалог создателей техники, ее потребителей, государственных структур и общественности, экспертов и тех, кого ее штатное или нештатное функционирование затрагивает или может затронуть в сложном процессе общественного взаимного обучения всех участвующих в нем сторон, формирования их коллективного взаимопонимания. Риск и инновации являются больше не особенностями отдельных социальных подсистем (экономики, научной политики и т.п.), а относятся ко всей структуре современного общества в целом.

В последнее время все чаще говорят о необходимости создания в России инновационного общества и о том, что только развитие инновационной деятельности может спасти Россию. Но означает ли трансформация ценностей при переходе к инновационному обществу отказ от традиций? И вообще, как возможно сохранение традиций в инновационном обществе? В настоящее время много рассуждают о необходимости модернизации и ускоренного движения по пути инновационного развития общества как главного средства выживания в условиях глобальной конкуренции, делая в основном акцент на позитивных его аспектах. Возможные же негативные последствия отходят при этом на второй план или же вообще не рассматриваются. А одним из таких последствий может стать утрата традиций, и прежде всего в морально-этической сфере.

***Проблема управления научно-техническим развитием.*** Идеи раннего предупреждения и предсказания последствий внедрения новой техники и технологии в контексте управления научно-

техническим развитием были вскоре заменены более продуктивным подходом в оценке техники, который связан с подчеркиванием необходимости диалога между учеными, инженерами, менеджерами, политиками и населением, широкого общественного участия и открытого публичного обсуждения проблем научно-технического развития. «Конечно, судьбы нашей планеты решают политики, но именно граждане должны пожинать плоды этих решений. Поэтому так важно именно их мнение». Такими словами приглашают к обсуждению экологических проблем изменения климата участники проектной группы «Широкий взгляд на мир по поводу глобального потепления»<sup>1</sup>. Таким образом, общественность должна быть не только информирована, но и привлечена к активному обсуждению проблем радиационной безопасности, так же затрагивающих всех нас, как и проблема климатических изменений.

Участие (*participation*) общественности стало за последние годы в странах западноевропейской демократии обязательным в процессе поиска политических решений. Этот термин несет в себе достаточно емкое содержание, которое трудно передать одним словом русского языка, поскольку российская политика во всех областях нашей политической жизни почти всегда направлена в лучшем случае на протискивание общественного мнения или навязывание обществу политических решений, а не на продуктивный диалог с ним. Действительное привлечение граждан не только к обсуждению, но и к выработке этих решений даже не обсуждается. В странах же западной демократии политики видят в этом одно из важнейших средств легитимации в обществе их законодательных намерений. Речь идет в том числе и о демократизации современного проектирования сложных социотехнических систем, к которым относятся, несомненно, и энергетические проекты, в первую очередь строительство и эксплуатация АЭС, т.е. о «проектировании с участием» (*participation design*).

Здесь имеется в виду *демократизация* современного проектирования в направлении плюрализма мнений. Демократизация в данном случае понимается в том смысле, что должны быть выслушаны и приняты во внимание все, в том числе альтернативные, точки зрения, а не только мнение лоббирующих экспертов, а также пожелания пользователей. Иными словами, к принятию решений (в особенности на региональном уровне) привлекаются и разные группы населения, затронутые реализацией проекта. В особенности это важно для обсуждения социальных, экономических и экологических по-

---

<sup>1</sup> World Wide Views 2009, s. 3.

следствий внедрения новой техники и технологии [23–27], поскольку их оценка имеет дело со знаниями о будущем: оценке подлежат не только существующие, но и еще только разрабатываемые технологии. В этих случаях приходится выявлять такие их прогнозируемые параметры, которые создают условия для возможной акцептации населением этих технологий.

Понятие «акцептация» также сложно переводимо на русский язык, так как является достаточно многозначным. Речь идет опять-таки не о навязывании мнения разработчиков этих новых технологий, лоббирующих их научных экспертов или политиков, а о скрупулезном разъяснении обществу, причем не только их преимуществ, но и возможных негативных последствий. В то же время в процессе выработки решения об их внедрении не следует, увлекаясь популистскими стремлениями, идти на поводу у недостаточно информированного и не всегда компетентного общественного мнения. Однако часто и сами разработчики, и даже ученые не в состоянии предвидеть и прогнозировать все их последствия. Возможны лишь выработка и сравнительный анализ различных сценариев развития событий, связанных с их внедрением, причем с учетом мнения затрагиваемого этими решениями населения. Такого рода оценка поэтому требует не только привлечения знаний естественных, технических и общественных наук, но и рассмотрения технологических рисков с учетом мнения граждан, жизненный мир которых затрагивается тем или иным образом новым социотехническим проектом.

Кроме того, важную роль для выработки приемлемых решений играет выявление зоны не-знания с целью выдачи задания науке и технике для дополнительной проработки данной проблемной области. Так происходит, например, в сфере климатических изменений, генной инженерии, трансплантационной медицины, где именно обществом формулируется заказ на проведение новых междисциплинарных и проблемно-ориентированных исследований. В сущности, именно такой заказ был выдан в конце Второй мировой войны на разработку атомной бомбы, а затем и применение полученных знаний и опыта для развития программы мирного атома. Следует, однако, учитывать, что в данном случае участие и акцептация были в принципе невозможны, поскольку эти проекты разрабатывались во всех странах в условиях соблюдения строгой секретности.

Даже в рамках политической системы России, когда обсуждение последствий экологических техногенных катастроф может стоить свободы вслед за обвинением в непатриотизме и государственной измене, в этой области складываются различные ситуации и возможны разные подходы. И здесь интересно сравнить обхождение с эколо-

гическими радиационными рисками в Мурманской и Челябинской областях (впрочем, в разное время). В первой благодаря близости к Западу и активной роли общественности попытки обвинить тех, кто выступает против радиационной угрозы, во всех смертных грехах, впервые в нашей стране не увенчались успехом. Во второй — расположенной вдали от границ — и в секретных районах предприятия «Маяк», занимающегося переработкой и складированием радиоактивных отходов, долгое время удавалось скрыть от мировой и российской общественности последствия нескольких техногенных катастроф. Справедливости ради следует отметить, что и спецслужбам США удавалось скрыть даже от демократически неплохо подкованной американской общественности такого рода аварии в закрытых военных зонах. И, может быть, по этой причине не раскрывать аналогичных советских секретов.

Например, исследования возможных негативных последствий повсеместного внедрения нанотехнологий заставляют серьезно задуматься о необходимости проведения специальных междисциплинарных исследований их развития. В проведенном Бюро по социальной оценке техники при германском бундестаге экспертном исследовании рассмотрены также этические и социальные аспекты. В частности, в нем отмечается возможная опасность, например, проникновения трудно регистрируемых наночастиц в легкие или даже через клеточные мембраны.

На основании изложенного выше делается вывод о необходимости расширения государственной поддержки этой области науки и техники, чтобы удержать ведущую роль и конкурентоспособность германской науки в современном мире, и дается рекомендация усилить подготовку молодых специалистов в этой сфере [28—31]. Возможные места осаждения наночастиц в человеческом организме: носовая полость, трахея, бронхи, легкие и т. д. [32, р. 354]. Возможные пути распространения наночастиц и наноматериалов, полученных в результате имеющихся или возможных приложений нанотехнологии, и их попадания в человеческий организм как работающих на этих производствах, так и их потребителей (населения) — это питьевая вода, осадки, воздух и продукты питания [Там же].

Таким образом, возникает вопрос: что же является мотором, раскручивающим сегодня колесо финансовой и институциональной поддержки со стороны ведущих в сфере научно-технического развития государств современного мира, если общественность воспринимает это направление научно-технического прогресса столь осторожно? Ответ напрашивается сам собой. Это — как и в случае таких крупных проектов времен Второй мировой и холодной войны (атомного,

ракетного и радиолокационного) — нужды военно-промышленного и оборонного значения<sup>1</sup>. А развернутая вокруг проблематики нанотехнологии рекламная кампания, обещающая достижение «вечной» жизни на земле, победу над болезнями и решение всех насущных социальных проблем человечества, призвана убедить общественность в том, что хотя бы в обозримом будущем эта область науки и техники будет весьма полезна и для решения гражданских проблем. При этом, несмотря на все уже сегодня просматриваемые социальные, психологические, физиологические и другие возможные негативные последствия для человечества в целом, финансирование нанотехнологии приобретает такие масштабы, что все ученые, могущие так или иначе притулиться к этой проблематике, стремятся объявить себя нанотехнологами. Само по себе это вполне понятно и оправданно, поскольку хотя бы таким образом можно остановить наезд бюрократии на фундаментальные исследования в науке и технике. И пусть самой бюрократии не вполне или совсем непонятно, что такое нанотехнология и что она нам даст в обозримом будущем, она не может больше сказать ни одного слова против, так как эта проблематика во всем мире заняла приоритетное положение. Но для того чтобы общественности и правительствам стало более ясно, какие нанотехнология несет в себе позитивные и негативные следствия для общества, необходимы ее науковедческие, социологические, философские и другие социально-гуманитарные исследования.

***Социальная оценка техники и системный подход.*** Социальная оценка техники с самого начала своего возникновения была тесно связана с системным подходом. Это было жизненно необходимо для более широкого охвата всех возможных последствий научно-технического развития с целью выработки системной стратегии их оценки, действий и рекомендаций по их преодолению. Речь в данном случае шла уже не об оценке отдельных технических подсистем, а о целостных социотехнических системах и технологических приложениях в широком социальном контексте, т.е. с учетом эконо-

---

<sup>1</sup> «По самой осторожной оценке приложения США (в военной сфере) финансируются от четырех до десяти раз выше, чем во всех остальных странах вместе взятых». Достаточно назвать лишь основанный в 2002 г. в Массачусетском технологическом институте Институт солдатской нанотехнологии с государственным финансированием в размере 50 млн американских долларов, выделенных на пятилетний период. Еще 30 млн долларов выделено этому институту фирмами (см.: *Militärische Nutzung der Nanotechnik: Begrenzung ist nötig // Nanotechnologien im Kontext. Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektive.* Berlin: Akademische Verlagsgesellschaft Aka GmbH, 2006).

мических, политических, социальных, социокультурных и других общественных условий развития новых технологий. Поскольку в 1980-е гг. усиливается проектная направленность социальной оценки техники, ее ориентация на социальное формирование техники, системный подход к изучаемому предмету требует включения в сферу анализа также инновационных аспектов.

Таким образом, реализация системного подхода в области социальной оценки техники выразилась в акцентировании его на следующих трех основных проблемах.

1. Перспективный системный анализ выдвинул на первый план эпистемологическую проблему ненадежности знаний о будущих технологиях при возрастании сложности рассматриваемой системы.

2. Поскольку научно-техническое развитие необходимо рассматривать в контексте будущего использования новой техники и технологии, то требуется комбинирование системотехнического и социально-системного способов рассмотрения, что накладывает особые требования на определение границ системного анализа техники.

3. Возникает поле напряжения между широтой охвата и детализированностью такого рода анализа, который наряду с системностью рассмотрения трудно реализуемых относительно сложных систем часто требует детальных количественных оценок. Такого рода решения о степени охвата и детализации исследования всегда необходимо принимать в рамках конкретных проектов.

Системный подход направлен на решение указанных выше проблем, но он не в состоянии элиминировать проблему непредвиденных последствий. Интеграция системного анализа с системным социальным проектированием техники может лишь трансформировать ненадежность принимаемых решений, но не в состоянии устранить данную проблему в принципе. Речь идет о том, чтобы указать пути обращения с такими неопределенностями. Исходя из этих соображений были поставлены цели — провести рефлексию системного подхода в рамках социальной оценки техники и определить возможности и границы социального формирования (проектирования) техники и инновационной политики, а также представить возможности и примеры применения этих системных принципов на практике, оценить методологические и концептуальные вызовы и пути дальнейшего развития этой проблематики (например, сценарных методов)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Метод сценариев (проектно-прогностические, диагностические и нормативно-телеологические типы сценариев) был развит в рамках системного анализа социотехнических систем.



***Социальные технологии принятия решений в условиях не-знания или неполного знания.*** В сфере научного анализа технологических рисков все большее внимание обращается на проблему не-знания. Дело в том, что оценка позитивных и негативных последствий той или иной технологии, например на окружающую среду, часто затрудняется недостатком или вообще отсутствием необходимых для принятия решений знаний. При этом решения должны быть приняты и принимаются, что, естественно, увеличивает опасность появления негативных последствий новых технологий и связанных с их внедрением технологических рисков. Наиболее показательной в данном случае является нанотехнология, где установки, предназначенные для проведения научных экспериментов, одновременно становятся оборудованием для нанофабрикации. Ученые еще сами до конца не выяснили природу изучаемых ими явлений на наноуровне, а нанопродукты заполняют все больше и больше современный рынок. И это не только выгодный бренд, но и содержащий наночастицы продукт (скажем, косметика, текстиль для одежды, лекарственные препараты и даже продукты питания).

В настоящее время особое внимание уделяется публичному обсуждению рисков производства и внедрения синтетических наночастиц. «Может произойти неблагоприятное воздействие наночастиц на биосферу... Синтетические наночастицы могут быть выпущены в окружающую среду или же могут проникнуть в тело человека. Выброс частиц может произойти в процессе производства или в результате каждодневного использования продукции “нанотеха”. Способы их распространения и взаимодействия с другими частицами, их воздействия на здоровье человека и на окружающую природную среду, в частности их возможные долгосрочные последствия, в значительной степени в настоящее время неизвестны, по-прежнему нет единого, всеобъемлющего знания в этой сфере.

В ситуации больших пробелов в знаниях и научной неопределенности в игру вступает принцип предосторожности... Многие из этих материалов находятся пока только в исследовательских лабораториях. Вместе с тем некоторые наночастицы уже присутствуют во многих областях нашей жизни, и их число будет значительно увеличиваться в течение ближайших лет. Большинство из этих наноматериалов пока еще недостаточно исследованы с точки зрения их влияния на здоровье людей и окружающую среду. Таким образом, классическая стратегия оценки рисков из-за пробелов в знаниях, касающихся опасностей наночастиц, неприменима. Количественные меры вероятности ущерба и степени возможной опасности пока отсутствуют» [33, p. 85–102].

Похожую ситуацию можно увидеть в истории с асбестом, когда диагноз «нет доказательств вреда» (в случае с нанотехнологией, вызванного рассеянием наночастиц в окружающую среду) не должен быть истолкован неверно — в смысле «доказательства отсутствия вреда». История с асбестом — пример того, что может произойти в результате интенсивного использования материалов без тщательного предварительного анализа возможных последствий. Некоторые считают, что производимые с помощью нанотехнологий продукты могут стать новым асбестом. «Из-за “чудесных” эксплуатационных свойств асбеста он широко применялся в промышленности. Отрицательные последствия для здоровья были отмечены уже в 1930-е гг. Однако информация относительно рака легких и мезотелиомы, вызванных распространением асбестовых волокон в воздухе, была проигнорирована или даже намеренно сокрыта. Статистический учет и оценку данных о пагубных последствиях применения асбеста не проводили вплоть до 1960-х гг.» [3, с. 82].

Наиболее сложная проблема в области оценки нанотехнологических рисков заключается в том, что в данном случае пока нет никаких количественных данных и все заключения делаются на основе опроса экспертов. Однако экспертное сообщество в этой новой области науки и техники практически еще не сложилось. Во-первых, оно принципиально междисциплинарно, что приводит к значительному разбросу в оценках, поскольку эксперты принадлежат к разным научным сообществам, имеющим различные ценностные ориентиры. Во-вторых, в качестве экспертов привлекаются не только ученые и инженеры, но и представители промышленных кругов, предприниматели разных уровней, правительственные чиновники и представители разнообразных неправительственных организаций, что еще более усложняет проблему адекватных оценок рисков, учитывая неодинаковую степень информированности экспертов о реальном положении дел в данной области и вообще недостаток знаний (не только научных и технологических, но и социальных, экономических, экологических, статистических и др.). В-третьих, к этому следует еще добавить различное социальное отношение и политические установки в разных странах по отношению к нанотехнологической проблематике, что существенно замедляет процесс формирования и консолидации мирового экспертного сообщества в области нанотехнологии. «Международные соглашения в области нанотехнологии не фокусируют внимание на вопросах ресурсов и окружающей среды, представляющие широкий гуманитарный интерес» [34, р. 7].

Кроме того, информирование широкой общественности о результатах исследований, возникающих проблемах их внедрения в новые технологии и влияния на социальную и природную окружающую среду, а также здоровье людей осложняется лавинообразным ростом нанотехнологических знаний. В результате даже весьма осведомленные эксперты из одних областей нанотехнонауки имеют лишь приблизительное представление о том, что происходит в других ее областях. Потенциальное же использование достижений нанотехнологии для разработки новых видов оружия делает проблему обсуждения нанотехнологических рисков особенно чувствительной, поскольку некоторые ее исследования становятся закрытыми с целью обеспечения национальной безопасности.

Эта ситуация повторяет фактически историю с разработкой атомного проекта после Второй мировой войны с тем лишь отличием, что в 60-е — 70-е годы XX столетия в этой области уже сложилось достаточно сплоченное и однородное научно-техническое сообщество, которое стало обращать внимание широкой общественности и политиков на таящиеся в атомной науке и технике как мирного, так и военного назначения опасности и риски.

В целом если обратиться к обсуждению проблематики нанотехнологических рисков в международном масштабе, то потенциальный риск нанотехнологий рассматривается прежде всего как потенциал для будущих приложений. При этом в настоящее время почти полностью отсутствуют знания о возможных долговременных последствиях этих приложений. «Современные приложения, — как отмечают в своей статье О. Ренн и М. Роко, — такие, как лосьены для загара и самоочищающиеся окна, содержат пассивные наноструктуры, и, несмотря на то что они не в состоянии потенциально преобразовать общество, они могут иметь неизвестные последствия, например могут попасть в кровь через кожу лица или в окружающую среду в процессе очищения стекла.

Приложения недалекого будущего на основе “активных” наноструктур и более отдаленные по времени их применения с высоким потенциалом риска рассматриваются в значительной степени как гипотетические. Поэтому в их отношении существуют большие расхождения в оценке потенциального риска и значения влияния на здоровье человека и окружающую среду. Например, способность наноструктур преодолеть гематоэнцефалический барьер (между кровью и цереброспинальной жидкостью) может иметь чрезвычайно важное значение, поскольку этот барьер является непреодолимым для многих субстанций, и мало что известно об этих возможных эффектах. Однако альтернативная позиция заключается в том, что эта

способность может быть и является полезной, поскольку сможет помочь излечивать такие заболевания нервной системы, как болезнь Альцгеймера, но потребует так много предупредительных мероприятий за пределами известного, что может составить большой риск для общества. В этом и состоит знаниевый разрыв между тем, в чем мы нуждаемся ..., и тем, что нам сегодня доступно» [Там же, р. 8].

Согласно М. Веберу, наука обеспечивает расколдовывание мира именно тем, что она делает его просчитываемым. Однако как раз эту веру в просчитываемость нашего будущего с помощью науки и подрывают в первую очередь все обсуждения проблематики технологических рисков. Знания о рисках всегда носят гипотетический характер. С точки же зрения научного подхода, если под словом «научный» понимается главным образом естественнонаучный прогноз, метод проб и ошибок традиционных технологий, предполагающий последовательное поэтапное приспособление технических систем к ситуативным требованиям, должен быть заменен в большинстве случаев долгосрочным научно обоснованным планированием, дополненным вероятностным анализом возможных технологических рисков. Именно таким образом строятся исследования и менеджмент технологических рисков, например в атомной энергетике.

Цену таких расчетов показывают примеры техногенных катастроф типа Чернобыльской аварии, где, несмотря на ничтожную вероятность наступления нештатного события, оно происходит прежде всего в силу непросчитываемых в этом случае человеческих, политических и социальных факторов. Тем не менее практический опыт и эмпирические исследования все более заменяются абстрактными моделями, гипотетическими сценариями и естественнонаучными идеализациями. «Возникновение проблемы риска на фоне почти полного незнания о побочных эффектах нанотехнологий привело к некой растерянности и беспомощности на первых стадиях дискуссий о риске. Высказывания этого периода колебались между оптимистической “выжидательной” стратегией ..., с одной стороны, и жестким предостерегающим, иногда даже “алармистским” подходом — с другой» [3, с. 82].

В заключение приведем рассуждения М. Хоркхаймера по поводу проблемы предсказания в социальных науках, озвученные им еще в 1933 г. на одном из конгрессов [35]. Хоркхаймер вводит различие предсказания, основанного на абстрактных основаниях, и прогноза, который связан с конкретными событиями. Такого рода абстрактными предсказаниями являются, например, естественнонаучные законы, говорящие о том, что может произойти с определенными вещами при заранее заданных условиях. «Эти законы не являются

целью науки, а лишь вспомогательными средствами», абстрактными формами, дающими представление о том, какие события должны произойти в будущем в каждом конкретном случае при выполнении сформулированных условий. «Они всегда содержат в себе суждения о *всех* временных измерениях», прошлом, настоящем и будущем. «Однако при переходе от абстрактных форм закона к конкретным рассуждениям о действительных вещах мы теряем абсолютную уверенность» [Там же, с. 152–153].

Собственно речь идет о естественнонаучных законах, которые действительно формулируются в абстрактной форме универсальных предсказаний, но при их применении в инженерной практике часто требуют существенных уточнений и корректировки. В данном случае уместно сослаться на работы академика С.А. Христиановича, который, исследуя движение грунтовых вод через крупнозернистые пески или щебень, показал, что в данном случае естественнонаучный закон, устанавливающий соотношение между уклоном и скоростью фильтрации однородной несжимаемой жидкости, становится неверным, так как в нем не учитывается целый ряд важных для решения практических инженерных задач факторов. Чтобы решить заново поставленную задачу — вывести уравнения движения грунтовых вод — Христианович строит новый идеальный объект, учитывающий полученные в инженерной практике данные. Для дальнейшего решения сформулированной таким образом теоретической проблемы привлекаются данные технически подготовленного идеализированного эксперимента. Далее Христианович от теоретически созданного идеального объекта переходит к исследованию грунтовых вод в земляном массиве, т. е. к реальным условиям [36, с. 302–303].

Именно об этом говорит Хоркхаймер относительно естественнонаучных предсказаний. «Если значение абстракций постоянно не контролируется практическими применениями и при определенных условиях не корректируется, они становятся по необходимости чуждыми реальности и в конечном счете не только бесполезными, но даже ложными» [37, с. 153–154]. Доказательством их правильности является возможность экспериментатора создать необходимые условия для демонстрации данного предсказания.

Другое дело в области техники. Здесь Хоркхаймер приводит пример с машинистом, который исходит из уверенности в том, что новый железный мост выдержит проходящий по нему поезд, поскольку он сделан из соответствующего сорта железа, выдерживающего даже большие нагрузки. Эта уверенность основывается на естественнонаучном предсказании о свойствах определенных видов железа не изменять свою форму под нагрузкой определенной величины. Но здесь

мы сталкиваемся с принципиально иной ситуацией, чем в естествознании, так как тот факт, что мост все-таки может разрушиться, если материал, из которого он изготовлен, сделан по каким-либо (например, социальным — с целью экономии или по халатности) причинам с нарушениями технологических условий. Но машинист не может в целях эксперимента направить свой поезд для проверки прочности его конструкции, ибо он не в силах создать такие условия, чтобы природные силы не разрушили данного моста.

Это уже не эксперимент, а социальная практика, в рамках которой и машинист, ведущий локомотив, и конструктор моста вместе с его строителями, и ученые, давшие обоснование его безопасной эксплуатации, несут социальную ответственность перед обществом. Очевидно, что одних лишь естественнонаучных предсказаний здесь недостаточно. В данном случае, по сути дела, речь идет о технологических рисках, природа которых *социально-техническая*. Здесь предсказание зависит не только от познания слепых сил природы, но и от разумной деятельности конкретных людей. Поэтому предсказания в социальных науках зависят не только от научного анализа событий общественной жизни, но и от структурных изменений самого предмета их исследования — общества. Если общество не научится разумно обращаться с технологическими рисками, чтобы обеспечить безопасное функционирование новой техники и технологии, или, иными словами, если оно не разработает новых социально-гуманитарных технологий обращения с технологическими рисками, то любые научные предсказания на этот счет будут ненадежными.

## Литература

1. Technology and society: building our sociotechnical future / ed. by D.G. Jonson and J.M. Wetmore. MIT, 2008.
2. *Grunwald A.* Technology assessment: concepts and methods // Philosophy of Technology and Engineering Sciences / ed. by A. Meijers (Handbook of the Philosophy of Science. Vol. 9) Amsterdam, The Netherlands: Elsevier B.V., 2009.
3. *Грунвальд А.* Техника и общество: западноевропейский опыт исследования социальных последствий научно-технического развития. М.: Логос, 2010.
4. *Горохов В.Г., Грунвальд А.* Каждая инновация имеет социальный характер! (Социальная оценка техники как прикладная философия техники) // Высшее образование в России. 2011. № 5.
5. *Степин В.С.* Философия науки. Общие проблемы. М.: Гардарики, 2006.
6. *Булгаков С.Н.* Философия хозяйства. М.: Наука, 1990.

7. Müller S. Minimal-Invasive und Nanoskalige Therapien von Gehirnerkrankungen: eine medizinethischen Diskussion // Nanotechnologien im Kontext. Hrsg. / A. Nordmann, J. Schummer, A. Schwarz. Berlin: Akademische Verlagsgesellschaft, 2006.
8. Grünwald H.L.R., Revermann Ch., Sauter A. Einsichten und Eingriffe in das Gehirn. Die Herausforderung der Gesellschaft durch die Neurowissenschaften. Berlin: edition sigma, 2008.
9. Mitcham C., Duval R.S. Engineering Ethics. Upper Saddle River, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 2000.
10. Grunwald A. Ethik in der Dynamik des technischen Fortschritts. Anachronismus oder Orientierungshilfe? In: Jahrbuch für Wissenschaft und Ethik, 1999.
11. Streffer Ch., Honnefelder L. (Hrsg.) Berlin: de Gruyter, 1999.
12. Risikoforschung zwischen Disziplinarität und Interdisziplinarität. Von der Illusion der Sicherheit zum Umgang mit Unsicherheit. Hrsg. von G. Banse. Berlin: Ed. Sigma, 1996.
13. Lenk H., Maring M. Umweltverträglichkeit und Menschengemäßheit. Der Mensch im Spannungsfeld von Natur und Technik. S. 61–92 in Deppert, W. u.a. (Hg.): Mensch und Wirtschaft. Interdisziplinäre Beiträge zur Wirtschafts- und Unternehmensethik. Leipzig, 2001.
14. Fleischer T. Nanotechnologie // Fallstudien zur Ethik in Wissenschaft, Wirtschaft, Technik und Gesellschaft // M. Maring (Hrsg.). Karlsruhe Institute für Technologie (KIT): KIT Scientific Publishing, 2011.
15. Hertsgaard M. Expedition ans Ende der Welt. Auf der Suche nach unserer Zukunft. Frankfurt a.M., 2001.
16. Hermann A. Wie die Wissenschaft ihre Unschuld verlor. Stuttgart, 1982.
17. Ленк Х. Ответственны ли ученые за безопасность технических систем? // Философские науки. 2011. № 8.
18. Mitcham C. Ethics and technology. In: Philosophy of Technology and Engineering Sciences / ed. by A. Meijers (Handbook of the Philosophy of Science. Vol. 9) Amsterdam, The Netherlands: Elsevier B.V., 2009.
19. Krohn W. Technologischer Wandel als Sozialer Prozess // Verbraucherpolitische Hefte. 1992. № 15.
20. Rammert W. Technik aus Soziologischer Perspektive 2. Kultur- Innovation- Virtualitaet. Westdeucher Verlag, Wiesbaden, 2000.
21. Weyer J. Techniksoziologie. Genese, Gestaltung und Steuerung Soziotechnischer Systeme. Grundlagentexte Soziologie (Hg.: Klaus Hurrelmann). Weinheim und München: Juventa Verlag, 2008.
22. Krohn W. Technologischer Wandel als sozialer Prozess // Verbraucherpolitische Hefte. 1992. №. 15.
23. Hennen L., Petermann Th., Scherz C. Partizipative Verfahren der Technikfolgen-Abschätzung und parlamentarische Politikberatung. Neue Formen der Kommunikation zwischen Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit. // TAB-Arbeitsbericht. Berlin, 2004. № 96.

24. *Joss S., Bellucci S.* (Hg.) Participatory Technology Assessment: European Perspectives. London, 2002.
25. *Petermann Th., Scherz C.* TA und (Technik-) Akzeptanz (-forschung) // Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis (TATuP). Karlsruhe, 2005. № 3/14.
26. *Sarcinelli U.* Auf dem Weg in eine kommunikative Demokratie? Demokratische Streitkultur als Element politischer Kultur // Sarcinelli U. (Hg.). Demokratische Streitkultur. Theoretische Grundpositionen und Handlungsalternativen in Politikfeldern. Opladen, 1990.
27. *Steyaert S., Lisoir H., Nentwich M.* (Hg.). Leitfaden partizipativer Verfahren. Ein Handbuch für die Praxis. Brüssel, Wien, 2006.
28. *Paschen H., Coenen Chr., Fleischer T.* u.a. Nanotechnologie. Forschung, Entwicklung, Anwendung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2004.
29. *Fiedeler U., Fleischer T., Decker M.* Technikfolgenabschätzung zur Nanotechnologie: Roadmapping als neues Instrument // Nachrichten. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, 2004. № 4.
30. *Fabricius N.* Status und Perspektiven im Programm Nanotechnologie // Nachrichten. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, 2005. № 1–2.
31. *Fleischer T.* Technikfolgenabschätzung zur Nanotechnologie // Nachrichten. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, 2005. № 1–2.
32. *Schmid G.* et al. Nanotechnology. Assessment and Perspectives. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
33. *Grunwald A.* Nanoparticles: Risk management and the precautionary principle // F. Jotterand (eds.): Emerging conceptual, ethical and policy issues in bionanotechnology. (Philosophy and Medicine. Vol. 101). Berlin: Springer 2008.
34. *Renn O., Roco M.C.* Nanotechnology and the need for risk governance // Journal of nanoparticel research. 2006. Vol. 8 (2).
35. *Horkheimer M.* Zum Problem der Voraussage in den Sozialwissenschaften // Max Horkheimer. Gesammelte Schriften. Band 3. Schriften 1931–1936. Frankfurt a.M.: Fischer Taschenbuch Verlag, 1988.
36. *Христианович С.А.* Механика сплошной среды. М.: Наука, 1981.
37. *Horkheimer M.* Zum Problem der Voraussage in den Sozialwissenschaften.



**Vitaly G. Gorokhov**  
**Engineering Sciences: History and Theory**

**The History of Science from the philosophical Point of View**

In the modern scientific landscape we can see yet more a special type of scientific discipline — a scientific-technological discipline. New scientific-technological disciplines are unique in that they emerge at the interface between the scientific and engineering activities and are supposed to ensure an effective interaction of the two aforementioned types of activity. Characteristic of the scientific-technological disciplines is a more close relationship with the engineering practice. They have at present or are founding disciplinary organizations (a specific range of publications and a limited research community), and now have a stable position in science. In addition, as shown above, by the second half of the 20<sup>th</sup> century, a majority of the scientific-technological disciplines had begun their own theoretical studies, which have received the status of a technical theory. In this book is investigated the history of the engineering sciences and first of all different technological theories in these sciences like the theory of mechanisms, electric circuit and network theory, theory of servomechanisms, etc. The genesis of the technological theory in the radio engineering and classical radiolocation is investigated in the context of the relationships between natural and engineering sciences. The origin of the systems engineering as new type of the scientific-technological discipline is analyzed at the example of the of the radar systems engineering and the design of the automated management systems. Micro and nano systems engineering as a new field of the systems engineering are represented the new type of the nonclassical scientific and engineering disciplines.

We have today in the scientific community more connection between science and technology (also in the basic research sphere). We are saying already about «technoscience», for example nanotechnoscience. Nanotechnology is at the same time a field of scientific knowledge and a sphere of engineering activity, in other words — NanoTechnoScience — similar with Systems Engineering as the analysis and design of complex man/machine systems but now as large-scale micro- and nanosystems. In nanotechnoscience, on the one hand, explanatory models of natural phenomena are drawn up and predictions of the course of certain natural events on the basis of mathematics and experimental data are formulated as in classical natural science, and, as in the engineering sciences on the other hand, not only experimental arrangements are constructed, but also structural plans of new nanosystems previously unknown in nature and technology.

# CONTENT

## Foreword

### Introduction

1. Place and role of the philosophy of technology in the modern philosophy and his interrelationship with the philosophy of science
2. The structure of the technological theory in the classical engineering sciences
3. Modern complex scientific-engineering disciplines
4. Technoscience as a new form of the modern scientific-technological activity

Literature

### Chapter 1. Technology and Mathematics

- 1.1. Prehistory: relationships between technology and mathematics before the origin of the engineering sciences
  - 1.2. Emerging of the theory of mechanisms as an engineering science
    - 1.2.1. Manufacturing, constructional and kinematic theory of machines
    - 1.2.2. Gaspard Monge and the Ecole Polytechnique
    - 1.2.3. Principles of Mechanism of Robert Willis
    - 1.2.4. Franz Reuleaux's «Theoretical Kinematics»
    - 1.2.5. General classification and mathematical theory of mechanisms and machines
    - 1.2.6. Nanomachine as «mechanical mechanism»
  - 1.3. Electric circuit and network theory – logic, mathematics, technology
  - 1.4. Theory of servomechanisms – interdisciplinary synthesis with the mathematical foundations
  - 1.5. General simulation languages
- Literature

### Chapter 2. Technology and Natural Science

- 2.1. Classical engineering sciences
- 2.2. The origin of the technological theory in the radio engineering: from the Faraday's and Maxwell's electrodynamics through the technological consequences of the Heinrich Hertz's experiments
  - 2.2.1. The structure of the electrodynamics theory Faraday – Maxwell – Hertz
  - 2.2.2. Experimental proof of the Maxwell's theory von Heinrich Hertz and his consequences
  - 2.2.3. Perfecting of the experimental equipment
  - 2.2.4. The origin of the radio engineering
  - 2.2.5. Construction of a technological theory - theoretical radio engineering
  - 2.2.6. Nanotechnoscience as nanoelectronics

- 2.3. Methodological analysis of the genesis of the classical radiolocation
  - 2.3.1. The principle of the methodological analysis of the history of the radar science and radar technology as scientific-technological discipline
  - 2.3.2. The origin of the radiolocation as a new research direction of the radio engineering
  - 2.3.3. Radiolocation as a new research field in the framework of the radio engineering as basic scientific-technological discipline
  - 2.3.4. Radiolocation as an independent scientific-technological discipline

Literature

### **Chapter 3. Systems Engineering: Large-Scale Systems as the Subject for Investigation and Design**

- 3.1. The origin of the systems engineering as new type of the scientific-technological discipline
- 3.2. Theoretical systems engineering: systems research and systems design
- 3.3. Radar Systems engineering as non-classical scientific-technological discipline
  - 3.3.1. Theoretical problems of the radar systems engineering
  - 3.3.2. Organizational aspect of the emerging of the radar systems engineering
- 3.4. Elaboration of automated management systems in the USSR industry in the sixties – seventies years of the 20th century as systems engineering design
  - 3.4.1. General information
  - 3.4.2. The evolution of the notion «automatic control systems» to the «automated management systems»
  - 3.4.3. Automated management systems for single enterprise and for the branch of industry
  - 3.4.4. System support for the creation of the automated management systems and the organization of the systems engineering education
- 3.5. Micro and nano systems engineering as a new field of the systems engineering
  - 3.5.1. General information
  - 3.5.2. Nanotechnology as a cluster of theories
  - 3.5.3. Nano systems ontology as a scientific world view and regulatory of the technological actions
  - 3.5.4. The role of the «universal» means of the computer simulation modeling in the nanotechnology
  - 3.5.5. Abstract structural and abstract algorithmic schemes in the modern technoscience
  - 3.5.4. Novel history of the development of the nanotechnology as technoscience

Literature

### **Conclusion**

Literature