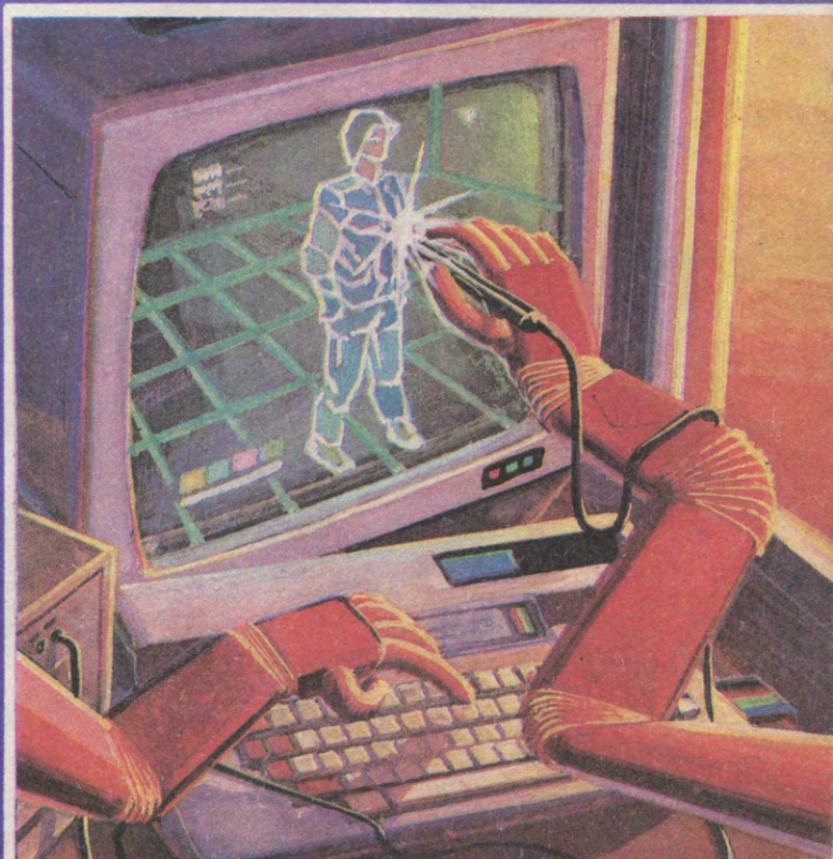


АНТ
П

В. Н. НОВОСЕЛЬЦЕВ

ОРГАНИЗМ В МИРЕ ТЕХНИКИ

КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ



ПРОБЛЕМЫ НАУКИ
И ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА

В. Н. НОВОСЕЛЬЦЕВ

ОРГАНИЗМ
В МИРЕ ТЕХНИКИ:
КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ
АСПЕКТ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1989

ББК 22.18
Н76
УДК 519.7(023)

Новосельцев В. Н. Организм в мире техники: кибернетический аспект.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.— (Пробл. науки и техн. прогресса).— 240 с.— ISBN 5-02-014111-9.

Хорошо ли наши биологи, физиологи и инженеры представляют себе, как живет организм человека? Можно ли знания о машинах применить для понимания того, как организм управляет своей внутренней жизнью? Зачем организму гомеостаз?

Рассказывается о том, как сегодняшняя кибернетика позволяет во многом дать полную картину жизненных процессов в организме; о том, что организму нужно для жизни и о том, как его потребности удовлетворяются, наконец, о том, что сегодня остается в организме непознанным. Читатель узнает также, как поддерживается жизнь человека в самых сложных ситуациях — в современной клинике с ее сложнейшей аппаратурой, в космосе и глубоко под водой.

Для всех, кто интересуется кибернетическими идеями современной физиологии: от школьников и студентов до специалистов — биологов, физиологов, врачей, математиков, инженеров.

Табл. 7. Ил. 74.

Рецензент

доктор физико-математических наук *Ю. М. Свирижев*

Научно-популярное издание

НОВОСЕЛЬЦЕВ Василий Николаевич

ОРГАНИЗМ В МИРЕ ТЕХНИКИ: КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Заведующий редакцией *Л. А. Русаков*
Редактор *С. В. Нижний*
Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*
Технический редактор *Е. В. Морозова*
Корректоры *Т. С. Вайсберг, Л. С. Сомова*

ИБ № 32333

Сдано в набор 22.04.88. Подписано к печати 13.01.89. Т-04057. Формат 84×108/32. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Усл. печ. л. 12,6. Усл. кр.-отт. 13,02. Уч.-изд. л. 14,1. Тираж 40 000 экз. Заказ № 161. Цена 85 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Четвертая типография издательства «Наука»
630077 г. Новосибирск 77, Станиславского, 25

Н $\frac{1402010000-024}{053(02)-89}$ 154-89

ISBN 5-02-014111-9

© Издательство «Наука»,
Главная редакция
физико-математической
литературы, 1989

ОГЛАВЛЕНИЕ

Человек и мир техники (вместо предисловия)	5
I. Структура и функции организма	9
1.1. Организм и живая клетка	9
1.2. Функции клетки	11
1.3. Функции организма	16
II. Метаболическая система организма	24
2.1. Потребности организма	24
2.2. Внешняя и внутренняя среда организма	30
2.3. Потoki, источники и стоки	36
2.4. Метаболическая система организма как совокупность потоков и компартментов	41
2.5. Ауторегуляция в метаболической системе	47
III. Кибернетическая система организма	52
3.1. Управление в организме	52
3.2. Прямая и обратная связь	58
3.3. Прямая и обратная связь: недостатки	65
3.4. Пример: регуляция углеводного обмена в организме	68
3.5. Пассивное и активное управление	71
3.6. Регулирование темпов и уровней	77
3.7. Удовлетворение метаболических потребностей организма	82
3.8. Высшие уровни управления в организме	89
3.9. Управление поведением у простейших животных	97
3.10. Интерфейсы человеческого организма	105
IV. Организм как целое	110
4.1. Гомеостаз	110
4.2. Гомеостатическая кривая	121
4.3. Стресс	126
4.4. Адаптация	129
4.5. Иерархия	133
4.6. Количественные оценки свойств организма	135
4.7. Ресурсы сохранительных свойств	141
4.8. Оптимальность в технике и биологии	143
4.9. Организм в окружающей среде	151
4.10. Психика	154

V. Организм в техническом окружении	161
5.1. Технические средства поддержания жизни.	161
5.2. Аналогия между организмом и машиной	167
5.3. Биотехнические системы	174
5.4. Инженерная физиология	186
5.5. Искусственные внутренние органы	196
5.6. Индивидуальное защитное снаряжение	213
Послесловие	223
Замечания при корректуре	231
Предметный указатель	237

ЧЕЛОВЕК И МИР ТЕХНИКИ **(вместо предисловия)**

Век пара.

Век электричества.

Атомный век.

Космическая эра.

И вот готовится новый прорыв.

Слова «эпоха всеобщей компьютеризации и электронизации» уже произнесены, хотя эпоха сама еще не наступила в силу относительно малой мощности и (тоже относительно) низкой надежности современных ЭВМ (впрочем, весьма вероятно, что в последующих изданиях книги эти упреки в адрес ни в чем не повинных компьютеров будут опущены).

Силы научно-технического прогресса перешли в очередное наступление на хорошо укрепленные позиции, которые надежно и изоциренно, но не злонамеренно защищает Природа.

Далеко позади — первобытно-общинное младенчество человечества и его юность — кватроченто, едва ли не самый интересный период истории. Возрождение — синоним красоты жизни, личной свободы человека, гармонии его физических и духовных качеств, единства с окружающим целостным миром. Потом — мануфактуры, развитие торговли, рост промышленности, бурный прогресс точных наук. И вот XX век: человек — часть мира техники. Мира, который включает в себя электричество и электронику, космическую и атомную технику, средства массовой коммуникации и компьютерную технологию. Человек командует машинами, обслуживает их, выпуская все новые и новые приборы, механизмы и системы. Он создает новейшие промышленные комплексы, усложняя и одновременно совершенствуя мир, в котором живет.

При всем этом человек все равно остается частью животного мира планеты, вершиной эволюционного прогресса, удивительно сложным и совершенным созданием природы. По его замыслу технический мир должен создавать все лучшие и лучшие условия жизни. Однако диалектика препятствует достижению идеала.

«Все в человеке, все для человека». Мудрые и горькие слова, произнесенные на пороге XX века. Конечно, весь технический прогресс, все достижения науки — для человека. Для человека — полиэтиленовые пакеты, рукотворные моря, космические корабли, тысячекилометровые газопроводы, комбайны, миллионы тонн выплавляемой стали и даже ракеты средней дальности и сверхновые системы вооружения. Для человека Аэрофлот — самая мощная в мире авиакомпания, осуществляющая самые крупные грузообороты и пассажирские перевозки. И вот человек, съездившись и накрывшись пальто, пытается заснуть на лавке в зале ожидания самого современного аэровокзала из стекла и стали под гром двигателей самого современного суперлайнера...

Мир, в котором мы живем, многократно увеличивает возможности человека — возможность перемещаться по земле и воздуху, получать информацию, жить в самых сложных природных условиях, осваивать новые миры под водой и в космосе.

Организм каждого человека — частица окружающего его технического мира, связанная с ним тысячами нитей. В отношениях человека с техникой ясно прослеживаются два направления этих нитей. Чтобы жить, человек должен управлять техникой, обслуживать ее: человек — для техники. Но техника и дает человеку возможность жить в новом, сложном мире. Техника — для человека.

Человеческий организм — сам по себе мир, сложность которого многократно выше всего того, что создано нами в области техники. Да и правомерно ли сравнивать ценность мира человеческого организма и ценность мира техники? Познать мир организма — значит не только разобраться в механизмах его работы, близких или далеких от механизмов технического мира. Понять организм — значит и обернуть ему на пользу все достижения современной науки: «все в человеке, все для человека»...

Цивилизация в долгу перед человеком. Успехи наук, изучающих организм, куда более скромны, чем грандиозные достижения ядерной физики, авиации, космонавтики и электроники. Послать космический корабль к загадоч-

ной комете Галлея? Дорого, сложно, но — пожалуйста! «Починить» мышцу, поврежденную при неудачном движении, — извините. Если сам организм с помощью врача справится — хорошо, не справится, — хромота может остаться на всю жизнь. Починить телевизор? Сколько угодно. Помочь отказавшей почке? Печени? Компенсировать потерю слуха, зрения? Увы, наши возможности здесь крайне ограничены.

Чтобы помочь организму, надо по крайней мере понимать, как он устроен. Попытки поддержать жизненные процессы в организме наталкиваются на недостаточное знание их сути.

Как устроены и как функционируют те частицы, из которых состоит организм? В существо этих проблем все глубже проникают биохимия и биофизика. Как в ходе эволюции совершенствуются простые организмы, как передается, изменяется, как накапливается наследственная информация? Наши надежды здесь мы связываем с общей биологией и генетикой. Как живет каждый отдельно взятый организм, как он приспосабливается к своему окружению? Если речь идет о простом мире, содержащем только физические факторы, то физиология знает ответы на очень многие вопросы. Жизнь в сложном организованном мире — это заповедная область психологических наук. Как в организме перерабатывается информация, как происходят процессы управления? Это уже сфера интересов кибернетики с ее традиционным вниманием к организму. Специалисты по информатике и компьютерной технике тоже включаются в процессы изучения жизни, особенно в тот загадочный и едва ли не абсолютно непостижимый сегодня мир, который представляет собой мозг, уникальнейшее явление в природе.

Современная жизнь предъявляет все более жесткие требования к нашим знаниям об организме. Не только потому, что это интересно, — прогресс техники без таких знаний дальше немислим. Мы должны точно знать, на что организм способен и что ему необходимо. Такие знания нужны, чтобы управлять резко выросшими технологическими ресурсами окружающего мира.

Ошибка человека-оператора на атомной станции обходится очень дорого. А ведь эта ошибка — следствие неправильной оценки возможностей человека, его физических и психических качеств.

Ошибка автоматической системы при выборе дозы эффективного лекарства может привести к трагическим по-

следствиям для больного. Такая ошибка — результат неумения количественно оценить изменяющиеся свойства организма.

Знания об организме сегодня должны быть точными, количественными. Математическое моделирование? Компьютеризация исследований? Да, и модели и компьютеры. Необходимо, однако, осознание того, что при попытках количественного описания жизненных явлений с помощью современных методов мы что-то теряем, отходим от той целостности мироощущения, духовности и целомудрия, традиции которых восходят еще к эпохе Возрождения. Понимание этого факта заставляет искать новые пути, приводит к созданию новых подходов, направленных на гармоничное включение человека в окружающий мир.

Так о чем эта книга? О том, как кибернетика сегодня пытается проникнуть в тайны жизни, понять сущность процессов управления жизненными явлениями и о пределах, ограничивающих эти попытки. Об аналогии между организмом и машинами и о том, что организм принципиально несводим ни к какой машине — будь то химическая или информационная. О том, что жизнь организма — это и относительно простая, во многом уже ясная жизнь элементов его тела — клеток, тканей, органов, и загадочная жизнь в сфере психики и сознания.

Короче говоря, организм в мире техники и организм в век техники. Кибернетика дает нам возможность взглянуть на организм как на элемент окружающего нас мира — мира, с которым мы взаимодействуем, в котором мы живем.

1. СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ ОРГАНИЗМА

1.1. Организм и живая клетка

Организмы высших животных (в том числе и человека) состоят из клеток. Каждая клетка представляет собой «элементарную» частицу живого, живущую самостоятельно в определенной среде. Ассоциаты клеток образуют ткани: мышечную, соединительную, нервную и т. д. Пространство между клетками заполнено межклеточной жидкостью. Кровь также представляет собой ткань, хотя довольно своеобразную.

Морфологические образования, складывающиеся в организме из нескольких типов тканей, называются органами. К органам относят сердце, легкие, печень, поджелудочную железу, почки и т. п.

Группы органов, действующих в организме координированно или (и) взаимосвязанных анатомически, называются органами системами, или просто системами организма. Органы в системе связаны функционально (физиологически), т. е. объединены для выполнения каких-либо функций — достижения определенных целей. В организме органы системы тесно взаимодействуют между собой. Однако для удобства рассмотрения их часто считают независимыми. Традиционно выделяют нервную, скелетно-мышечную, эндокринную, сердечно-сосудистую, дыхательную, пищеварительную, выделительную, репродуктивную системы. Все вместе они и создают тот гармоничный набор, который позволяет организму осуществлять все жизненно важные функции.

Процессы, происходящие в организме и его элементах, изучаются рядом научных дисциплин. Биофизика исследует поведение и свойства молекул, из которых строится живая клетка, прежде всего молекул биополимеров. К биополимерам относятся белки и еще более сложные

соединения, состоящие из молекул белков, аминокислот, сахаров и липидов.

Химические процессы синтеза и преобразований молекул биополимеров и низкомолекулярных соединений в организме изучаются биохимией. Внутри клеток (в специальных клеточных структурах) осуществляются, в частности, сложные процессы образования очень больших и сложных биополимеров. Для этого внутриклеточные элементы объединяются «в единый конвейер, в котором каждый из них действует в строгом согласии с остальными» *). В сложных внутриклеточных процессах различают процессы синтеза и сборки молекул. Сборка белков и нуклеиновых кислот из исходных составных частей происходит на внутриклеточных матрицах. Другие молекулы синтезируются более трудоемким и медленным путем, многостадийно, шаг за шагом, в результате последовательных ферментативных реакций.

Функциональную деятельность организма и его элементов, начиная с клеточного уровня, изучает физиология.

Все жизненные явления строго координируются и подчиняются общей цели — сохранению и продолжению жизни. Общие явления, свойственные процессам управления на всех уровнях организации живых систем, изучаются биокibernетикой. Рассматривая организм как единое целое, кибернетика иногда объединяет в единый «блок» все элементы организма, выполняющие сходные функции. Например, можно говорить о всей совокупности биохимических процессов как об одном элементе — «биохимической системе организма» или его «метаболической системе».

Точно так же всю совокупность физиологических систем можно рассматривать как «физиологическое оснащение» организма, обеспечивающее его взаимодействие с окружающей средой. Эту совокупность систем мы будем иногда называть «физиологическим комплексом» систем организма.

Тем не менее, даже говоря об организме в таких обобщенных терминах, нельзя забывать, что все жизненные явления и в биохимической системе, и в физиологическом

*) О процессах в живой клетке подробнее можно узнать из книги Л. Д. Бергельсона «Мембраны, молекулы, клетки» (М.: Наука, 1982), откуда взяты эти строчки.

комплексе основаны на жизнедеятельности клеток и протекают именно в этих «минимальных» живых элементах организма.

1.2. Функции клетки

Рассмотрим теперь, как устроена и функционирует клетка в организме. Строение клетки в самом упрощенном и обобщенном виде показано на рис. 1.

Границей клетки является плазматическая мембрана, образованная липидными молекулами. Плазматическая мембрана, как и прочие мембраны в клетке, не очень

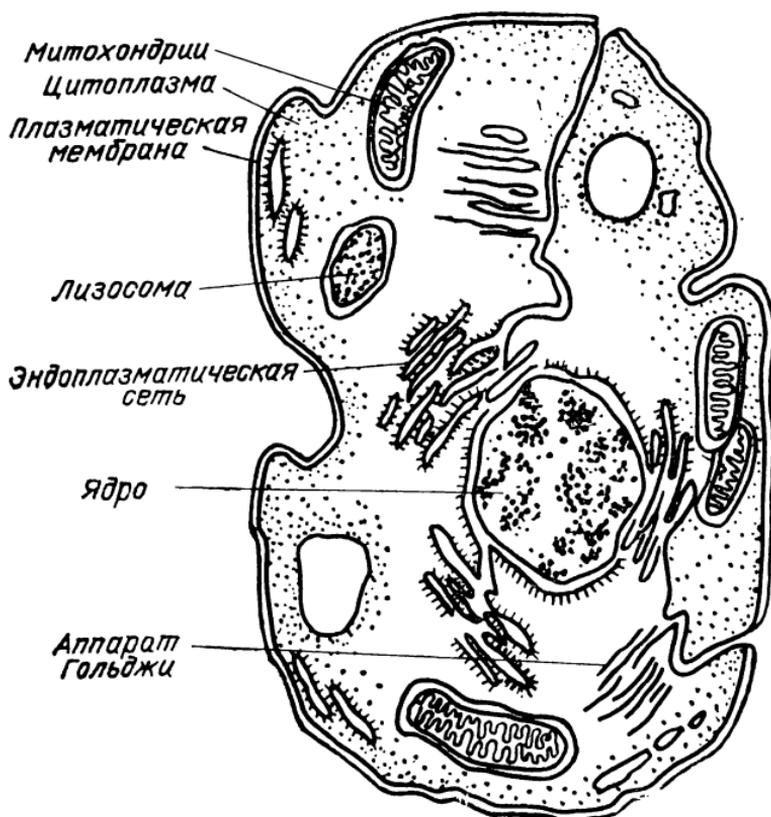


Рис. 1. Строение живой клетки

жесткая и не слишком прочная. Молекулы в мембранах непрерывно меняются местами между собой и с молекулами, находящимися по соседству в жидкостях. Каждая молекула в мембране остается на своем месте около 10^{-7} с. Мембрана как бы находится в динамическом равновесии с жидкостной средой. Такое «жидкое» состояние

делает мембраны проницаемыми для молекул различных веществ, которые нужны клетке для жизненных процессов.

Внутри клетки идут процессы химических преобразований, перемещения и непрерывной замены молекул в клеточных структурах. Эти процессы обычно называются обменом веществ. Обмен осуществляется во всех клеточных структурах, он обеспечивает их сохранение и стабильность.

В клетке есть несколько основных типов внутриклеточных структур. Они также показаны на рис. 1. Пространство между мембранами этих структур заполнено клеточной жидкостью — цитоплазмой.

Обзор внутриклеточных структур удобно начать с ядра. В ядре хранятся молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты — ДНК, содержащие генетическую информацию о потребных организму веществах и способах их получения. Здесь синтезируются так называемые молекулы-посредники, которые из ядра поступают в цитоплазму и переносят генетическую информацию к центрам синтеза веществ.

Молекулы веществ, необходимых для самой клетки или нужных другим клеткам организма, синтезируются в эндоплазматической сети и в аппарате Гольджи. Молекулы веществ, производимых для нужд данной клетки, непосредственно поступают в цитоплазму, а затем употребляются в клеточных структурах для синтеза и сборки биополимеров.

Молекулы веществ, предназначенные «на экспорт», упаковываются в аппарате Гольджи в компактные гранулы и в таком виде через эндоплазматическую сеть выделяются в межклеточную среду.

Энергия, необходимая для процессов синтеза, сборки и для осуществления транспорта, вырабатывается в митохондриях.

Побочные вещества, молекулы которых образуются в ходе метаболических процессов, накапливаются в мембранах и здесь путем окисления превращаются в простые конечные продукты. Растворяясь, конечные продукты покидают клетку через плазматическую мембрану и оказываются в межклеточной среде.

Таким же образом организм избавляется и от остатков погибающих клеток. Каждая живая клетка содержит для этого специальный запас ферментов в особом пузырьке — лизосоме. При гибели клетки ферменты выделяются из

разрывающейся лизосомы и разлагают клеточные осколки на простейшие компоненты, которые также оказываются в межклеточной среде.

Итак, жизненный круг явлений в клетке охватывает следующие функции:

- транспорт из окружающей жидкости исходных веществ во внутреннюю среду клетки,
- получение энергии из части этих веществ,
- синтез из другой части тех же веществ нужных для жизнедеятельности компонент,
- сборку из этих компонент биополимеров по генетическим программам,
- разложение лишних молекул и клеточных остатков на простейшие конечные продукты,
- выведение конечных продуктов за пределы клетки.

Т а б л и ц а 1

Жизненные функции клетки

Функция или процесс	Клеточная структура
I Кибернетические функции: координация метаболических процессов	ядро
II. Метаболические функции:	
1. доставка веществ из межклеточной жидкости	плазматическая мембрана
2. получение энергии (молекул АТФ)	митохондрии
3. биохимические процессы: синтез молекул биополимеров	эндоплазматическая сеть,
разложение отходов жизнедеятельности до конечных продуктов	аппарат Гольджи плазматическая мембрана, внутриклеточные мембраны
4. выведение конечных продуктов в межклеточную жидкость	плазматическая мембрана

Эти основные функции и составляют суть обмена веществ в клетке. Обменные процессы, перечисленные выше, всегда направлены на поддержание постоянства внутренней структуры и постоянного состава клетки. Эти функции приведены в табл. 1, где указаны и клеточные элементы, контролирующие и осуществляющие их выполнение. На рис. 2 показано, как эти функции координируются в клетке.

Указанные функции характерны для всех клеток организма. Многие клетки, кроме того, выполняют еще и специальные функции. Одни из них ориентированы на производство какого-либо важного соединения, нужного организму (в поджелудочной железе, например, β -клетки синтезируют гормон инсулин). Другие — клетки нервной системы — генерируют и передают нервные импульсы, участвующие в координации общеорганизменных процессов. Третьи — клетки мышечных тканей — осуществляют сократительную деятельность, обеспечивая тем самым двигательную активность организма.

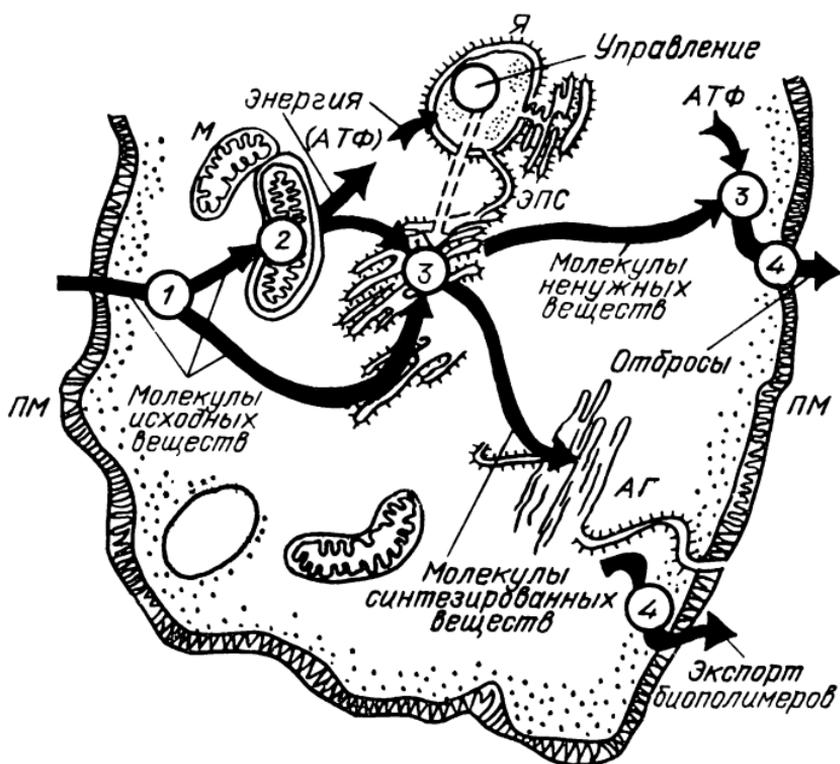


Рис. 2. Внутриклеточные процессы:

Я — ядро, М — митохондрии, ПМ — плазматическая мембрана, АГ — аппарат Гольджи, ЭПС — эндоплазматическая сеть. Цифрами показаны основные метаболические процессы: 1 — доставка веществ в клетку, 2 — синтез энергии, 3 — химические процессы преобразования веществ (синтез нужных соединений и разложение отходов до конечных продуктов), 4 — выведение конечных продуктов из клетки

Хотя механизмы управления в пределах клетки известны пока недостаточно хорошо, все же ясно, что они обеспечивают протекание процессов метаболизма с такими скоростями, которые необходимы для поддержания функ-

дионирования клетки. Считается, что управление в клетке осуществляют в основном ее внутриядерные структуры. «Именно в ядре клетки содержится ДНК, а значит и генетическая информация — инструкции, определяющие характер протекающего в клетке синтеза и остальных форм ее физиологической деятельности» *).

Огромную роль в жизни клетки играет перемещение молекул веществ — как внутри клетки, так и через ее границу. Транспортные процессы связывают клетку с окружающей ее средой, они обеспечивают поступление в клетку нужных молекул в должном темпе, а также выведение из клетки избытка молекул всех веществ, как полезных «экспортных» продуктов, так и отходов.

Транспортные процессы даже на клеточном уровне организованы сложно. Существует три типа транспортных процессов в клетке, два из которых проходят «пассивно», т. е. без специального расходования энергии. Самый простой вид транспорта — обычная диффузия. Молекулы вещества перемещаются при этом по градиенту концентрации — от мест с высоким их содержанием к местам, где таких молекул меньше. Если, например, молекулы какого-то вещества в процессе сборки включаются в сложные молекулы и тем самым исчезают из внутриклеточной жидкости, то диффузия будет восполнять недостаток этих молекул за счет их притока из соседних областей цитоплазмы.

Транспорт молекул многих веществ через мембраны путем их диффузии идет настолько медленно, что не может

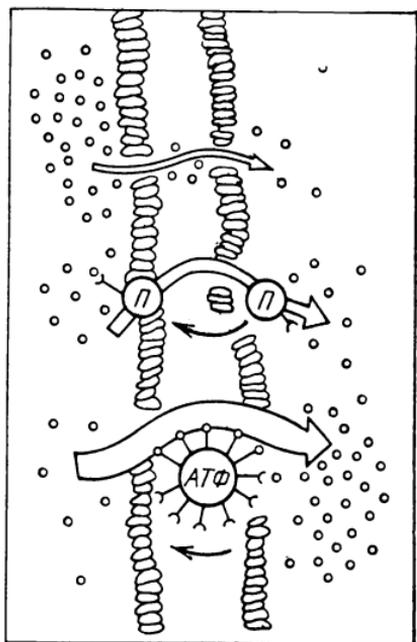


Рис. 3. Механизмы транспорта веществ через мембраны.

Сверху вниз: пассивный транспорт — диффузия молекул по градиенту концентрации; облегченный транспорт — диффузия молекул, прикрепляемых к молекулам-переносчикам; активный транспорт — перекачка молекул через мембрану специальным насосом против градиента концентрации

*) Эти слова принадлежат Питеру Медавару и его жене Джин — авторам книги «Наука о живом», переведенной на русский язык (М.: Мир, 1983).

покрыть нужд клетки. Тем не менее для многих веществ этот механизм транспорта играет основную роль: величина градиента концентрации вещества на мембране является основным фактором, который регулирует скорость (темп) этого процесса.

Диффузия многих веществ через мембраны облегчается, если молекулы присоединяются к молекулам другого вещества, легко проходящим через мембрану «вместе с грузом». Такой вид транспорта тоже является пассивным, но идет быстрее. Он называется облегченной диффузией.

Наконец, третий тип транспортных процессов через мембраны — активный транспорт. В этом случае в мембрану встроена специальная молекула-переносчик, которая за счет расходования энергии перекачивает молекулы транспортируемого вещества через мембрану против градиента концентрации. Именно этот механизм работает при транспорте важнейших ионов — K^+ и Na^+ — через клеточные мембраны.

Механизмы работы всех трех видов транспорта через клеточные мембраны схематически показаны на рис. 3.

Поступление в клетку очень больших молекул и даже гранул осуществляется специфическим путем — эндоцитозом. При эндоцитозе клеточная мембрана, выгибаясь внутрь, образует пузырек, в который попадают гранулы и крупные молекулы. Затем пузырек отрывается от мембраны и растворяется внутри клетки, доставив в ее цитоплазму нужные вещества. Аналогичный, но направленный в противоположную сторону процесс называется экзоцитозом.

1.3. Функции организма

«Животный мир нашей планеты удивительно богат и разнообразен» — к этой мысли легко привыкаешь со школьной скамьи. И мы часто даже не задумываемся над удивительным фактом: все это фантастическое разнообразие форм, красок и образов поведения — всего лишь различные способы, позволяющие их обладателям осуществлять один и тот же «стандартный» набор жизненных функций, хотя и в различных условиях обитания.

Этот набор функций одинаков для всех животных организмов — от простейших до высших. Мало того, практически это тот же набор функций, который мы наблюдали в живой клетке.

Родившись, животный организм добывает из окружающей его среды необходимые вещества (с пищей, водой и воздухом) для роста, развития и поддержания своего существования. Затем, оставив потомство, организм исчезает из жизни. Все время, пока организм живет, в нем протекают процессы, которые общи всем живым существам.

Сенсорные системы организма — у высших это зрение, слух, обоняние — через специальные рецепторы непрерывно воспринимают состояние окружающей среды. Потoki нервных импульсов несут эту информацию в управляющие системы организма. Сюда же поступают сигналы с рецепторов внутренней среды организма. На основании информации, которая имеется в «центральных» управляющих системах и поступает от рецепторов, органы или системы управления формируют текущие программы поведения. Эти программы и обеспечивают получение необходимых веществ в виде пищи и воды, рост и развитие организма, его сохранение в данных условиях и производство потомства. У высших животных такие программы формируются центральной нервной системой — ЦНС, они могут быть достаточно специфичными, включать поиск пищи, сон, различного рода защитные реакции, репродуктивное поведение и т. д.

Поведение организма выражается прежде всего через движение. У человека, например, движение дыхательной мускулатуры приносит в организм кислород, движение органов речи рождает слова, движение руки со смычком — музыку. Движение осуществляется «эффекторами» (у рыб — плавниками, у птиц — крыльями).

Любые формы движения требуют расхода энергии. Энергия расходуется из тех запасов, которые образуются в организме за счет преобразования (чаще всего окисления) поступающих извне веществ, условно называемых «топливом».

Другой причиной постоянного расходования энергии является текущий или экстренный «ремонт» и замена состарившихся элементов, составляющих ткани и органы тела.

Вещества, необходимые для такого ремонта, сначала должны быть синтезированы — и они действительно синтезируются в клетках в ходе многочисленных биохимических реакций. Совокупность функционально и структурно связанных процессов преобразования химических веществ в клетках организма и их транспортировки — мета-

болическую систему организма — иногда называют еще «метаболическим котлом». В метаболической системе вещества, поступающие с пищей (субстраты)— белки, жиры, витамины, микроэлементы, преобразуются в более необходимые для организма, иногда сложные, а иногда и в более простые соединения.

Та часть процессов метаболизма, которая направлена на получение из простых веществ более сложных, называется анаболизмом. Компоненты, получаемые при анаболизме, в организме идут на сборку элементов и ремонт клеточных структур. Сам процесс сборки направлен, разумеется, не только на реставрацию отмирающих клеток или тканей. В молодом, развивающемся организме возникают новые органы, он растет и развивается. В организме, способном к деторождению, идет сборка половых клеток и синтезируются специальные вещества-секреты, необходимые для нормального оплодотворения. Эти процессы протекают непрерывно в течение довольно длительного времени в жизни животного организма.

Очень часто в организме возникает необходимость в реализации программ экстренной сборки. Почти постоянно в организм вторгаются вирусы или бактерии, проникают чужеродные белки — антигены. Ответная реакция организма — сборка специфических белков-антител. Строение антител каждый раз строго отвечает вторгшемуся антигену. При встрече с чужеродным белком антитела связывают его.

При разрушении чужеродных клеток — лизисе — их содержимое остается во внутренней среде организма. Во внутренние межклеточные жидкости поступают непрерывно и все «осколки» собственных клеток организма, выходящих из строя. Если это вещества, которые нельзя непосредственно использовать для синтеза нужных макромолекул или для сборки новых конструкций, — подобные отходы разлагаются на более простые компоненты.

Процессы разложения сложных веществ в метаболической системе на более простые получили название катаболизма. Вещества, образующиеся при катаболизме, могут использоваться непосредственно или выступать в качестве строительных блоков, а ненужные вещества приобретают такие свойства (например, растворимость), которые облегчают их окончательное выведение из организма.

Если пока не вдаваться в подробности того, как организованы и каким образом управляются и согласуются

перечисленные процессы, то можно сказать, что они исчерпывают перечень основных жизненных функций организма.

Мы уже знаем, что организм состоит из множества разнородных элементов, каждый из которых играет в жизненных явлениях строго определенную роль. Представим взаимодействие основных элементов организма в обобщенном виде так, как показано на рис. 4.

В верхней части рисунка расположена кибернетическая цепочка «рецепторы — УС — эффекторы». В ней осуществляется восприятие, хранение, переработка и

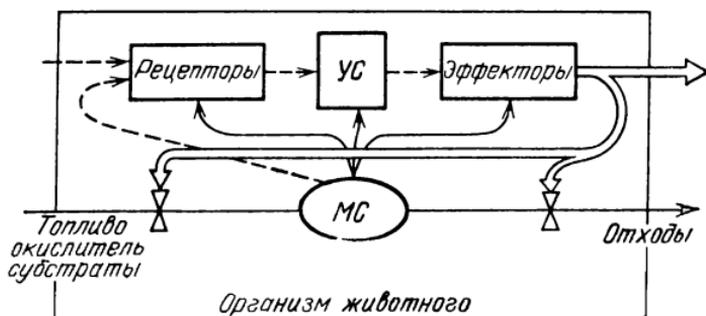


Рис. 4. Обобщенная структура животного организма.

В верхней части рисунка — информационно-кибернетическая часть (УС — центральная управляющая система), в нижней — метаболическая система (МС)

использование информации. Именно здесь протекают все процессы, регламентирующие поведение животного. Наиболее сложную роль здесь играет УС. В нее поступают и в ней перерабатываются сигналы от рецепторов. Рецепторы внутренней среды несут информацию о потребностях организма и стимулируют его поведенческие реакции. У высших животных управляющие функции выполняет центральная нервная система (ЦНС). Рецепторы внешней среды доставляют в ЦНС сведения, позволяющие выбирать такие поведенческие акты, которые соответствуют текущим потребностям организма и могут быть реализованы в данных условиях. Информационные сигналы на рисунке обозначены пунктирными стрелками.

Реализуются поведенческие акты через эффекторы. Эффекторная часть кибернетической системы у высших животных включает органы движения, органы звуковой сигнализации (у человека — органы речи) и т. п. К эффекторной части относятся и все органы, оказывающие различного рода воздействия на внутреннюю сферу орга-

низма — железы внутренней секреции (поджелудочная, тимус и т. д.), железы внешней секреции (например, потовые) и др. Действие эффекторов на рисунке показано двойными стрелками.

Функции организма как кибернетической системы представлены в табл. 2.

Обратимся теперь к нижней части рисунка 4, где показана метаболическая система организма. В ней перемещаются и перерабатываются вещества и энергия, она

Т а б л и ц а 2

Кибернетические функции организма

Функция	Системы, реализующие функции
1. Восприятие информации	Сенсорные системы организма (зрение, слух, осязание и т. д.); рецепторы внутренней среды (хеморецепторы, барорецепторы и т. п.) Центральная нервная система (ЦНС)
2. Обработка информации, принятие решений, формирование программ поведения	
3. Реализация принятых программ	Эффекторные системы организма (скелетно-мышечная, нервная, эндокринная, репродуктивная, органы речи или внешней сигнализации)

обеспечивает функционирование цепочки в верхней части рисунка (и свое собственное тоже). Центральный элемент этой части — метаболическая система (МС). В метаболической системе происходят процессы анаболизма и катаболизма, контролируемые кибернетической системой. Именно управлением определяется, какие процессы и с какой скоростью должны протекать в метаболической системе. Процессы сборки тоже можно относить к метаболической системе, считая, что МС осуществляет как синтез нужных веществ, так и формирование из них клеточных структур (мембран и других элементов), самих клеток и, наконец, многоклеточных структур, необходимых для жизнедеятельности организма.

Сплошными стрелками, направленными к МС и от нее, показано поступление в организм и выведение из него различных веществ. Эти процессы выполняются специальными физиологическими системами, но управляются они

тоже кибернетической системой — верхней цепочкой на рисунке. Вместе с тем в управлении процессами, происходящими в МС, определенную роль играют и механизмы «низшего уровня», сосредоточенные в самой МС,— так называемые механизмы ауторегуляции.

Т а б л и ц а 3

Метаболические функции организма

Функция	Вещества	Системы организма
1. Доставка из окружающей среды веществ	<p>Субстраты:</p> <p>белки, липиды, углеводы, витамины, незаменимые аминокислоты</p> <p>Топливо:</p> <p>углеводы</p> <p>Окислитель:</p> <p>кислород</p> <p>Транспорт внутри организма</p> <p>АТФ</p>	<p>Физиологический комплекс желудочно-кишечный тракт, система пищеварения</p> <p>те же системы</p> <p>дыхательная система сердечно-сосудистая система</p>
2. Производство энергии	Анаболизм:	Биохимическая система митохондрии
3. Обмен веществ	<p>Анаболизм:</p> <p>биополимеры</p> <p>Катаболизм:</p> <p>высокомолекулярные отходы, некротические элементы</p>	<p>Биохимическая система аппарат Гольджи, эндоплазматическая сеть</p> <p>клеточные мембраны</p>
4. Выведение конечных продуктов из организма	<p>Отходы:</p> <p>азот, креатинин, мочевина, вода, углекислота билирубин</p> <p>Наследственный материал</p>	<p>Физиологический комплекс почки системы дыхания и кровообращения печень и желчная система</p> <p>Репродуктивная система</p>

Функции организма как открытой метаболической системы, обменивающейся с окружением веществами и энергией, представлены в табл. 3.

Любопытно сравнить функции организма, как они представлены в табл. 2 и 3, с аналогичными функциями живой клетки (см. выше табл. 1). Функции эти практи-

чески не изменились, хотя и стали более детализованными, более развитыми. В соответствии с этим изменились выполняющие их эффекторы. Их стало не просто больше, они еще и существенно усложнились. Самое важное отличие коснулось транспортных функций: для обеспечения обменных потоков между внутренней средой и окружением в организме существует целый комплекс физиологических систем. В ходе эволюции для доставки различных компонент из окружающей среды оказалось «удобным» использовать разные механизмы транспорта, и возникли отдельные транспортные системы для субстратов, топлива и окислителя.

Рассмотрим эти функции подробнее.

1. Доставка исходных компонент к месту их утилизации в клетках организма по-прежнему выполняется через клеточные мембраны путем диффузии и с использованием молекулярных насосов. Но прежде чем нужные вещества достигнут клетки, им предстоит долгий путь в организме. Потоки веществ берут в целостном организме начало в его физиологических системах — «источниках». Система пищеварения обеспечивает «централизованное» снабжение организма субстратами и топливом, а легкие — окислителем (кислородом). Характерным и очень эффективным транспортным средством становится на уровне целостного организма перенос веществ в потоке носителя — газа или жидкости. Кислород поступает в альвеолы из воздушного потока, возникающего в легких при движении дыхательной мускулатуры. Поток субстратов возникает при всасывании веществ из полужидкой массы перевариваемых пищевых продуктов, которая перемещается перистальтическими движениями кишечника.

Затем все эти вещества поступают в самую мощную физиологическую транспортную систему организма — сердечно-сосудистую. Поток крови, разветвляясь в организме, доставляет в межклеточную среду всех органов кислород, субстраты и топливо. А из межклеточной среды клетки уже могут получить нужные им вещества своими собственными средствами, путем диффузии.

2. Производство энергии. В целостном организме процессы получения энергии происходят все в тех же митохондриях клеток. Разница состоит лишь в том, что теперь этот процесс регулируется центральными и ауторегуляторными механизмами в соответствии с нуждами всего организма. Энергия запасается в виде химических связей энергоемких молекул аденозинтрифосфата (АТФ) и

может переноситься в виде этих молекул потоками крови. Таким образом, производство энергии в организме сосредоточено в его биохимической системе, но ее транспорт осуществляется физиологическими системами.

3. Процессы синтеза. Эти процессы целиком выполняются в пределах биохимической системы. На уровне целостного организма добавляются лишь механизмы управления и координации функций различных синтезирующих органов. В целостном организме органы содержат определенные типы клеток, специализирующихся на производстве одного или нескольких нужных всему организму веществ. Такие вещества, производящиеся в одном месте, затем распределяются между всеми потребителями в организме в соответствии с текущими потребностями. Внутри организма их транспорт выполняется также физиологическими системами — сердечно-сосудистой и лимфатической.

4. Выведение конечных продуктов. Эти процессы в организме существенно усложнены и специализированы по сравнению с аналогичными процессами в клетке. Функция выведения целиком лежит на физиологическом комплексе организма. Частично выведение конечных продуктов возложено на те же потоки вещества-носителя, которые приносят в организм кислород и субстраты. Это углекислота и пары воды, удаляемые через легкие, билирубин — через кишечник. Другие продукты обмена из межклеточной среды собираются в печени, где разлагаются до простейших компонент и затем выводятся во внешнюю среду через почки (азотистые соединения, мочевины) или через потовые железы (высокомолекулярные вещества). Органы репродуктивной системы организма обеспечивают эффективное выведение наследственного материала.

Существенную роль во внутриорганизменном транспорте отходов к местам их выведения играют все те же системы — сердечно-сосудистая и лимфатическая. Кровь, помимо всего прочего, является еще и переносчиком тепла от работающих систем организма, где оно образуется в избытке, к периферическим «теплообменникам», где тепло уходит из организма, спасая его тем самым от перегрева и гибели.

II. МЕТАБОЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОРГАНИЗМА

2.1. Потребности организма

Поддержание жизни само по себе представляет для организма довольно тяжелую задачу. Надо снабжать работающие органы энергией, надо непрерывно поддерживать целостность структуры, заменяя выходящие из строя элементы, удалять осколки отмирающих клеток, отводить в окружающую среду тепло и «отходы производства». Эти процессы идут порой очень интенсивно — например, мощность работающей нервной клетки составляет около 0,123 Вт/г, каждый эритроцит в крови требует замены через 3—4 месяца работы, период полубоювления клеток в печени равен двум суткам.

Поэтому поддержание жизни требует непрерывного расхода вещества и энергии. Этот расход восполняется в организме за счет воды, пищи и кислорода, которые поступают в него извне. За сорок лет жизни через организм взрослого человека проходит около 40 т воды, 6 т пищи и более 8 млн л (около 12 т) кислорода.

Большая часть попадающих в организм веществ превращается там в энергию. Эта часть особенно велика у организмов, которые поддерживают постоянную температуру тела, — у гомойотермных животных, к которым относится и человек. Практически вся энергия, расходуемая организмом, в конечном итоге обращается в тепло. Так, сердце при сократительной деятельности тратит на перемещение крови только 7 % энергии, остальные 93 % превращаются в тепло. Но и эти 7 %, «запасенные» в виде кинетической энергии потока крови, спустя какие-нибудь двадцать секунд также переходят в тепло.

Поэтому, измеряя количество тепла, рассеиваемого организмом, можно определить его энергетические затраты, а по ним — и потребность организма в энергии. Та-

кая оценка оказывается достаточно полной потому, что вся энергия в организме запасается и расходуется в единственной форме — в виде молекул АТФ.

Обычно энергетические затраты рассчитываются в среднем за сутки. Они составляют от 3000 ккал у тех, чья работа не связана с физическим трудом, до 4500—5000 ккал у людей тяжелого физического труда. Затраты энергии у человека в разное время суток неодинаковы и определяются режимом его деятельности. Чем интенсивнее работа, тем выше темп энергозатрат. Обычно принимаются следующие оценочные цифры (в ккал на 1 кг массы в час):

Сон	0,9—1,0
Сидение в покое	1,4—1,6
Ходьба	2,8—3,0
Плавание	7,0—7,2
Легкая работа на производстве	2,4—2,6
Тяжелая работа	6,0—6,5

Другая часть веществ, поступающих в организм, используется в качестве исходного материала, «сырья», для образования соединений, которые уже непосредственно используются организмом в своих структурах. Набор таких соединений очень велик — он включает аминокислоты, полисахариды, жирные кислоты, белки и т. д. Отметим, что не все такие соединения обязательно должны синтезироваться в каждом организме. Так, в организме человека синтезируется ровно половина всех аминокислот, а витамины не могут синтезироваться вовсе. Компоненты, не синтезируемые в организме, называются незаменимыми, все они должны полностью поступать в организм извне.

Молекулы биополимеров рано или поздно занимают в структурах организма места, освобождающиеся при повреждении или гибели клеток. Вещества, образующиеся при распаде погибших клеток, разлагаются в ходе катаболических процессов до относительно простых компонентов, которые выводятся из организма.

Если измерить массу выводимых из организма конечных продуктов, то можно определить суммарную потребность организма в химических соединениях. Однако такие суммарные оценки, в отличие от энергозатрат, не слишком информативны, так как не дают представления об истинных потребностях в каждом из многочисленных веществ, в которых организм нуждается. Поэтому для

оценки потребностей в тех или иных соединениях используются более тонкие методы, как традиционные (например, анализ крови в артериях и венах какого-либо органа — ангиостомия), так и новые, такие, как изотопные. С помощью изотопов, в частности, было выяснено, что синтез белков у человека (в пересчете на содержащийся в них азот) составляет от 0,6 до 1,0 г азота на каждый килограмм массы тела в сутки. Эти цифры ориентировочно характеризуют потребность человеческого организма в белках.

Обычно говорят о потребностях организма в веществах и энергии. Однако такое разделение при всей его общепринятости довольно условно. Дело здесь в следующем. Если в технических устройствах (в турбинах, генераторах, двигателях внутреннего сгорания) сгорание топлива должно давать высокие температуры, то для тонких функций клеток организма температурные градиенты не могут служить энергетической основой. Нефть или уголь как источники энергии организму не нужны. Ему нужен «гибкий» источник энергии, позволяющий получать малые дозы ее в нужном месте и непосредственно для использования. Единственным подходящим источником, мобильным и безопасным, в организме оказались «аккумуляторы» химической энергии — молекулы АТФ.

Энергия, образующаяся при окислении («сгорании») топлива в организме, и превращается в химическую энергию связей в молекулах АТФ. Поэтому процесс образования энергии в живых системах химически представлен как синтез еще одного вещества — АТФ.

Следовательно, говоря о синтезе, транспорте и расходовании энергии в организме, мы часто вообще можем исключить слово «энергия», заменив его словом «аденозинтрифосфат», АТФ. Тогда все потребности организма можно представить как потребности исключительно в веществах, одно из которых — АТФ — тождественно представляет энергию.

Впрочем, можно указать и такие случаи, когда организму требуется не АТФ, а конкретный вид энергии — тепло. Именно тепло требуется организму животного при охлаждении; в этом случае метаболические процессы в биохимической системе перестраиваются, и вместо АТФ образуется непосредственно тепловая энергия. Такой механизм известен как «разобщение дыхания с фосфорилированием» (под дыханием здесь понимается так называемое «внутреннее дыхание», т. е. окислительные процессы).

Необходимые организму вещества, включая АТФ, могут синтезироваться по различным последовательностям химических реакций — метаболическим путям. Каждый компонент, необходимый для жизни клетки, является конечным пунктом специфического метаболического пути, по которому идет его синтез.

Например, практически весь метаболизм углеводов в организме направлен на получение АТФ. Глюкоза, фруктоза, галактоза и другие углеводы подвергаются в ходе

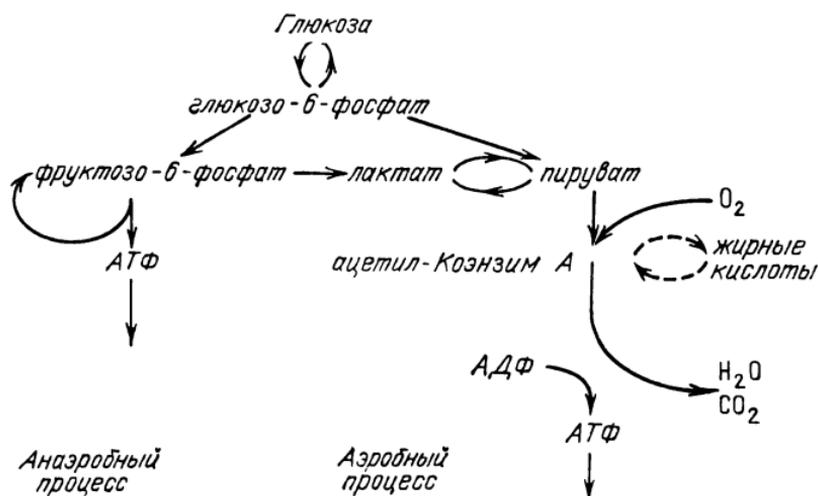


Рис. 5. Структура энергетической системы организма.

На рисунке показана упрощенная схема синтеза АТФ из глюкозы в ходе аэробных и анаэробных процессов. Аэробные процессы представляют собой главный путь обеспечения организма энергией

метаболизма ряду превращений и соединению с эндогенными продуктами, в результате которых образуются молекулы АТФ и конечные продукты — H_2O и CO_2 . На рис. 5 приведена упрощенная схема образования АТФ из глюкозы. Анаэробный (бескислородный) процесс показан на рисунке слева. Он идет без участия окислителя и его сущность заключается в расщеплении активированной глюкозы на две молекулы молочной кислоты с образованием лактата и относительно небольшого количества АТФ. Одновременно с анаэробным процессом идет и аэробный, показанный на рисунке в виде цепочки реакций справа. Глюкоза в присутствии молекул кислорода окисляется до H_2O и CO_2 при параллельно идущем процессе синтеза большого числа АТФ из исходного вещества, АДФ. Лактат, образующийся в анаэробном процессе, может входить в цепочку аэробного окисления как топливо.

Собственно говоря, о глюкозе как о топливе можно говорить только применительно к правой части рисунка, где она действительно окисляется под действием поступающего в клетку кислорода.

Из схемы видно, что за счет разной интенсивности протекания левой и правой цепочек одно и то же количество АТФ можно получить при разном расходе топлива (глюкозы, лактата, а также других сахаров, не приведенных на схеме) и при разном количестве окислителя (O_2). Поэтому одна и та же потребность в АТФ может по-разному трансформироваться в текущие потребности в глюкозе, кислороде, других веществах.

Возможность замены одних веществ другими для получения необходимых соединений делает функционирование организма гибким, а его потребности — во многом взаимозаменяемыми. Гибкость эта, однако, имеет свои пределы. Мы уже упоминали «незаменимые» вещества, которые вообще не могут синтезироваться в организме и поэтому должны полностью поступать с пищей. Кроме того, никакая гибкость не может уменьшить потребности в тех веществах, которые непосредственно используются в процессах синтеза и в других процессах жизнедеятельности. Так, каждая реакция в клетке катализируется своим ферментом, определенным образом распределенным внутри клетки. Убыль каждого из ферментов требует его синтеза — появляется потребность именно в данном типе молекул.

Другой пример. Клеточные мембраны, как правило, очень чувствительны к изменениям температуры. Поэтому различные организмы используют разные способы для того, чтобы мембраны могли сохранять работоспособность в меняющихся условиях. Некоторые бактерии при изменении температуры заменяют в мембранах один тип молекул — насыщенные липиды — на другой. Этот другой тип молекул — ненасыщенные липиды — также строго определен, и при любом изменении температуры в таких организмах непременно возникает потребность именно в данном типе молекул.

Вообще для синтеза и сборки клеточных мембран требуется строго определенный набор липидов, белков и сахаров, причем в определенной пропорции. Соответствующие молекулы должны находиться в жидкостях организма, а их концентрация должна восполняться в таком же темпе, как они уходят из примембранных жидкостей в мембраны.

Таким образом, в каждой клетке, в каждом из органов тела, в каждом из элементов организма протекают процессы, требующие подведения веществ извне. Можно сказать, что все элементы организма имеют свои потребности в веществах. Суммируясь, эти «элементарные» потребности формируют потребности тканей, органов, наконец, и целостного организма.

При формальном рассмотрении будем обозначать темпы расхода веществ, которые характеризуют потребности организма или его частей, символом w . Если рассматривать n процессов, в которых идет потребление веществ, то мы будем иметь n чисел, определяющих потребности организма или какой-то его части в веществах.

Эти n чисел можно записать в виде вектора-столбца w :

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix}.$$

Взятый целиком, вектор w полностью характеризует потребности всего организма или его части. Поэтому будем называть w вектором потребностей. Поскольку потребности со временем могут меняться, каждую компоненту w_i , $i = 1, 2, \dots, n$ можно считать функцией времени. Тогда и вектор потребностей зависит от времени:

$$w(t) = \begin{bmatrix} w_1(t) \\ w_2(t) \\ \dots \\ w_n(t) \end{bmatrix}.$$

Для удобства записи (и для экономии места) вектор-столбец мы будем транспонировать, т. е. записывать в строчку, ставя для обозначения процедуры транспонирования символ T сверху:

$$w = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n]^T.$$

Самые низкие допустимые при жизни темпы протекания процессов, отвечающие минимальным потребностям организма, достигаются в условиях основного обмена. Ясно поэтому, что при описании потребностей необходимо выполнение условий

$$w_i \geq w_i^0,$$

где w_i^0 — интенсивность основного обмена для i -го процесса. Так, для кислорода $w_i^0 = 200$ мл/мин для целого организма (или от 3 до 3,5 мл/мин на килограмм массы).

Последнее неравенство формально отражает известное положение: живой организм, в отличие от технической системы, нельзя «выключить». Пока организм, его клетки живы, существуют и потребности.

Для некоторых жизненных процессов можно, по-видимому, считать, что потребности в определенных веществах не зависят от текущего состояния организма. Для других процессов потребности непосредственно определяются теми действиями, которые организм совершает, и его текущим состоянием. Например, потребность в кислороде резко возрастает при физической деятельности, а потребность в тепле — при охлаждении.

Для описания потребностей организма выше был использован термин «темп потребления вещества» или «интенсивность обмена веществ». Дело в том, что в отечественной литературе традиционно закрепился термин «уровень основного обмена», который не очень удачен. Например, его английский аналог «metabolic rate» (буквально — темп метаболизма) точнее отражает суть понятия — интенсивность процессов обмена, скорость их протекания. Ниже мы будем стараться чаще использовать термин «темп», хотя это и непривычно для читателя (да и для автора тоже). В качестве близких аналогов термина «темп» можно использовать и другие словосочетания — скорость процесса, мощность потока, интенсивность метаболизма и т. д.

Важно отметить, что величина темпов измеряется изменением количества вещества в единицу времени: г/сек, мл/мин, ккал/сутки и т. д. Термин «уровень» ниже мы будем относить только к характеристикам количества вещества (масса, концентрация, напряжение газов и т. п.). Именно поэтому, говоря о потребностях, мы воздерживаемся от термина «уровень обмена веществ» — уровень измеряется в г, мл, ккал, мг %, но не в г/сек или ккал/(г·ч).

2.2. Внешняя и внутренняя среда организма

Представление о том, что для каждого организма существует внешняя и внутренняя среда, введено великим французским физиологом Клодом Бернаром. Он писал: «Для животного есть собственно две среды: одна среда внешняя, в которой помещен организм, и другая среда внутренняя, в которой живут элементы тканей». И далее: «Органы, системы существуют не для самих себя: они су-

ществуют для клеток, для бесчисленных анатомических элементов, которые образуют организменное здание. Со-суды, нервы, дыхательные органы появляются для того, чтобы создать вокруг каждого элемента среду и условия, которые необходимы для этого элемента, снабдить его в надлежащей мере материалами, в которых он нуждается, водой, пищей, воздухом, теплотой».

Современные представления физиологии и смежных наук по существу вытекают из взглядов К. Бернара *). Изучение взаимодействия организма с окружающей средой во многом определяются тем, насколько хорошо исследователь понимает процессы, происходящие на границах между внутренней и внешней средой.

Эта граница в основном проходит по внешним кожным покровам тела и слизистым оболочкам. На внешней поверхности тела расположены рецепторы, дающие информацию о состоянии окружающей среды. Через границу с внешней средой происходит и весь обмен организма веществами и энергией.

Начнем с того, что, вопреки распространенному выражению «кожа дышит», через кожные покровы кислород не может попасть во внутреннюю среду организма. Кожа пропускает только тепло, а также электромагнитные волны и излучения. (Исключение составляют некоторые биологически активные вещества.) Потовые железы выделяют наружу пот, состоящий из воды и растворенных в ней веществ, что играет определенную роль в выведении из организма высокомолекулярных продуктов обмена.

Практически весь обмен веществами между внутренней и внешней средой происходит через три специализированных участка поверхности, расположенные в легких, кишечнике и почках. Во-первых, у этих участков огромная по сравнению с объемом площадь, а во-вторых, эти участки образованы полупроницаемыми мембранами, тесно примыкающими к кровеносным системам внутренних органов.

Через обменные поверхности легких и кишечника движение веществ идет в обе стороны. Через легкие в организм поступает кислород, а из организма выходит углекислый газ и пары воды. В артериальную кровь из лег-

*) К сожалению, работы К. Бернара на русском языке практически не публиковались. Приведенные цитаты взяты из перевода, выпущенного в 1878 г. (СПБ: Изд. И. И. Билибина, 1878).

ких могут попадать также и другие газы — азот, угарный газ. Если в нормальных условиях это не оказывает существенного влияния на состояние организма, то в экстремальных условиях (например, у водолазов или пожарных) такая возможность должна быть исключена.

К нарушению функционирования каких-либо систем или органов может иногда привести излишне интенсивное удаление веществ из организма через легкие. Так, при усиленном дыхании (гипервентиляции) может наступить резкое снижение уровня CO_2 в крови — гипокапния, сопровождающаяся ухудшением состояния организма (головокружением, слабостью).

Через поверхность кишечника во внутреннюю среду организма поступают необходимые для жизни вещества — жиры, белки, витамины, углеводы. Здесь же происходит выделение в просвет кишечника одного из важных продуктов обмена — билирубина, получающегося при распаде форменных элементов крови. Накопление билирубина в организме приводит к отравлению, а выведение его другими путями невозможно.

В почках идут только выделительные процессы — из внутренней среды удаляются конечные продукты обмена, а также ядовитые вещества, попавшие в организм через кишечник или со вдыхаемым воздухом.

Очевидно поэтому, что внешняя среда, с которой непосредственно контактирует внутренняя среда организма, — это воздушная среда в легких (альвеолярный воздух) и жидкостная среда в желудочно-кишечном тракте и почках.

Когда в популярной литературе говорят о внешней среде организма, то обычно упоминают только о состоянии атмосферы и о параметрах воздуха, которым человек дышит. Но вещества, содержащиеся в кишечнике, также составляют для организма внешнюю среду, и при этом среду управляемую. Соблюдение диеты при нарушениях функций почек и при многих нарушениях метаболизма является поэтому (да простит читатель тривиальность утверждения) — самым легким и очень эффективным способом управления внутренней средой организма.

На границах организма осуществляются и «мероприятия» по защите от внешних вторжений, хотя борьба с проникшими через границы инфекциями и токсическими веществами продолжается и во внутренней среде.

Выполнение защитных функций внутри организма возложено на специальные клетки — лейкоциты, обра-

зующиеся в костном мозге (гранулоциты и моноциты) и в лимфоидных тканях (лимфоциты). Эти клетки обладают подвижностью и способностью «отыскивать» и уничтожать чужеродные элементы.

Кроме этих клеток, защитная система организма включает так называемую тканевую систему макрофагов и лимфоидные ткани. Противодействие вторгшимся чужеродным агентам включает два основных процесса — фагоцитоз и формирование антител. Фагоцитоз — уничтожение бактерий, вирусов, а также некротических осколков собственных тканей — выполняется макрофагами, и прежде всего — моноцитами крови. Лейкоциты и макрофаги могут двигаться в организме целенаправленно, по направлению к источникам каких-либо веществ. Это явление известно как хемотаксис. При воспалении тканей, например, за счет хемотаксиса к очагу — источнику многих необычных для организма веществ — направляются макрофаги и лейкоциты, противодействующие их распространению.

Макрофаги обладают способностью закрепляться в тканях органов и оставаться в таком фиксированном состоянии многие месяцы и даже годы, не теряя защитных функций. Совокупность подвижных и неподвижных макрофагов иногда — не очень точно — называется ретикулоэндотелиальной системой. Тканевые макрофаги в разных тканях формируют различные образования — клетки Купфера в печени, ретикулярные клетки в лимфатических узлах, микроглию в тканях мозга.

Именно эти клетки, закрепленные в подкожных и других тканях, обеспечивают охрану границ внутренней среды при повреждениях кожи, альвеолярных сосудов, желудочно-кишечного тракта.

Дадим теперь более формализованное описание внешней и внутренней среды организма. Характеристик внешней среды, важных для жизнедеятельности организма, довольно много. Прежде всего это концентрации всех веществ, которые могут проникать во внутреннюю среду. В альвеолярном воздухе это концентрации (напряжения) газов — O_2 , CO_2 , NO_2 и прочих, а также содержание паров воды и других жидкостей. В желудочно-кишечном тракте это белки, жиры, углеводы — компоненты, на которые расщепляется пища, а также минеральные соли, вода и растворенные в ней вещества.

Далее следуют физические характеристики среды — температура, давление, скорость ветра (важная, напри-

мер, при учете теплопотерь организма), напряженность электрического и магнитного полей.

Каждая из таких характеристик описывается своей переменной. Например, через v_1 можно обозначить концентрацию (или напряжение) кислорода, через v_2 — концентрацию CO_2 , через v_3 — концентрацию (количество) углеводов в ЖКТ, а через v_4 — напряженность электромагнитного поля.

В каждом конкретном случае в рассмотрении должны приниматься те характеристики, которые существенны для решения задач, стоящих перед исследователем. Их число обозначим как l .

Эти l переменных образуют вектор-столбец

$$v = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_l]^T,$$

который мы будем называть вектором внешней среды. Если состояние среды меняется со временем, то

$$v = v(t).$$

Аналогичным образом, вводя для каждой характеристики свою переменную, можно описать и внутреннюю среду организма. Во внутренней среде, конечно же, могут содержаться все вещества, составляющие окружающую среду. Часть их нужна организму, с другой частью организм «борется». Кроме того, в различных частях организма, в его клетках, тканях, органах в различных концентрациях содержатся вещества, синтезируемые в нем или получающиеся в результате разложения некротических остатков и в процессе жизнедеятельности в качестве конечных продуктов.

Часто удобно рассматривать какие-то количества или объемы вещества, так или иначе обособленные в организме, как отдельные самостоятельные объекты. Например, в качестве такого объекта можно взять весь кислород, содержащийся в артериальной крови, и следить за его изменением при физической нагрузке, при изменении состава вдыхаемого воздуха и т. п. Точно так же можно выделить как особый объект изучения сахар печени, гормон, находящийся в тканях данного органа, всю воду в межклеточной жидкости организма и т. д.

Количество какого-либо вещества, которое при описании процессов транспорта и обмена в организме рассматривается как единое целое, называется компартиментом. Описание организма и процессов, протекающих в нем, с помощью компартиментов получило название компартиментального анализа (или компартиментального моделирования).

При формализованном описании организма каждому компартменту в соответствие ставится одна переменная, описывающая количество вещества в этом компартменте. Такие переменные удобно обозначить символами x_1 , x_2 и т. д. по числу выделяемых компартментов.

Например, при описании газообмена в организме можно выделить следующие компартменты:

x_1 — количество O_2 в альвеолярном воздухе, x_2 — то же в артериальной крови, x_3 — то же в тканях организма; x_4 — количество CO_2 в альвеолярном воздухе и т. д.

При описании компартмента вместо количества можно взять любую другую характеристику, характеризующую суммарный запас вещества в компартменте — концентрацию; если это газ — то напряжение и т. п. Поэтому, говоря о компартменте, удобно пользоваться понятием «уровень вещества», независимо от того, как конкретно этот уровень задан — количеством, объемом, концентрацией. Напомним, что уровни измеряются в г, мл, мм рт. ст., мл/100 г, г/л, гмоль и в тому подобных единицах.

Набор уровней, описывающих все рассматриваемые компартменты организма (или его органа, системы), полностью определяет в каждый момент времени состояние внутренней среды.

Этот набор можно записать в виде вектора-столбца

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m]^T,$$

где m — размерность вектора, т. е. число рассматриваемых компартментов. При изменении состояния организма вектор x меняется:

$$x = x(t).$$

Поскольку уровни веществ в организме могут быть только положительными величинами, на каждый сигнал x накладывается естественное ограничение

$$x \geq 0.$$

Если для какой-нибудь биологической системы (органа, ткани, целого организма) известно текущее состояние, т. е. задан набор чисел x_1, x_2, \dots, x_m , то можно сказать, что о системе известно все. Действительно, надо только добавить условия работы этой системы — будущие потребности w_1, w_2, \dots, w_n и характеристики внешней среды v_1, v_2, \dots, v_l — и можно будет решить уравнения системы, т. е. определить скорости всех физических и физиологических процессов в настоящем и будущем, а также найти и скорости всех входящих в описание системы химических реакций.

Обычно такой прогноз в теоретическом исследовании организма и его систем делается с помощью ЭВМ. В теории управления метод анализа систем, основанный на использовании вектора состояния x , получил название метода пространства состояний. Сегодня метод пространства состояний чаще всего используется в научно-исследовательской работе. Его применению в клинических условиях препятствует отсутствие многих измерений величин x_i , необходимых для анализа, а также необходимость использования сложной аппаратуры, в том числе установки компьютеров непосредственно у постели больного. Тем не менее первые успешные шаги по применению математических моделей организма больного, основанные на методе пространства состояний, уже сделаны, и такие методы используются в палатах интенсивной послеоперационной терапии.

2.3. Потоки, источники и стоки

Каждое вещество во внутренней среде организма проходит свою цепь метаболических превращений. Сначала оно появляется в организме — попадает в его внутреннюю среду извне или образуется в ней в результате химических превращений исходных компонент-предшественников.

Будем называть любой процесс — физический, химический, физиологический, непосредственным результатом которого становится появление в организме какого-либо вещества или химического соединения, источником этого вещества.

Процесс внешнего дыхания представляет собой физиологический источник кислорода. Анаэробная реакция расщепления активированной глюкозы (см. рис. 5) является одновременно источником двух веществ — АТФ и лактата. Аэробный процесс окисления глюкозы на том же рисунке служит источником АТФ, жирных кислот, а также двух конечных продуктов метаболизма — воды и углекислого газа. Это — химические источники.

Появившись во внутренней среде, каждое вещество перемещается и накапливается в ней, образуя один или несколько компартментов (об этом говорилось в предыдущем разделе). При перемещении вещества из источника в компартмент или из одного компартмента в другой образуются потоки. Для кислорода, например, можно указать поток из альвеолярного воздуха в артериальную кровь,

затем в межклеточную жидкость какого-либо одного или нескольких органов, из нее — внутрь клеток и т. д.

Иногда потоки могут быть сосредоточенными, ограниченными какими-то естественными границами в организме. Таков, в частности, поток кислорода с кровью, текущей по крупным сосудам — артериям. Но чаще потоки веществ в организме «рассредоточены» по некоторым областям — скорость расхода АТФ при физической работе определяется множеством «ручейков» АТФ во всех работающих мышцах. При обобщенном рассмотрении ситуации все эти ручейки складываются в единый поток — потребление организмом АТФ при физической работе.

Вещества в организме постоянно «уходят» из его внутренней среды. Они либо встраиваются в клеточные структуры, переставая существовать в несвязанном, свободном виде, либо вступают в химические реакции и превращаются в другие соединения, либо, наконец, просто выводятся в окружающую среду.

Любой процесс, при котором данное соединение удаляется из внутренней среды организма, будем далее называть стоком. Внешнее дыхание — физиологический сток CO_2 , процессы образования АТФ — химический сток глюкозы (и углеводов вообще). Процессы сборки клеточных структур являются стоком для многих веществ, содержащихся во внутриклеточной жидкости, — углеводов, липидов, белков, нуклеиновых кислот.

Стоком АТФ являются все процессы, протекающие в организме с затратой энергии, — активный транспорт, мышечное сокращение, генерация и проведение нервного импульса.

Подобно источникам и потокам стоки тоже могут быть сосредоточенными или распределенными в пространстве. В обоих случаях исследователя часто интересует только суммарная, итоговая скорость потока для каждого стока.

Наиболее интересны для анализа процессов в организме характерные химические источники и стоки, расположенные в «активных зонах» метаболической системы, где протекают главные жизненные процессы. Именно здесь происходит расход энергии (сток молекул АТФ), синтез необходимых для жизнедеятельности соединений (сток их исходных компонент-предшественников и источник самих этих веществ), сборка клеточных структур (сток их составных элементов).

Наиболее важны для организма именно эти метаболические стоки, которые можно назвать первичными, или

независимыми. Процессы, происходящие в организме и порождающие эти стоки, нельзя остановить: их прекращение эквивалентно смерти. Изменение темпов протекания процессов в таких жизненно важных стоках происходит только в результате изменения деятельности организма как целого или же при изменении его состояния.

Скорости протекания процессов в жизненно важных первичных стоках метаболической системы определяют текущие потребности организма и его систем. Это и есть те потребности w , о которых говорилось в первом разделе настоящей главы.

Расход энергии и трата веществ в жизненно важных стоках дает полезные и нужные организму результаты — синтез необходимых соединений, сборку макромолекул, формирование новых структур взамен выходящих из строя. Побочным эффектом является выделение конечных продуктов обмена. Поэтому к каждому первичному стоку «привязан» источник побочных веществ. Так, любой расход энергии в организме означает, что от молекулы АТФ отщепляется остаток фосфорной кислоты, и АТФ превращается в АДФ. Это означает, что к любому стоку АТФ привязан источник аденозиндифосфата АДФ, порождающий молекулы его в том же темпе, в каком идет трата АТФ.

Потребление кислорода приводит к появлению углекислого газа: там, где есть сток O_2 , есть и источник CO_2 . Очевидно, что скорости связанных пар источник/сток жестко следуют друг за другом. При образовании АДФ из АТФ коэффициент пропорциональности равен единице — молекула за молекулу. Для процесса образования CO_2 из O_2 в ходе «внутреннего дыхания» коэффициент пропорциональности (он называется дыхательным коэффициентом) равен примерно 0,8.

Скорости протекания первичных процессов в метаболической системе определяют, какие вещества и с какой скоростью будут уходить из внутриклеточной жидкости, превращаясь в энергию, формируя другие вещества или включаясь в молекулы биополимеров. «Присоединенные» источники при этом будут выбрасывать побочные продукты, которые из клеток переходят затем в межклеточную жидкость.

Оба типа процессов работают, «не обращая внимания» на состояние внутренней среды, тем самым навязывая ей вполне определенный режим функционирования.

Именно поэтому темпы первичных процессов мы можем назвать ведущими.

Тогда темпы всех остальных процессов, следящих за состоянием внутренней среды, пополняющих ее расходующими веществами и очищающих от побочных продуктов первичных процессов, можно охарактеризовать как ведомые. Ведомые процессы также порождаются стоками и источниками, но интенсивность функционирования этих стоков и источников уже не является независимой. Темпы ведомых процессов прямо зависят от темпов ведущих процессов, от состояния среды, которое формируется под действием первичных стоков и источников.

Специальная система биохимических регуляторных механизмов управляет работой ведомых источников и стоков в самой биохимической системе с тем, чтобы постоянно снабжать ведущие процессы сырьем, топливом и субстратами — удовлетворять текущие метаболические нужды. Хотя система биохимических регуляторов изучена сегодня еще недостаточно полно, ее роль в организме достаточно ясна, а цели регулирования сформулированы достаточно ясно.

«Очевидно, что клетке выгодно осуществлять реакции, поставляющие энергию, со скоростями, соответствующими ее метаболическим потребностям, и вырабатывать мономерные единицы... со скоростями, соответствующими потребностям в этих соединениях для синтеза биополимеров. При этом образуется постоянный поток, но не избыток необходимых промежуточных продуктов» *).

Однако возможности метаболической системы по регулированию скоростей процессов не беспредельны. Надо непрерывно восстанавливать ее ресурсы и отводить от нее продукты обмена, чтобы в ней постоянно находились все нужные для обеспечения жизненных процессов исходные компоненты и не накапливались отходы. Обе эти задачи решает физиологический комплекс организма.

Именно он создает физиологические источники и стоки, которые порождают потоки необходимых исходных компонент и продуктов обмена, направленные от внешней среды к метаболической системе или от этой системы к внешней среде. Физиологические источники всегда

*) Эта фраза взята из вводной статьи «Предмет биохимии» трехтомного издания «Основы биохимии», перевод с шестого американского издания (М.: Мир, 1981).

являются ведомыми, т. е. темпы процессов в них и скорости порождаемых ими потоков регулируются физиологическими механизмами регуляции в соответствии с состоянием внутренней среды и в зависимости от темпов ведущих процессов в метаболической системе.

Скорости протекания всех ведомых процессов, т. е. скорости ведомых потоков, порождаемых как биохимическими, так и физиологическими источниками и стоками, будем обозначать через y_i .

В реальных условиях все величины y_i в организме ограничены: причиной ограничений являются обычно чисто физические причины. Пропускная способность мембран, диаметры кровеносных сосудов, масса участвующих в каком-либо процессе клеток организма, мощность сердечной мышцы — эти и другие подобные факторы ограничивают максимальные значения потоков веществ в физиологических и биохимических стоках и источниках. Поэтому можно записать очевидное условие

$$y_i \leq Y_i.$$

Величины y_i и w_i , описывающие скорости потоков, имеют размерность уровней, деленных на единицу времени: г/мин, г/с, мл/мин и т. д.

Ограничения, подобные приведенным выше, оказываются весьма существенными при необходимости приспособливаться к меняющимся условиям среды. Например, недостаточная масса митохондрий оказывается фактором, ограничивающим синтез энергии при действии стрессорных факторов.

Чем больше поток вещества из компартмента или к компартменту, тем быстрее изменяется в нем уровень. Если компартмент теряет вещество со скоростью w , а получает со скоростью y , то уровень x изменяется со скоростью $\frac{dx}{dt}$:

$$\frac{dx}{dt} = y - w. \quad (2.1)$$

Если, например, x — количество кислорода в тканях сокращающейся мышцы ($x = 150$ мл), а потребление O_2 мышцей $w = 10$ мл/мин, то в отсутствие притока кислорода извне уровень x понижается (при $y = 0$) каждую минуту на 10 мл.

Если ведомый темп y поступления кислорода в результате вмешательства регуляторных механизмов воз-

растет так, чтобы уравновесить темп расхода ($y = 10$ мл/мин), то компартмент перейдет в стационарное неравновесное состояние:

$$\frac{dx}{dt} = 0. \quad (2.2)$$

Величина x при этом перестанет изменяться, и «зафиксируется» на каком-то уровне, не обязательно равном 150 мл.

Если одновременно рассматривать N ведомых потоков, то удобно все их рассматривать снова как вектор:

$$y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N]^T.$$

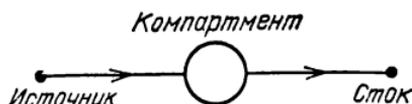
2.4. Метаболическая система организма как совокупность потоков и компартментов

Молекулы химических веществ перемещаются в организме, проникая через клеточные мембраны, попадая то в плазму крови, то в межклеточную жидкость. Путь молекулы, переносимой потоками воздуха, крови, лимфы, диффундирующей в организменных жидкостях, может быть очень сложным. Возникая в каком-нибудь источнике, молекулы образуют потоки, которые затем формируют один или несколько компартментов. Переходя из компартмента в компартмент, молекулы этого вещества попадают в стоки и покидают внутреннюю среду организма.

Чтобы легче ориентироваться в сложной и разветвленной сети потоков и компартментов, часто применяют графические представления. Для наших целей удобна символика, которая первоначально была предложена американским специалистом по системным исследованиям

Рис. 6. Графическое изображение компартмента.

Такое изображение, первоначально предложенное Дж. Форрестером для экономических систем, теперь широко применяется для описания систем любой природы — биологической, технической, социальной



Дж. Форрестером и использована им для построения широко известных экономических и глобальных моделей.

Для изображения компартмента при этом используется большой кружок, а потоки веществ в компартмент и из него обозначаются стрелками, входящими или выходящими из кружка (рис. 6).

Источники и стоки можно обозначать точкой, от которой начинается или в которую приходит стрелка потока. Поскольку в живых организмах различные типы стоков и источников неравноценны, как об этом говорилось в предыдущем разделе, мы слегка модифицируем эти изображения, чтобы отразить специфику живой системы.

Будем дополнительно обводить маленьким кружочком точки, показывающие ведущие источники или стоки. Все они, естественно, являются по природе химическими.

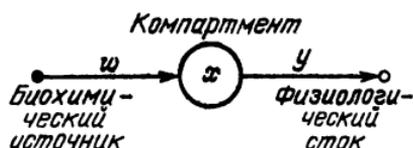


Рис. 7. Компартмент в живой системе.

В биосистемах источник и сток всегда неравноправны: один из них является ведущим, а другой — ведомым

Что касается физиологических источников или стоков, которые отражают деятельность специальных систем организма (дыхание, кровообращение, почечная функция), то будем изображать их не точкой, а маленьким кружочком.

В простейшем случае путь вещества в метаболической системе представляет собой цепочку «источник — компартмент — сток». В такой цепочке ведущим может быть любой конец — как источник, так и сток. В частности, если один конец цепочки лежит в пределах метаболической системы, а другой — вне ее, то ведущим всегда будет тот, который имеет биохимическую природу, а ведомым — физиологический, лежащий вне метаболической системы.

Возьмем, например, цепочку для CO_2 . Углекислота выделяется в метаболических процессах со скоростью w , переходит в компартмент «запас углекислоты в тканях» x , а затем покидает организм с выдыхаемым воздухом (скорость выделения CO_2 равна y). Ведущим является биохимический источник, ведомым — физиологический сток. Графически цепочка выглядит так, как показано на рис. 7.

Если оба конца цепочки имеют биохимическую природу, то ведущим будет тот, который расположен «ближе» к первичным жизненным процессам, а ведомым — более удаленный.

Изобразим теперь в виде системы компартментов и потоков схему синтеза АТФ, показанную ранее на рис. 5 (с. 27). На рис. 8 выделена метаболическая часть систе-

мы и показаны физиологические источники и стоки, обслуживающие ее.

Схема описывает функционирование следующим образом. Жизненные процессы, протекающие с потреблением энергии, формируют ведущий сток для молекул АТФ, показанный в нижней части рисунка. Темп потока в этом

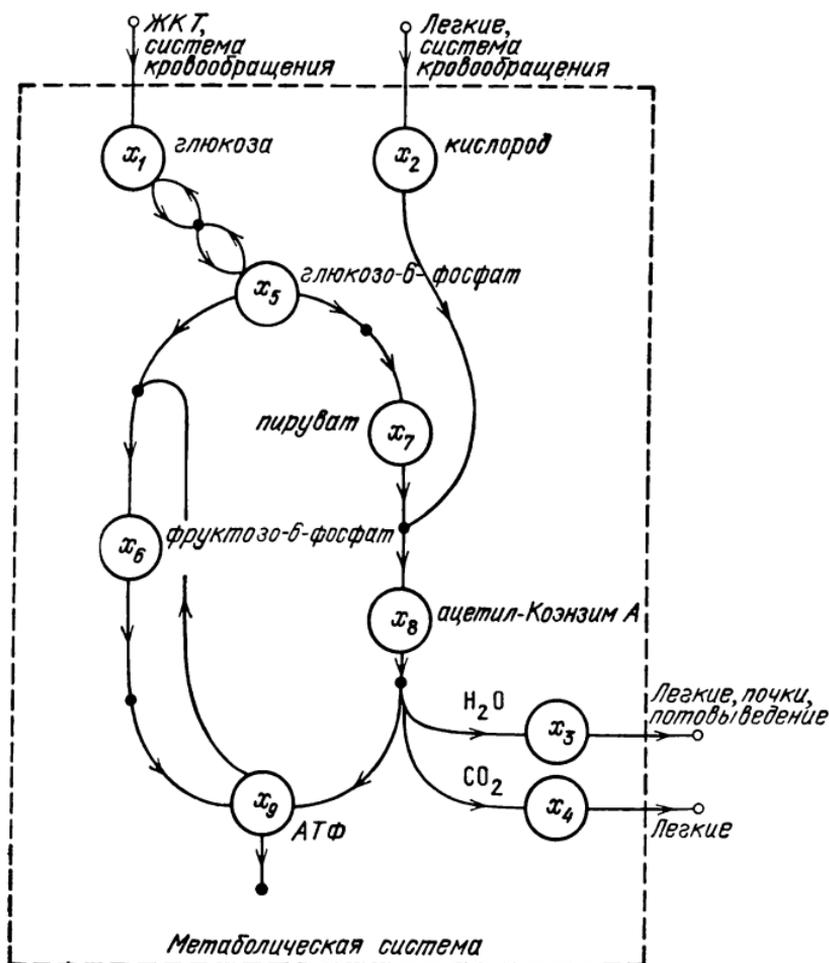


Рис. 8. Энергетическая система организма как система компартментов.

Пунктиром выделена биохимическая часть системы, в которой, собственно, и производится АТФ. Снабжение ее нужными веществами и отведение отходов выполняются физиологическими системами

стоке отражает текущие потребности в АТФ. Эти потребности покрываются за счет расхода топлива и окислителя, которые подаются в биохимическую систему двумя физиологическими источниками в верхней части рисунка. Источники представлены несколькими физиологически-

ми системами: для глюкозы это процессы всасывания из желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) и транспорт с потоками крови, а для окислителя — диффузионные процессы в легких и перенос кислорода гемоглобином крови.

На схеме рис. 8 имеется 9 компартментов (для простоты мы не стали показывать компартменты жирных кислот, лактата и АДФ). Самым важным на схеме является компартмент x_9 — количество АТФ, запасенное в клетках рассматриваемой части организма. Кроме указанного выше ведущего стока в схеме имеется и другой сток энергии: АТФ расходуется в анаэробной ветви синтеза энергии, т. е. в химических реакциях преобразования глюкозо-6-фосфата (компаратмент x_5) в фруктозо-6-фосфат (x_6). Весь анаэробный путь представлен на рисунке левой цепочкой $x_1 - x_5 - x_6 - x_9$ с дополнительным стоком АТФ на участке $x_5 - x_6$.

Надо сказать, что обычно, когда в организме достаточно кислорода, анаэробный путь «заторможен», т. е. скорость его реакций очень невелика. В этих условиях работает энергетически более выгодный аэробный механизм получения энергии, показанный на рисунке справа.

Аэробный путь представлен следующей цепочкой компартментов: глюкозо-6-фосфат x_5 — пируват x_7 — ацетил-Коэнзим А (компаратмент x_8). Точками обозначены отдельные химические реакции или их комплексы, служащие стоками одних веществ и источниками других; сток кислорода находится на участке $x_7 - x_8$.

Топливо и окислитель образуют два компартмента, x_1 и x_2 . Конечные продукты также представлены двумя компартментами (H_2O — компартмент x_3 , CO_2 — x_4). Физиологические стоки, удаляющие эти вещества из метаболической системы, показаны в правой части рисунка.

В этой книге мы будем иметь дело прежде всего с физиологическими процессами, и нам часто будет не нужна такая детальность в изображении химических процессов.

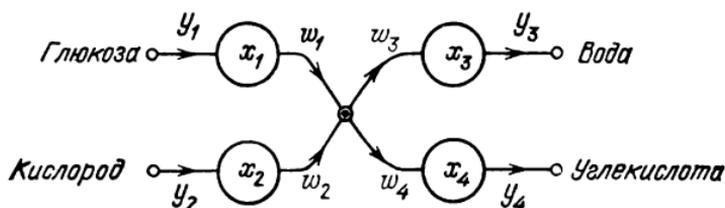


Рис. 9. Компактное изображение метаболической системы

Поэтому, не обращая внимания на промежуточные преобразования веществ, представим все реакции в метаболической системе как единый процесс, служащий стоком кислорода и глюкозы и источником конечных продуктов (рис. 9). При таком предельном упрощении в схеме оказывается один ведущий узел, порождающий четыре процесса: ведущие стоки топлива и окислителя со скоростя-

ми w_1 и w_2 и ведущие источники H_2O и CO_2 со скоростями w_3 и w_4 . Четыре компартмента $x_1 - x_4$, как и ранее, означают соответственно количество глюкозы, кислорода, воды и углекислоты. С каждым из компартментов связаны два потока, один (ведущий) — биохимического происхождения, другой (ведомый) — физиологического. Один приносит вещество в компартмент, другой — выводит из него. Уровень вещества (например, кислорода) в компартменте определяется соотношением между притоком и оттоком, что записывается так же, как и ранее (см. выше формулу (2.1) на с. 40) дифференциальным уравнением

$$\frac{dx_2}{dt} = -w_2 + y_2. \quad (2.3)$$

Если в общем случае к компартменту подходят несколько ведущих и ведомых стоков, то уравнение баланса можно записать в виде

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^n p_{ij}w_j + \sum_{k=1}^N q_{ik}y_k, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.4)$$

Здесь p_{ij} и q_{ik} принимают значения 0, +1 или -1, причем +1 соответствует источнику для i -го компартмента, а -1 ставится в том случае, если w_{ij} или y_{ik} описывают сток из компартмента n ; N — общее число ведущих и ведомых стоков и источников в системе, m — число компартментов.

Уравнение (2.4) можно записать в компактном виде, если ввести матричные обозначения $P = \{p_{ij}\}$ и $Q = \{q_{ik}\}$. Тогда

$$\dot{x} = Pw + Qy. \quad (2.5)$$

Уравнения (2.4) и (2.5) дают окончательное описание метаболической системы в виде совокупности компартментов, источников и стоков. Часто при анализе биосистем считается, что y зависит от x и v линейно, т. е. для вектора y можно написать

$$y = A_1x + B_1v. \quad (2.6)$$

Если подставить это выражение в (2.5), то получим математическое описание метаболической системы организма в виде

$$\dot{x} = Ax + Bv + Pw. \quad (2.7)$$

Все сигналы имеют здесь тот же смысл, что и выше: x — вектор уровней вещества в компартментах системы, w — вектор метаболических потребностей, v — состояние среды. Матрицы $A = QA_1$ и $B = QB_1$ отражают структуру системы: A — связи компартментов друг с другом, B — непосредственное влияние внешней среды на компартменты, P — расположение в системе ведущих источников и стоков.

Уравнения такого типа используются при математическом моделировании систем организма. Их программируют на ЭВМ, а результат решения их показывает, как с течением времени меняются уровни и темпы в зависимости от характера функционирования организма и состояния

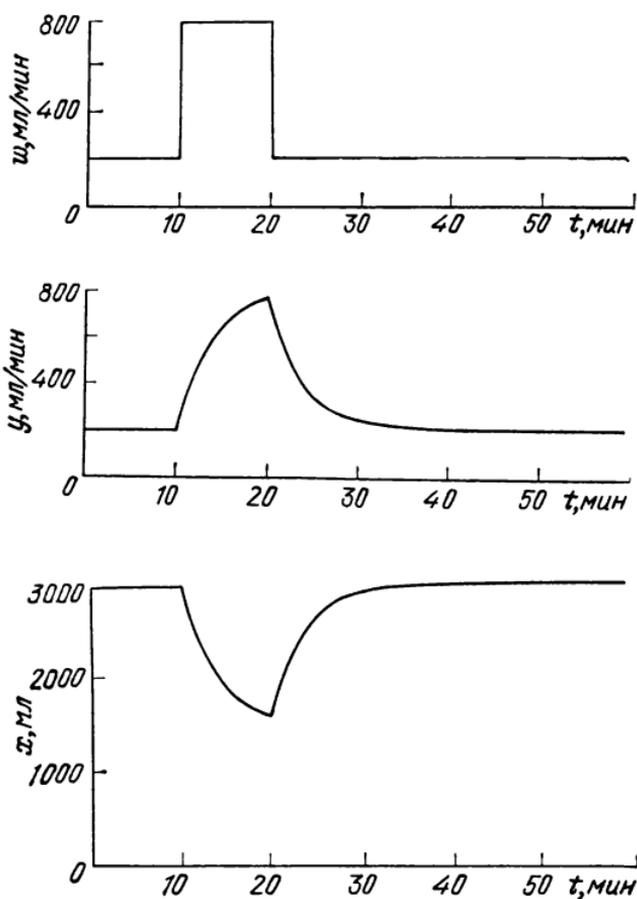


Рис. 10. Решение уравнений системы на ЭВМ.

Компьютер решает уравнения, и полученное решение в графической форме выводится на экран дисплея или на бумагу. Исследование системы путем решения ее уравнений на ЭВМ называется вычислительным экспериментом с системой

внешней среды. На рис. 10, например, даны графики машинного решения приведенного выше уравнения (2.3) для компартмента «кислород в тканях организма», $x(t)$.

Рассмотрим на этом рисунке, как меняются во времени основные переменные, описывающие динамику кислорода в тканях.

На верхнем графике дана зависимость $w_2(t)$ — изменение во времени ведущего темпа потребления O_2 . Сначала в течение 10 мин организм находится в состоянии покоя, $w_2 = 200$ мл/мин, а затем следует десятиминутная физическая нагрузка с повышенным тем-

пом потребления O_2 , равным 800 мл/мин. Затем снова система возвращается в состояние покоя.

На среднем графике — темп притока кислорода в компартмент, т. е. скорость поступления O_2 , равная $y_2(t)$. В покое до начала работы она уравнивает расход w_2 , так что $y_2 = 200$ мл/мин. После начала физической нагрузки физиологические механизмы, управляющие дыханием и кровообращением (здесь мы их не рассматриваем *)), увеличивают поступление кислорода: y_2 возрастает. Поскольку, однако, это возрастание происходит постепенно, с запаздыванием, темп притока кислорода поначалу отстает от темпа его расходования. Поэтому количество кислорода в организме после начала физической нагрузки, как видно из нижнего графика, падает от исходного уровня $x_2 = 3000$ мл, достигая величины 1800 мл. Возникает своеобразная «задолженность по кислороду», которая даже после окончания физической нагрузки заставляет системы дыхания и кровообращения подавать кислород в компартмент с превышением темпов его потребления. Примерно через 10—15 мин после возвращения организма к покою уровень кислорода в тканях восстанавливается.

2.5. Ауторегуляция в метаболической системе

Процессы химических превращений в организме протекают при участии ферментов — специфических белков, которые ускоряют, облегчают, а часто и просто делают возможными те или иные химические преобразования веществ. Молекула исходного вещества — субстрата — присоединяется к строго определенному месту молекулы фермента, принимает нужное положение и подвергается воздействиям, при которых одни химические связи рвутся, а вместо них образуются другие. В итоге с молекулы фермента сходит молекула готового продукта.

Скорость протекания любого процесса в клетке определяется наличием соответствующего фермента и его активностью. Разумеется, чем больше «рабочих мест» в клетке, т. е. чем выше концентрация молекул фермента, тем выше и скорость. Но процессы преобразования субстрата в продукт могут идти на одной и той же молекуле фермента быстрее или медленнее в зависимости от «удобства» ее пространственной конфигурации. Меняя конфигурацию молекул фермента, клетка может делать его более или менее активным. Поэтому чем больше активность каждой молекулы, тем выше скорость процесса преобразования субстрата в продукт.

*) В машинной программе принято

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{T} (y_2 - w_2); \quad y = y_2^0 + (x^0 - x); \quad T = 7 \text{ мин.}$$

Схематически процесс преобразования субстрата S в продукт P под влиянием соответствующего фермента E можно изобразить так, как показано на рис. 11.

Исходный субстрат S (компармент 1 с концентрацией субстрата x_S) получается в ходе некоторой реакции (источник A химического типа). Затем в ходе ферментативной реакции C он превращается в продукт P , который образует компармент 2 (x_P — концентрация продукта).

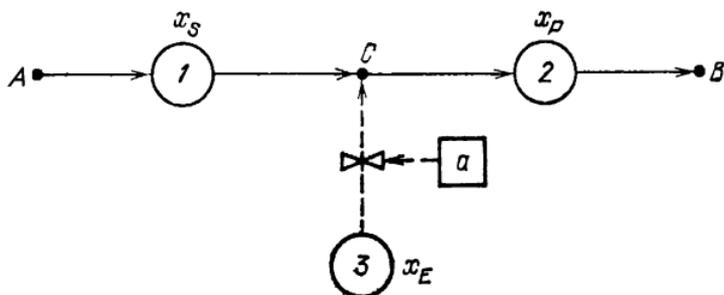


Рис. 11. Схема простой ферментативной реакции

Продукт, необходимый для выполнения других реакций, потребляется стоком B . Допустим, что ведущим во всей этой цепочке является именно сток. Фермент E , образующий компармент 3 с концентрацией x_E , оказывает регулирующее действие на скорость реакции C , причем эта скорость зависит как от концентрации фермента, так и от его активности, обозначенной на рисунке буквой a .

Для обозначения регулирующего действия ферментов на скорости протекания процессов здесь, как и выше, мы используем символику Дж. Форрестера. Скорость изменяется под влиянием сигнального, информационного воздействия каких-то факторов (в нашем случае — концентрации фермента и его активности). Информационные воздействия показываются на таких схемах пунктиром.

Метаболическая система организма составлена из множества цепочек типа ACB (как на рис. 11), которые по-разному могут быть связаны между собой. В такой разветвленной и взаимосвязанной системе скорости протекающих процессов постоянно изменяются с тем, чтобы непрерывно удовлетворять потребности организма во всех необходимых продуктах. Для удовлетворения текущих нужд в самой системе должны находиться все промежуточные вещества, а их концентрации должны поддерживаться в таких пределах, чтобы все реакции протекали устой-

чиво. Часто оказывается, что для этого лучше — и проще всего — иметь постоянные концентрации всех основных веществ в системе.

Оба эти свойства метаболической системы — поддержание нужных скоростей всех реакций и поддержание постоянных концентраций всех необходимых для этого веществ — обеспечиваются за счет процессов ауторегуляции. Ауторегуляция осуществляется ферментативным путем, т. е. посредством изменения количества ферментов и их активности в нужную сторону. Рассмотрим, как происходят процессы ауторегуляции.

Обратимся для этого к рис. 12, на котором показаны те же процессы, что и на рис. 11. Пусть, например, потребность в продукте P уменьшилась (величина потока

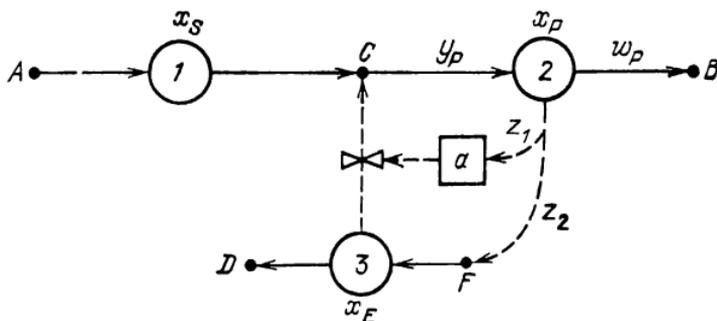


Рис. 12. Более сложная ферментативная реакция.

По сравнению со схемой рис. 11 усложнение состоит во введении дополнительного механизма ауторегуляции — цепи обратной связи

w_P стала меньше). Тогда текущая скорость y_P образования этого продукта оказалась велика. В таком случае в системе происходит постепенное увеличение концентрации молекул продукта x_P , его молекул становится все больше, и готовые молекулы продукта перестают отделяться от молекул фермента. Количество пригодных для работы молекул фермента уменьшается. Мало того, сами молекулы фермента меняют при этом свою форму, и активность фермента a падает. Эта управляющая связь показана на рис. 12 пунктирной стрелкой z_1 .

Рассмотренный механизм обычно характеризуется как действие конечного продукта реакции на ее предыдущую стадию. Он представляет собой один из возможных вариантов обратной связи (когда регулирующее действие сигнала идет «в обратном направлении», «назад» по цепочке связей). Подробнее обратная связь рассматривается в следующем разделе.

Если этого механизма недостаточно, то кроме уменьшения активности фермента может начаться и снижение скорости его синтеза («угнетение» соответствующих реакций). Это тоже механизм типа обратной связи. При его включении происходит следующее. Продолжающееся увеличение x_P уменьшает скорость источника F , что при постоянном стоке приводит к уменьшению наличной концентрации фермента x_E (стрелка z_2).

При возрастании потребности w_P оба эти механизма, действуя в другую сторону, приведут к интенсификации процессов в цепочке $Ax_S Cx_P B$. Можно видеть, что сток B действительно играет в нашей системе роль ведущего: изменение его скорости w_P в любую сторону влечет за собой соответствующие изменения по всему предшествующему «метаболическому пути».

Механизмы ауторегуляции типа обратных связей широко распространены в метаболической системе. Таким путем регулируется, например, процесс синтеза энергии: высокая концентрация конечного продукта (АТФ) угнетает ключевые реакции клеточного метаболизма — гликолиз и окислительное фосфорилирование. Накопление в клетке аминокислот, липидов, сахаров приводит к угнетению ферментов, регулирующих процессы транспорта этих веществ в клетку или их биосинтез.

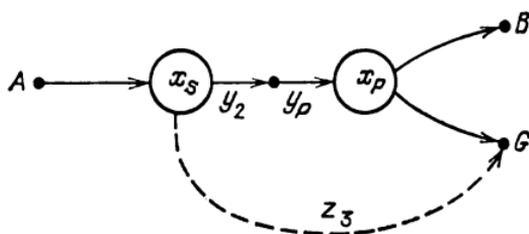


Рис. 13. Механизм ауторегуляции, осуществляемый каналом прямой связи

Другим механизмом ауторегуляции является так называемая прямая связь. При прямой связи предыдущие этапы цепочки оказывают регулирующее действие «вперед», на последующие ее звенья.

Пусть, например, под действием каких-то изменений (возмущений) увеличилась скорость образования исходного субстрата S , так что возросла и его концентрация x_S (рис. 13). Очевидным образом это приводит к «ненужному» ускорению синтеза продукта P за счет возрастания темпов y_2 и y_P . Если, однако, увеличение концентрации

x_S будет одновременно активизировать процессы стока продукта P в другие (побочные) реакции G , его концентрация x_P будет возрастать медленнее, а может и вовсе не возрасти.

Исходный субстрат в этом случае играет роль активатора побочных реакций. Прикрепляясь к молекулам ферментов, активирующих реакции G , он увеличивает их активность. Присоединение молекулы субстрата изменяет конфигурацию молекулы фермента, его каталитическая способность возрастает, и сток G работает активнее.

Рис. 12 и 13 показывают оба механизма ауторегуляции — обратную и прямую связи. Прямая связь показана на рис. 13, она имеет один канал z_3 от субстрата x_S на скорость побочной реакции G , в которой происходит утилизация продукта (фермент, катализирующий эту реакцию, для простоты на рисунке не показан).

Обратная связь на рис. 12 имеет два канала: быстродействующий z_1 , направленный на изменение активности фермента, и медленный z_2 , связанный с изменением скорости его синтеза.

Механизмы ауторегуляции позволяют метаболической системе довольно эффективно поддерживать постоянство концентраций многих внутренних переменных несмотря на изменение метаболических потребностей, скоростей поступления исходных веществ от физиологических источников и т. п. При этом регулирующее действие в системе осуществляется без каких-либо специальных управляющих органов или структур, за счет взаимодействия самих веществ, составляющих метаболическую систему.

Образно говоря, ауторегуляция представляет собой нижний этаж здания управляющих механизмов, созданного организмами в ходе эволюции. Верхние этажи этого здания занимает кибернетическая система организма, выполняющая основные функции по управлению. В отличие от механизмов ауторегуляции, в кибернетической части процессы управления, как правило, осуществляются уже специальными органами или структурами. Зато и процессы эти значительно сложнее, чем простые ауторегуляционные связи, лежащие еще на стыке управляемых и неуправляемых систем.

III. КИБЕРНЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОРГАНИЗМА

3.1. Управление в организме

Под управлением в самом общем виде понимается такое воздействие одних элементов системы на другие, которое приводит систему к заданному состоянию, позволяет достичь определенных целей или нужных результатов.

Элементы, которые осуществляют управление, составляют управляющую часть системы, остальные входят в ее управляемую часть, для которой иногда используют обозначение «объект управления».

Управляющая часть тоже может именоваться по-разному. В технических системах обычно используют термин «регулятор» (управляющее устройство, блок управления). В экономических и социальных системах эта часть называется управляющим органом (или руководящим). В организме управляющая функция физиологических систем чаще всего характеризуется словами «физиологическая регуляция».

Термин «управление» в применении к организму оканчивается очень емким и разносторонним. К управляемым процессам относится прежде всего процесс развития организма (у высших животных — из оплодотворенной яйцеклетки). Управление процессом развития направлено на получение целостного взрослого организма, причем цель эта достигается несмотря на постоянно возникающие возмущения во внешней среде и различного рода внутренние поломки.

Те же генетические механизмы, которые управляют процессом развития, затем поддерживают структуры организма в работающем состоянии, выявляя и восстанавливая выходящие из строя элементы.

В сложившемся организме управление реализуется его кибернетической системой, и происходит оно на разных

уровнях. С некоторыми из этих уровней мы уже познакомились — на уровне химических взаимодействий это ауторегуляция, на субклеточном и клеточном — процессы внутриклеточной регуляции, далее — механизмы физиологической регуляции (управление дыханием, кровообращением и т. д.). Часть этих механизмов имеет поведенческий характер (у животных — поиск и добыча пищи, поведенческие акты терморегуляционного характера вроде поиска тени в жаркий день или принятия защитной позы на холоде). Самые сложные процессы управления реализуются в центральной нервной системе и в психике человека.

Каждый уровень управления имеет свои «локальные» цели, он борется со своими специфическими «опасностями». На биохимическом уровне, например, регуляторные механизмы должны компенсировать возмущения, вызываемые изменением концентраций исходных веществ в клетке. Каким бы путем подобные изменения ни возникали, из-за увеличения ли расхода в данной области клетки или из-за слабого притока нужного вещества извне, процессы биосинтеза и производство энергии в клетках должны протекать по возможности стабильно. Со своей стороны, физиологические механизмы должны реагировать на более заметные изменения во внутренней среде — они призваны поддерживать запасы веществ в клетках несмотря на изменение концентрации этих веществ в окружающей среде или в ответ на изменение интенсивности протекания жизненных процессов в организме и связанное с ним изменение метаболических потребностей.

Механизмы ЦНС управляют поведенческой активностью с тем, чтобы сохранить организм в безопасности, ориентироваться в среде и обеспечивать снабжение организма водой и пищей несмотря на изменение климатических условий, погодных и сезонных явлений.

Кибернетическая система организма реализует процессы управления для получения полезных результатов двух типов. Цели одного типа направлены на сохранение не столько данного организма, сколько на сохранение того вида, к которому организм принадлежит. Процессы управления должны в этом случае обеспечить контроль за производством наследственного материала и выполнение специфических комплексов поведенческих реакций организма. Эти цели управления характерны не для всех живущих организмов и не всегда. Животный организм

всех двуполовых видов способен к продолжению рода только в течение вполне определенного (детородного) периода жизни. Некоторые жизнеспособные гибриды (например, мулы — помесь лошади и осла) вообще не способны оставлять потомство.

Даже на клеточном уровне, где способность к делению кажется едва ли не самым естественным свойством, далеко не все клетки эту возможность реализуют. Нервные клетки, в частности, способность к размножению утратили (а они, конечно, тоже живые).

Результаты другого типа направлены на сохранение жизни и нормального функционирования самого организма (тем самым они также способствуют сохранению данного вида живых организмов). Эти полезные результаты — обеспечение организма пищей, кислородом, водой, защита от негативных воздействий внешней среды, от микро- и макрохищников и т. д. Такие цели характерны для всех без исключения живых организмов, и они реализуются в системе управления в течение всей жизни животного.

Говоря о процессах управления в кибернетической системе организма, обычно имеют в виду именно этот тип процессов. «Кибернетические механизмы для того и существуют, чтобы обеспечить стабилизацию и сохранение энергетической части организма», — пишет известный американский специалист по математической биологии Т. Уотермен. Наличие кибернетического уровня управления позволяет организму сохранять свои структуру и функции (попросту говоря — жизнь) в очень широком диапазоне внешних условий и реализовать все более сложные формы активности и поведения, согласованные с абиотическим, биотическим, а затем социальным и даже техносферным окружением.

Собственно кибернетическая система, представленная специальной системой органов, существует не у всех живых организмов. У одноклеточных животных управленческие функции настолько просты, что для их реализации специальных органов или структур не требуется. Но с усложнением структуры организма, увеличением его массы и объема, когда появляются отдельные органы для снабжения метаболической системы веществами и энергией, появляется и необходимость в специально организованной системе управления со своими рецепторами и эффекторами.

Биохимические процессы, образующие метаболизм организма, у всех живых существ, от низших до высших,

протекают внутри составляющих их клеток. У одноклеточных каждая клетка имеет контакт со средой, и поэтому может получать необходимые вещества непосредственно из окружающей среды. Кислород при этом поступает в клетку путем простой диффузии, а для получения пищи — субстратов — плазматическая мембрана клетки деформируется, образуя небольшой выступ (ложноножку). Ложноножки, захватывающие пищу, у некоторых простейших (таких, как амеба) используются и для перемещений в поисках пищи и лучших условий обитания. Что касается пищеварения и выделения отходов, то для этих целей у простейших образуются другие временные органеллы — пищеварительные и выделительные вакуоли. Таким образом, у низших животных нет постоянных элементов, которые выполняли бы сложные процессы управления.

Подобные специальные элементы появляются на следующих ступеньках организации. У более высокоорганизованных животных наряду с сохраняющимися процессами управления без специальных органов (вроде процесса диффузии) появляется и новый вид управления, для которого требуются специальные органы, выделяющиеся в структуре организмов. Табл. 4 показывает, как параллельно с развитием специализированных органов, обеспечивающих все более дифференцированное снабжение метаболической системы, усложняется и кибернетическая система организма.

В зависимости от того, как реализуется процесс управления — без участия специальных элементов организма или с их помощью, в биокибернетике различают два вида управления.

Если регулирующие воздействия вырабатываются специальным элементом, выделенным из остальной части организма, управление называется внешним. Если же такого элемента выделить нельзя, а полезный результат порождается взаимодействием самих элементов системы (так сказать, равноправных с точки зрения участия в процессах управления), то управление называется внутренним, или встроенным.

Обычно в биологических системах сочетаются как внутренние, так и внешние механизмы управления. Многочисленные встроенные механизмы ауторегуляции действуют, например, в метаболической системе организма. Внутренние механизмы обеспечивают у низших животных и большую часть транспортных процессов. Типичным

Таблица 4

Функции организма и обслуживающие их органы
(составлено по Вилли и Детье)

Уровень организации	Метаболическая система			Кибернетическая система		
	Доставка топлива и субстратов	Доставка кислорода	Выделение продуктов обмена	Рецепторы	Центральное управление	Эффекторы
Простейшие (амеба)	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Кишечно-полостные (гидра)	Рот и пассивная гастроваскулярная полость	Нет	Нет	Отдельные нервные клетки	Отдельные нервные клетки	Сократительные волокна
Плоские черви (планарии)	Рот и пассивная гастроваскулярная полость	Нет	Пламенные клетки	«Глазки», «ушки»	Вентро-латеральный нерв	Реснички, мышечная система
Высшие черви (дождевые, морские); моллюски (улитки)	Активный желудочно-кишечный тракт, рот с простейшими механизмами перетирания пищи	Кровообращение (с гемоглобином)	Простейшие структуры (нефридии)	Глаза, внешние хеморецепторы	Периферическая и центральная нервная система	Нервно-мышечная система
Членистоногие (насекомые)	Желудочно-кишечный тракт, рот с челюстями	Система трахей, система кровообращения	Трубчатая система	Глаза, органы слуха, осязание, внешние хеморецепторы	Периферическая и центральная нервная система	Нервно-мышечная система, органы звуковой и химической сигнализации
Хордовые (включая человека и позвоночных)	Желудочно-кишечный тракт, пищеварительные железы, органы подготовки пищи (зубы, челюсти)	Легкие (или жаберные щели), трахеи и бронхи, кровообращение	Почки, печень, потоотделение, дыхание	Система органов чувств, интеллект, гормоны, проприорецепторы	ЦНС, у человека — психика	Нервно-мышечная система, органы звуковой и химической сигнализации желез внутренней секреции

внутренним процессом управления является, например, пассивная регуляция скорости диффузии.

Любопытно, что в технических системах, которые в основном рассматриваются в теории управления, пассивные механизмы обычно как отдельные контуры или цепи управления не выделяются. Дело в том, что задача инженера, разрабатывающего систему управления каким-либо техническим объектом, состоит в «присоединении» к объекту такого регулятора, чтобы система «объект плюс регулятор» обладала нужными свойствами. Ясно, что такой регулятор всегда будет внешним. Конечно, инженер при разработке своего регулятора тоже учитывает наличие в объекте пассивных механизмов управления (в этом случае инженер скажет, что он управляет объектом «с самовыравниванием»).

Общим выражением внутреннего, встроенного управления стал известный принцип Ле Шателье. Этот принцип утверждает, что если на любую систему, находящуюся в стационарном режиме, подействует внешнее возмущение, то в ней произойдут такие изменения, которые уменьшат результат его действия.

Проиллюстрируем действие принципа Ле Шателье на примере диффузии. Как известно, скорость диффузии вещества в клетку зависит от градиента (разности концентраций) вещества в клетке и в окружающей среде. Если уровень вещества внутри клетки уменьшается, скорость потока вещества из среды в клетку возрастает (за счет увеличения градиента). Это — типичный пассивный механизм, регулирующий скорость процесса в зависимости от концентрации, «встроенный» в систему.

Итак, пусть все процессы в метаболической системе уравновешены, и ее переменные состояния x_i со временем не меняются. Выберем один из компартментов системы, например x_1 . В установившемся режиме расход вещества из этого компартмента, равный w_1 , уравновешен его притоком y_1 . А приток y_1 идет за счет диффузии из окружающей среды, уровень вещества в которой равен v_1 . Тогда

$$y_1 = k(v_1 - x_1). \quad (3.1)$$

Здесь k — коэффициент пропорциональности, показывающий эффективность диффузии. В теории управления такой коэффициент часто называют коэффициентом усиления в канале управления.

Будем обозначать установившиеся значения сигналов индексом s , который ставится сверху: тогда установившееся значение величины x_1 равно x_1^s . Поскольку в установившемся режиме приток и расход равны между собой, имеем

$$k(v_1 - x_1^s) = w_1, \quad (3.2)$$

откуда находим зависимость стационарного уровня нашего веществ-

ва x_1^s в компартменте от режима функционирования метаболической системы (от величин v_1 и w_1):

$$x_1^s = v_1 - \frac{w_1}{k}. \quad (3.3)$$

Пусть в качестве внешнего возмущения выступает возрастание активности организма (увеличение темпа потребления w_1). Тогда из уравнения (3.3) видно, что это приводит к снижению уровня x_1^s . Однако это снижение тем меньше, чем выше эффективность диффузии, т. е. рост коэффициента усиления k улучшает стабильность уровня.

В соответствии с принципом Ле Шателье действие внутреннего регулирующего механизма уменьшает эффект действия внешнего возмущения, причем чем сильнее меняется темп диффузии в ответ на возмущение, тем лучше результат. Поэтому облегченная диффузия (с большим значением k) оказывается и более эффективным средством поддержания постоянства внутренней среды при изменении активности организма, чем простая диффузия.

А вот изменений во внешней среде с помощью механизмов встроенного типа, подобных механизму управления диффузией, демпфировать не удастся. Из уравнения (3.3) видно, что x_1^s изменяется прямо пропорционально величине v_1 , и каков бы ни был коэффициент k , это изменение ослабить не удастся. Действительно, в уравнении (3.3) рост k уменьшает только влияние w_1 , но не влияние v_1 .

Итак, если в живой системе существует встроенное управление типа управления диффузией, то круг возмущений, которые система может демпфировать в соответствии с принципом Ле Шателье, ограничен.

Такой механизм может уменьшать действие возмущений, вызываемых изменениями в интенсивности процессов метаболизма, но он не в состоянии компенсировать результаты ухудшения окружающих условий.

3.2. Прямая и обратная связь

В живых системах управляющая часть может быть как очень простой, так и достаточно сложной. В любом случае, однако, она получает исходную информацию о состоянии окружающей среды и самого объекта управления, перерабатывает ее, «принимает решение» о необходимых воздействиях и формирует их, реализуя тем самым процесс управления. Слова «принимает решение» взяты в кавычки потому, что они вызывают в сознании человека

аналогии, которых в простых системах не может быть.

В сложных системах управляющее устройство для каждого из перечисленных выше этапов управленческого процесса имеет специализированную часть:

— рецепторы (или датчики), воспринимающие состояние системы и факторы окружающей среды в том объеме, который необходим для реализации последующих этапов управления;

— решающая часть (центральное управляющее устройство УУ), которое на основании полученной и имеющейся заранее информации оценивает ситуацию и принимает решение о должном способе поведения и необходимых при этом управляющих воздействиях;

— эффекторы (исполнительные элементы), которые формируют управляющие сигналы и непосредственно воздействуют на управляемый объект.

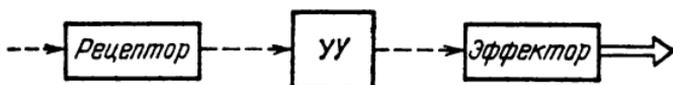


Рис. 14. Кибернетическая система в организме животного.

В самом общем виде эта система целостного организма состоит из элементов трех типов: рецепторов-датчиков, управляющих структур и исполнительных элементов-эффекторов. Их взаимодействие между собой дает очень сложную систему прямых и обратных связей, УУ — управляющее устройство

На рис. 14 показана цепочка из трех элементов, формирующих систему управления; пунктир означает передачу информационных сигналов, двойная стрелка — реакцию исполнительного элемента (эффектора). Эта реакция в случае мышечных исполнительных элементов представляет собой сокращение каких-то групп мышц и соответствующее перемещение в пространстве.

У высших животных и у человека главная часть информационно-кибернетической системы сосредоточена в центральной нервной системе — головном и спинном мозге. Остальные (рецепторные и эффекторные) элементы сосредоточены по всему телу. Рецепторы внешней среды расположены в основном на внешних границах организма — в коже (тепловые, тактильные) или в специальных органах (зрительные, обонятельные, вкусовые). Рецепторы, принимающие участие в регуляции процессов во внутренней среде, также многочисленны и разнообразны. Химический состав и изменения в нем регистрируются хеморецепторами, находящимися в различных органах и в кровеносном русле. Специальные рецепторы (баро-

рецепторы) реагируют на изменение давления в артериальном русле.

Управление основано на передаче внутри системы различного рода информационных сигналов. Например, терморепторы кожи, реагируя на температуру среды, передают информацию в управляющую часть системы в виде нервных импульсов, а информация от центра терморегуляции, несущая сведения о необходимых ответных действиях, поступает на соответствующие эффекторы (гладкую мускулатуру кровеносных сосудов). В результате приток тепла с кровью к органу увеличивается (или уменьшается).

Любая цепочка элементов, вдоль которой происходит передача сигналов, может рассматриваться как канал передачи сигналов. Эти каналы образуют в системе так называемые прямые и обратные связи. Прямая связь имеет место тогда, когда сигналы передаются по «прямому» направлению — от «входов» системы, т. е. от начала цепочки, к ее концу («выходу» системы).

В повседневной жизни мы часто сталкиваемся с цепочками событий, которые хорошо укладываются в схему прямой связи. Зажегся зеленый свет светофора — двинулся поток транспорта, красный — поток прекратился (цепочка состоит из двух элементов). В биологических системах такие простые цепочки выделить можно, хотя это и не так легко. Обычно они входят в более сложные комплексы событий. Пожалуй, только рефлекс (и безусловные, и условные) можно считать проявлением прямой связи в чистом виде. Примером может служить, в частности, отдергивание руки от горячих предметов. Высокая температура здесь является входным сигналом, поступающим на датчик — рецептор. С терморептора поток импульсов, возникающих под действием входного сигнала, поступает по нервным путям (афферентным) в обрабатывающую часть нервной системы, а оттуда — уже по другим путям (эфферентным) — к мышечным элементам. Непроизвольное сокращение мышц вызывает реакцию отдергивания (выходной сигнал цепочки — отдергивание руки). Эта последовательность звеньев вполне подходит под схему прямой связи. По принципу прямой связи организованы многие защитные рефлекс простейших животных (см., например, описание оборонительного рефлекса у виноградной улитки на с. 100).

Еще одна такая цепочка — прямая связь — была рассмотрена выше для последовательности химических реак-

ций в метаболической системе (см. рис. 13 на стр. 50). Эта цепочка $Ax_Sx_P B$ представляет собой последовательность узлов — управляемого источника A на входе, компартиментов x_S и x_P , промежуточной реакции и ведущего стока B .

В организме можно встретить цепочки, передача информации по которым совершается через элементы самой разной природы — химической (вещества), электрической (импульсы, потенциалы), физиологической (специальные сигналы — например, частота сердечных сокращений, артериальное давление и т. п.). Между ними

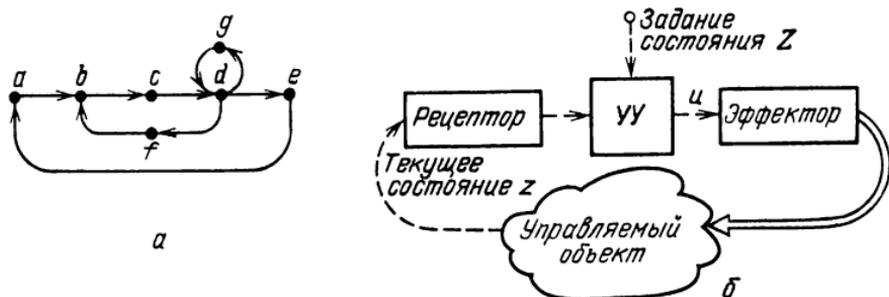


Рис. 15. Система с обратными связями:

а) схематическое изображение, б) возникновение обратной связи в том случае, когда рецепторы воспринимают результат действия эфektorов

осуществляется передача разных форм взаимодействия — передача веществ и энергии, импульсов и механических перемещений. На схемах такие формы переданных сигналов удобно изображать следующим образом: сплошная стрелка означает вещества или энергию, пунктир — передача информации, двойная стрелка — прочие формы взаимодействия (механические перемещения, логические и поведенческие реакции и т. п.).

При обобщенном рассмотрении систем, когда не важна конкретная форма и природа звеньев цепи и передаваемых сигналов, можно не детерминировать их характер, обозначая все взаимодействия просто стрелками (сплошными). Обычно из контекста бывает ясно, о каких сигналах идет речь. Далее в этом разделе мы будем стараться объяснять состав и характер элементов систем.

А сейчас рассмотрим некоторую обобщенную систему, которая состоит из элементов, обозначенных буквами от a до g (рис. 15, а). Прямой канал образуется любой частью последовательности $abcde$, например отрезками bcd , abc и т. д.

В процессах управления огромную роль играет обратная связь. Под обратной связью в общем случае понимается любая передача сигналов в «обратном» направлении, от выхода системы назад к ее входу. Обратная связь может охватывать как всю «прямую» цепочку элементов, так и ее отдельные части. На рис. 15, а можно выделить три цепи обратной связи (каждую из них можно вместе с соответствующим отрезком прямого канала назвать контуром)— dfb , охватывающую элемент c ; ea , охватывающую «всю систему», и контур g , начинающийся и оканчивающийся в одном и том же месте цепочки, в узле d .

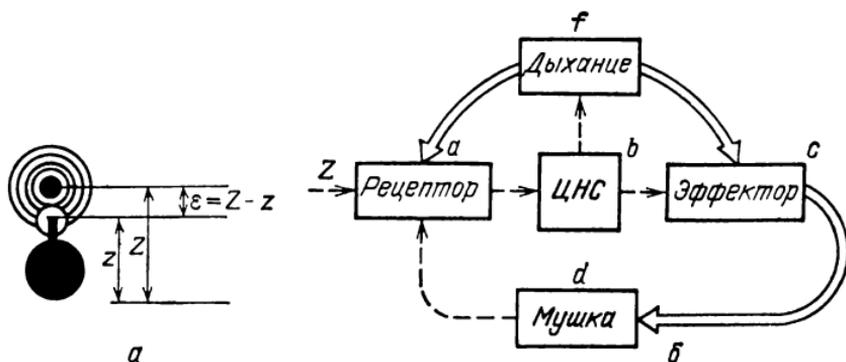


Рис. 16. Процесс прицеливания у стрелка:

а) так располагаются мишень и мушка при прицеливании, б) так выглядит блок-схема взаимодействия элементов системы в процессе прицеливания

Посмотрим, как обратная связь образуется в каких-нибудь физиологических системах. Возьмем, например, цепочку «рецептор — управляющее устройство — эффектор» на рис. 14. Посмотрим, как с ее помощью достигается нужное состояние объекта: для этого рецептор фиксирует текущее состояние объекта z и передает соответствующее значение в управляющую часть, где оно сравнивается с желаемым значением Z (рис. 15, б). В зависимости от величины рассогласования вырабатывается управление u , которое подается на эффектор и изменяет z в нужном направлении до тех пор, пока не будет достигнут нужный результат, равенство $Z = z$.

В системах управления существует много видов обратной связи. Наиболее часто в биологических системах рассматривается именно такой способ организации обратной связи, называемой «обратной связью по рассогласованию». В этом случае после встречи исходного сигнала Z и сигнала z , вернувшегося по каналу обратной связи,

они вычитаются (т. е. оценивается в системе величина их разности, рассогласования). Другие виды обратной связи отличаются от связи по рассогласованию именно тем, как взаимодействуют оба сигнала «после встречи».

Чтобы уяснить разницу, рассмотрим подробнее два примера. Начнем с процесса прицеливания у стрелка, который описывается схемой с обратной связью по рассогласованию (рис. 16).

Видя положение мишени (входной сигнал Z), стрелок должен совместить с ним положение мушки (выходной сигнал z). Глаз стрелка одновременно фиксирует оба сигнала, и стрелок видит разницу между ними e . Рассогласование по прямому каналу ab передается в ЦНС, где формируется сигнал управления мышцами. По эфферентным путям сигналы эти передаются на эффектор — мышцы рук c , сигнал положения мушки d меняется. По каналу обратной связи dab контур замыкается, идет процесс прицеливания.

Заметим, что кроме канала abc в системе имеется и другой канал прямой связи, идущий параллельно ему. Поскольку из-за дыхательных движений f мушка d тоже «дышит», в момент выстрела стрелок должен контролировать дыхание, «затаив» его (прямой канал $bffd$).

Суть процесса управления в системах, подобных рассмотренной, состоит в том, что выходной сигнал «следит» за входным (мишень может быть и подвижной). Поэтому они получили название следящих систем. Если входной

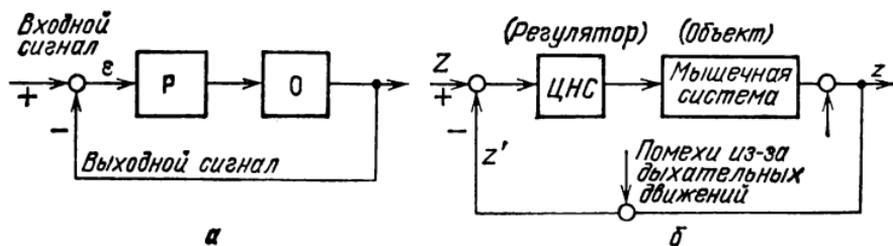


Рис. 17. Простая следящая система:

а) блок-схема в общем виде, б) схема прицеливания, представленная как следящая система (мушка «следит» за целью)

сигнал следящей системы не изменяется во времени, он называется уставкой, а сама следящая система становится «системой стабилизации». Последнее означает, что выходной сигнал системы должен оставаться стабильным несмотря на действие различных возмущающих факторов. Стабильным — и равным уставке.

В простейшем случае, когда имеется всего один контур обратной связи, следящая система изображается так, как показано на рис. 17, а, где P означает регулятор,

О — объект регулирования, стрелка снизу означает контур обратной связи. На рис. 17, б в такой же форме дана схема прицеливания, причем ЦНС играет роль регулятора, рука с оружием — роль управляемого объекта. Дыхательные движения — помехи, возмущающие выходной сигнал (помеха состоит в том, что глаз «измеряет» сигнал z' , отличающийся от z).

Возьмем теперь другой пример, в котором обратная связь представлена уже не в форме рассогласования. Это так называемая система автоматической регулировки уровня (АРУ), которая широко применяется для повышения качества радиоаппаратуры. Цель управления в АРУ — поддерживать постоянную громкость на выходе звукового канала радиоприемника (телевизора, проигрывателя и т. п.) несмотря на ослабление или усиление сигнала на его входе (например, при изменении мощности сигнала с антенны).

Сигнал со входа (рис. 18) проходит на выход по прямому каналу abc , где усиливается в K раз. Входной сигнал (обозначенный Z) может уменьшиться под действием атмосферных помех. Тогда

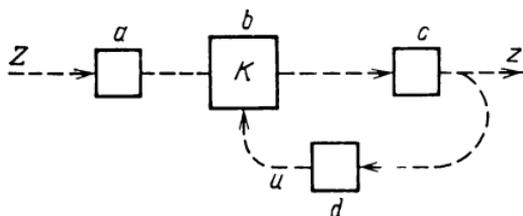


Рис. 18. Очень распространенный, но мало известный тип обратной связи.

Кроме широко известной среди биологов и медиков обратной связи по рассогласованию (или «по отклонению от уставки») существует много других типов обратной связи. На рисунке показана так называемая «параметрическая обратная связь»

уменьшится и выходной сигнал z . Чтобы этого не случилось, в систему вводят обратную связь. Устроена она очень просто. Накопитель d «усредняет» величину z , так что его сигнал u соответствует средней выходной громкости. Сигнал u поступает на другой вход усилителя b и изменяет его коэффициент усиления K следующим образом: чем больше u , тем меньше K , и наоборот, уменьшение u дает увеличение K . В результате мощность выходного сигнала поддерживается практически на постоянном уровне — произведение u на Z меняется очень мало несмотря на изменения каждого из сомножителей.

Действие такой обратной связи основано на том, что она изменяет величину какого-то параметра в канале прямой связи (в нашем случае — коэффициента усиления K).

Поэтому для нее используется термин «параметрическая обратная связь».

В различных системах организма можно выделить очень и очень много обратных связей. В частности, процессы метаболической ауторегуляции представляют собой сложную и разветвленную систему прямых и обратных связей. Заметим, что ни одна из них не работает по принципу рассогласования, все они — параметрические. Кроме того, каналы прямой и обратной связи в организме почти никогда не работают порознь. В рассмотренном выше примере с прицеливанием, например, сигнал многократно проходит по прямым и обратным каналам, прежде чем процесс прицеливания завершается.

В заключение остановимся еще раз на трактовке понятия обратной связи в биологических и технических системах. Мы уже отметили, что в технике сложилась довольно прочная традиция относить все «встроенные» пассивные механизмы управления к объекту управления (их наличие в объекте характеризуется как способность объекта к «самовыравниванию»).

В науках, изучающих процессы в живых системах, сложилась тенденция представлять все управляющие механизмы как контуры обратной связи, охватывающие объект. Так обстоит дело в биохимии, биофизике, биокибернетике. Поэтому и здесь мы рассматриваем встроенные механизмы управления как отдельные цепи, хотя для их реализации в организме и нет специальных регулирующих органов или структур. Тому есть одна довольно существенная причина — встроенные механизмы; напомним, что они никогда не осуществляют процессов управления самостоятельно, играя роль звеньев в сложной системе управляющих связей. А возникающее перераспределение функций между разными «эшелонами» системы управления как раз и становится объектом изучения специалистов по управлению в биосистемах. И тогда простейшие «встроенные» механизмы — управление скоростью диффузии, метаболическая ауторегуляция и т. п. — становятся равноправными участниками регуляторных процессов в живых системах.

3.3. Прямая и обратная связь: недостатки

Понятия прямой и обратной связи настолько привычны сегодня биологам и физиологам, что нет необходимости доказывать правомерность их использования при

анализе биологических систем. Скорее наоборот, надо чаще подчеркивать, что применение этих понятий к сложным биологическим системам требует определенной осторожности.

Во-первых, надо предостеречь читателя от некоторых стереотипов мышления. Это касается прежде всего «отрицательной» и «положительной» обратной связи. Эти понятия в свое время были введены в технике для простых одноконтурных систем (в которых был всего один канал прямой связи и один канал обратной связи). Если выходной сигнал, вернувшись по каналу обратной связи, ослаблял действие входного сигнала, обратная связь называлась отрицательной. Отрицательную обратную связь легко, например, выделить на рис. 17 (если отвлечься от канала механических возмущений f). Это — отрицательная обратная связь по рассогласованию e : когда e увеличивается, выходной сигнал z меняется так, чтобы уменьшить его.

Параметрическая обратная связь на рис. 18 — тоже отрицательная, хотя в ней нет сигнала рассогласования. Если сигнал z оказывается слишком большим (громкость велика), то сигнал u по каналу обратной связи уменьшает его действие.

Вот здесь и следует проявить внимание. В биологической литературе — особенно популярной — часто можно прочесть, что отрицательная обратная связь якобы всегда стабилизирует систему, делает ее более устойчивой, а наличие положительной обратной связи, наоборот, всегда лишает систему устойчивости. Тем не менее оба эти стереотипа неверны.

В действительности возможны случаи, когда отрицательная обратная связь нарушает устойчивость системы (например, если сигнал приходит по каналу обратной связи с большим запаздыванием). А что касается положительной обратной связи, то в целом она действительно способствует потере устойчивости. Но при малых коэффициентах усиления в канале обратной связи устойчивость может и не нарушаться, просто выходной сигнал прямого канала становится более чувствительным к изменениям входного сигнала.

Это свойство положительной обратной связи, как кажется, могло бы широко использоваться в организме именно тогда, когда нужно получить сигнал, сильно реагирующий на какие-либо изменения во внутренней среде организма. Такой сигнал мог бы служить хорошим дат-

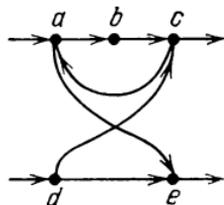
чиком информации о состоянии внутренней среды — как обычный рецептор в каналах управления, подобный изображенному на рис. 14 или 15.

Автору, однако, не удалось найти в доступных источниках указаний на то, что положительная обратная связь существует в рецепторных системах в организмах. Не мешает ли стереотип увидеть положительную роль положительной обратной связи?

Перейдем теперь ко второму обстоятельству, затрудняющему использование понятий обратной (и прямой) связи в организме. Это обстоятельство заключается именно в сложности, многосвязности систем управления в биологических объектах. Ведь чтобы выделить (хотя бы и

Рис. 19. Трудности при использовании понятия обратной связи.

Когда в системе имеется множество замкнутых контуров, то почти любой из них может рассматриваться или как прямая, или как обратная связь — в зависимости от точки зрения исследователя на систему в целом



мысленно) контур обратной связи, надо сначала указать соответствующий «прямой» канал распространения сигнала. В тех случаях, когда такой канал очевиден, можно найти и соответствующие отвечающие ему обратные связи. А если прямых каналов несколько?

На рис. 19, например, показано два прямых канала, abc и de . Канал ca является цепью обратной связи для канала abc , а для канала de — прямой (здесь ca образует участок прямого канала $dcae$).

Поэтому понятие прямых и обратных связей удобно употреблять при анализе простых систем, а в сложных случаях — только тогда, когда можно пренебречь всей совокупностью связей и выделить из нее только одну — доминирующую. Во всех остальных случаях приходится иметь дело одновременно со всей сетью связей — неважно, какие они, отрицательные или положительные. Именно поэтому столь удобно анализировать сложные системы с помощью вычислительных машин, проводя на них вычислительные эксперименты.

Чтобы покончить со сложностями при анализе обратных связей, договоримся о следующем: и положительные и отрицательные (прямые или обратные) связи все являются просто механизмами или каналами управления. Так о них и будем говорить, имея в виду, что иногда —

в простых ситуациях — сложные системы ведут себя как простые с привычными прямыми или обратными связями.

В следующем разделе мы рассмотрим одну из важных регуляторных систем организма, на примере которой можно понять, как анализируются процессы управления в биологических системах,

3.4. Пример: регуляция углеводного обмена в организме

Углеводный обмен организма является сейчас, пожалуй, одним из наиболее изученных объектов регуляции в организме. Хорошо известно, что управление углеводным обменом обеспечивает получение углеводов (глюкозы, фруктозы, сахарозы) из желудочно-кишечного тракта, их запасание и расходование в соответствии с потребностями организма. Поскольку основная доля углеводов в организменных процессах приходится на глюкозу, часто говорят об углеводном обмене как о системе регулирования глюкозы крови, хотя это и не совсем точно.

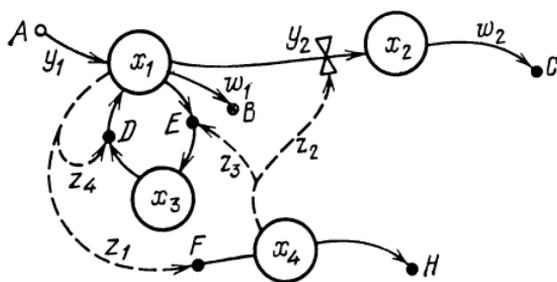


Рис. 20. Углеводный обмен в организме.

Даже в очень упрощенном виде при анализе системы углеводного обмена в организме приходится учитывать множество прямых и обратных связей. Это процессы передачи и химических преобразований веществ (сплошные линии) и процессы передачи информации (пунктир)

В биохимических лабораториях при анализе крови используются различные методики измерения уровня глюкозы и других углеводов. Обычно в клинических лабораториях результат анализа крови дает так называемый «сахар крови», в норме составляющий около 90—100 мг %.

Обратимся теперь к рис. 20, на котором схематически представлена упрощенная схема углеводного обмена в организме как совокупность источников, компартментов и стоков.

Глюкоза поступает в кровь из желудочно-кишечного тракта (физиологический источник A ; скорость поступления глюкозы y_1) и образует компартмент «глюкоза крови», x_1 .

Потребность организма в глюкозе определяется, с одной стороны, ее потреблением мозгом и некоторыми другими тканями тела (так называемые «инсулинонезависимые» процессы потребления — на рисунке они обозначены как биохимический сток B , имеющий независимый темп потребления w_1). В этот сток глюкоза уходит непосредственно из крови. С другой стороны, глюкоза утилизируется в мышцах (сток C с независимым темпом потребления w_2), причем глюкоза потребляется мышцами из собственных запасов (компартмент x_2 , «глюкоза в мышечной ткани»). Физическая нагрузка увеличивает w_2 .

Главную роль в регуляции углеводного обмена играет гормон инсулин. Инсулин выделяется в поджелудочной железе (источник F) под действием управляющего сигнала — концентрации глюкозы в крови (информационный сигнал z_1) и поступает в кровь, образуя компартмент x_4 (концентрация инсулина в крови). Инсулин — вещество не стойкое, в крови он постоянно распадается (сток H).

Если уровень сахара крови x_1 повышается выше 100 мг %, сигнал z_1 стимулирует выброс инсулина из поджелудочной железы F , концентрация инсулина в крови x_4 возрастает, и интенсифицируются процессы удаления глюкозы из крови. Об одном из таких процессов мы упомянули — это запасание глюкозы в мышечных тканях, т. е. увеличение содержания глюкозы в компартменте x_2 : повышение концентрации инсулина в крови увеличивает так называемые процессы инсулинозависимого потребления глюкозы — поток y_2 из крови в мышечные ткани. На рисунке этот процесс управляется информационной связью z_2 .

Так же важен для организма и другой регуляторный процесс — запасание глюкозы в печени. Для этого глюкоза превращается в гликоген (на рисунке биохимический сток глюкозы и одновременно источник гликогена — узел E). Этот процесс также управляется уровнем инсулина — при повышении уровня глюкозы в крови, как показано на рисунке, соответствующие сигналы передаются по управляющему каналу z_3 .

Запас гликогена в печени представлен на рисунке компартментом x_3 .

Если уровень глюкозы в крови x_1 снижается ниже 100 мг%, инсулин перестает выделяться (канал z_1 блокируется). Вместо него в организме начинает синтезироваться другой гормон, глюкагон, под действием которого гликоген печени снова превращается в глюкозу (узел химических реакций D и канал z_4). Глюкоза из депо x_3 поступает обратно в кровь.

Для простоты на схеме не отражены процессы синтеза и распада глюкагона, так что для него на рисунке осталась простая цепочка $x_3 D x_1$. Узел D управляется непосредственно концентрацией глюкозы в крови (управляющий сигнал z_4).

Наличие компартментов x_1 и x_2 позволяет всем тканям организма удовлетворять свои потребности в глюкозе w_1 и w_2 , забирая глюкозу в нужном темпе. Регулирующие связи «инсулин — глюкагон» и депо x_3 обеспечивают еще и относительное постоянство уровня глюкозы в крови, о чем мы будем подробно говорить ниже.

А пока вернемся к вопросу о системе управляющих механизмов и о возможности выделения в ней прямых и обратных связей.

В системе углеводного обмена «главным» каналом является, очевидно, ветвящийся канал Ax_1B и Ax_1x_2C . Для этого канала можно выделить три контура обратной связи: $x_1Ex_3Dx_1$, $x_1z_4Dx_1$, $x_1z_1Fx_4z_3Ex_3Dx_1$.

Отметим, что в системе есть цепочки сигналов (например, канал $Ax_1z_1Fx_4H$), которые не заканчиваются в точках «главного» прямого канала и поэтому не могут классифицироваться ни как прямые, ни как обратные связи. Отбросить их в процессе рассмотрения, конечно же, нельзя, т. к. распад инсулина (сток H) во многом определяет транспорт и запасание глюкозы в системе.

А что, если взглянуть на эту систему «с точки зрения инсулина»? Ведь в принципе возможна и такая точка зрения, например, если инженер должен разработать насос-дозатор для доставки инсулина больному организму.

Тогда основным каналом следовало бы назвать канал Fx_4H . В этом случае удалось бы выделить только один канал обратной связи — $x_4Ex_3Dx_1Fx_4$. Все остальные цепочки сигналов, в том числе и основной канал транспорта глюкозы Ax_1x_2C , оказываются вне рамок «прямых и обратных связей», которые явно узки для анализа даже таких относительно простых биологических объектов, как система углеводного обмена.

Ясно поэтому, что понятия прямой и обратной связи не исчерпывают всей сложности связей и механизмов управления в биосистемах, и комплексы управляющих цепей лучше рассматривать как целое, пытаться описывать их как единую систему управления.

Что касается собственно углеводного обмена, модель которого мы использовали здесь для анализа механизмов организменной регуляции, то мы еще неоднократно к нему возвратимся на страницах этой книги. Скажем сразу, что более подробного (с точки зрения биохимии) описания углеводного обмена нам не понадобится. Поэтому многие важные детали обменных процессов в этой системе останутся за рамками изложения. Мы не упомянули о том, что в регуляции углеводного обмена участвуют еще многие факторы (например, гормоны — такие, как гастроинтестинальный, другие вещества — свободные жирные кислоты и т. д.). Разумеется, и приведенная цифра 100 мг % выбрана более или менее условно — у разных организмов, даже у здоровых людей такие «пороговые» значения сильно варьируют. Именно поэтому получение индивидуальных характеристик углеводного обмена так важно для построения правильного лечения нарушений обменных процессов.

3.5. Пассивное и активное управление

Встроенные, внутренние механизмы управления (пассивная регуляция скорости диффузии, механизмы ауторегуляции химических реакций и т. п.) не требуют при своем функционировании расхода метаболической энергии (АТФ). Поэтому они называются еще пассивными механизмами управления. В пассивных механизмах нет специальных регулирующих органов, а роль управляющих сигналов играют сами переменные состояния.

Это обстоятельство довольно необычно и очень важно для понимания регуляторных процессов в сложных биологических системах, так как в наиболее ответственных ситуациях пассивные механизмы управления часто оказываются «последним резервом» организма, который используется для обеспечения его потребностей в субстратах, топливе и окислителе.

Рассмотрим снова процесс снабжения клетки каким-либо веществом (например, кислородом) за счет диффузии. Обозначим напряжение кислорода во внутриклеточной

жидкости x_1 , а во внеклеточной — x_2 . Разумеется, $x_2 > x_1$.

Приток вещества при диффузии определяется разностью его концентраций в компартменте и в среде (см. выше уравнение 3.1). Когда концентрация кислорода в клетке падает, скорость диффузии возрастает — это и есть простейший способ увеличения скорости поступления кислорода в компартмент.

Изобразим такой простейший управляющий механизм в виде схемы «источник — компартмент — сток» (рис. 21).

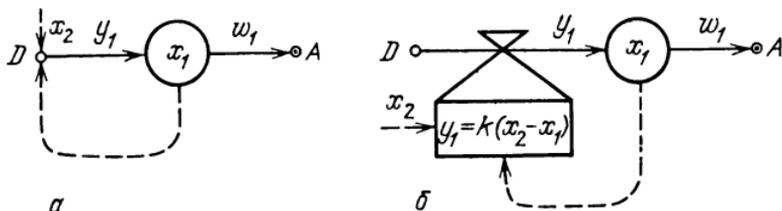


Рис. 21. Простейший пассивный механизм управления.

а) Скорость диффузии кислорода зависит от разности концентраций его «внутри» и «снаружи». Когда концентрация внутри падает, разность «пассивно» возрастает, что способствует удовлетворению потребностей системы в кислороде: w_1 — ведущий темп, y_1 — ведомый. б) Упрощенное изображение этого механизма

Пусть кислород расходуется в метаболических реакциях со скоростью w_1 , а поступление его идет путем диффузии со скоростью y_1 .

Тогда приходим к схеме, показанной на рис. 21, а: скорость движения кислорода в прямом канале задается ведущим стоком — узлом А, а обеспечивает этот поток ведомый физиологический источник — процесс диффузии D. Скорость диффузии пассивно регулируется двумя переменными, x_1 и x_2 .

Если необходимо, то на рисунке можно отразить и тот закон, по которому происходит пассивная регуляция скорости источника. Тогда в квадратике при источнике дается формула, описывающая эту зависимость (рис. 21, б). При постоянном k и неизменном x_2 скорость притока зависит только от меняющейся величины x_1 , что и означает, что при пассивном управлении роль управляющего сигнала играет сама переменная состояния.

Пассивные механизмы имеют по меньшей мере два больших недостатка. Во-первых, они «маломощны»; их хватает на обеспечение лишь самых малых объемов живой материи веществами или энергией — внутриклеточных структур, отдельных клеток или одноклеточных

организмов. Во-вторых, работа этого механизма обязательно связана с падением концентрации веществ во внутренней среде, а это исключает возможность постоянства внутренней среды. Тем не менее именно пассивные механизмы обеспечивают баланс многих веществ в организме животных — например, перемещение воды в межклеточной среде, выведение некоторых метаболитов из межклеточной среды вовне. Правда, во втором случае как раз и оказывается, что концентрация такого пассивно выводимого вещества во внутренней среде организма может сильно варьировать. Содержание аминокислот в плазме, например, может меняться (даже в норме) вдвое — от 4 до 8 мг %, а концентрация лимонной кислоты — даже в 20 раз.

Вернемся поэтому снова к таблице 4. Уже на первых этапах усложнения организации живых существ пассивные внутренние механизмы управления дополняются активными. Роли разделяются — переменная состояния передает свои управляющие функции специальным сигналам — выходным переменным вновь возникших структур или органов. Так, для снабжения организма кислородом важно, что с увеличением размеров поверхность диффузии растет медленнее, чем нуждающийся в кислороде объем тела: даже максимальное увеличение градиента не позволяет обеспечить потребность возросшего числа клеток тела (коэффициент k становится очень малым). Поэтому уже с уровня высших червей все организмы имеют активное кровообращение; перенос кислорода осуществляется движущимся потоком крови, где кислород химически связан с гемоглобином и освобождается только непосредственно у «мест потребления». По мере освобождения кислород диффундирует в ткани и отдельные клетки, где мощности пассивных механизмов уже достаточно для адекватного снабжения.

Конечно, говоря о сравнительной мощности активного и пассивных механизмов, мы очень упрощаем суть дела. Ведь «суммарная мощность» всех пассивных каналов транспорта кислорода в точности равна мощности централизованного источника кислорода — весь кислород, проходящий через кровь (и через легкие тоже) затем попадает в клетки путем диффузии, т. е. за счет пассивных механизмов.

Функционирование активных механизмов обеспечивается работой специальных органов, которые в процессе управления расходуют АТФ. С помощью АТФ у низших

животных (планарий) движутся реснички выделительных «пламенных» клеток, а у высших животных функционирует желудочно-кишечный тракт, идет перемещение воздуха или воды через легкие или жабры в дыхательной системе.

Активные механизмы управления в организме требуют для своего описания множества специфических переменных. Чем выше организация животного организма, тем на большее число специализированных этапов разбивается процесс выполнения каждой из физиологических функций. Поэтому и физиологические переменные, которые описывают активную регуляцию этих этапов, весьма разнообразны по своей природе. Они включают химические, физические, механические и электрические величины. Мы будем обозначать их символами u_1, u_2, \dots, u_N , где N — количество переменных, рассматриваемых в каждом конкретном случае.

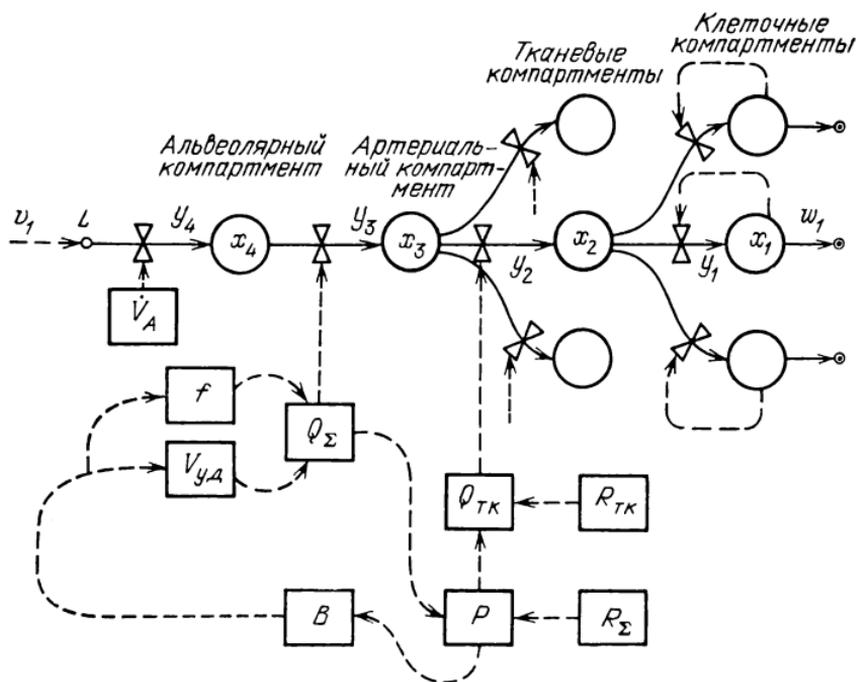


Рис. 22. Схема снабжения организма кислородом.

Показана цепочка — «эстафета» активных механизмов транспорта, доставляющих кислород клеткам. На последнем этапе каждую цепочку завершает уже знакомый нам пассивный механизм управления

Возьмем, например, процесс поступления кислорода из атмосферы в организм, затем — в ткани различных его органов, а затем и в клетки (рис. 22). Транспортный процесс обслуживается несколькими сменяющимися друг друга активными механизмами. Цепочка начинается в атмосфере, где сигнал v_1 означает содержание O_2 в

воздухе. Затем идет физиологический источник кислорода L (легкие) и компартменты x_4 — кислород в альвеолярном воздухе, x_3 — в артериальной крови. Далее система ветвится на множество тканевых и клеточных компартментов. На схеме рис. 22 выделены один тканевый (x_2) и один клеточный (x_1) компартменты. Система заканчивается множеством биохимических стоков, из которых выделен тоже только один — A_1 , с независимым темпом потребления кислорода w_1 .

Активная функция легких описывается множеством переменных: частотой дыхания, его глубиной, резервным объемом легких, параметрами активности легочной мускулатуры и т. д. На рисунке указана только одна такая переменная — объем дыхания \dot{V}_A , определяющий поток кислорода y_4 . Поток кислорода в артериальную кровь y_3 также зависит от ряда активных механизмов — сокращений сердца с частотой f и ударным объемом $V_{уд}$, которые в сумме дают минутный выброс крови Q_Σ . Снабжение тканей (поток y_2) зависит от их кровоснабжения (кровотока Q_{TR}), которое определяется соотношением между давлением крови P и сопротивлением сосудов R_{TK} .

Для переменных, описывающих активную регуляцию в системе, можно ввести обозначения такого рода:

u_1 — минутный объем дыхания (л/мин), \dot{V}_A ; u_2 — частота сердечных сокращений (уд/мин), f ; u_3 — ударный объем сердца (мл/удар), $V_{уд}$; u_4 — минутный кровоток (мл/мин), Q_Σ ; u_5 — сопротивление сосудистого русла (мм рт. ст./мл/мин), R , и т. д., вплоть до последнего интересующего нас сигнала u_N .

Каждая из этих переменных активно (в прямом смысле этого слова, т. е. с затратой АТФ) реагирует на изменения в состоянии метаболической системы и окружающих условий (сигнал v_1). Поэтому можно написать

$$u_i = F_i(x, v); \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3.4)$$

где F_i — некоторые, иногда очень сложные, функции от x_1, x_2, \dots, x_m и v_1, v_2, \dots, v_l .

Управление активными механизмами усложняется еще и тем, что эти механизмы взаимодействуют между собой, образуя дополнительные цепи в системе. Такая цепь существует и в системе кровообращения (она не показана на рисунке, но может быть легко прослежена). В кровеносных сосудах, кровоток через которые равен Q_Σ , а сопротивление которых равно R_Σ , имеется результирующее давление $P = RQ_\Sigma$. Это давление в нескольких важных точках кровеносного русла измеряется специальными датчиками — барорецепторами B , и при изменениях P в системе кровообращения возникают управляющие сигналы, стабилизирующие давление за счет изменения частоты сердечных сокращений f и сопротивления R различных органов (последняя управляющая связь на рисунке не показана).

Таким образом, управление потоками веществ в организме осуществляется двумя дополняющими друг друга

группами регуляторных механизмов — пассивными и активными.

При пассивном управлении регуляторные воздействия осуществляются непосредственно самими переменными состояниями системы x : достижение нужных скоростей притока обеспечивается изменениями уровня самих переменных x_i в компартаментах системы;

при активном управлении переменные состояния метаболической системы «передают» свои управляющие функции специфическим сигналам физиологических механизмов управления u_j , которые и выполняют процессы регуляции.

При действии активных механизмов управления нужного увеличения притока веществ можно достичь практически без изменения уровня этого вещества в компартаментах системы. Такое относительное постоянство переменных состояния сохраняется за счет того, что активные механизмы очень чувствительны к самым малым изменениям переменных x и включаются при малейших отклонениях этих переменных от «нормальных» их значений. В других случаях падение концентраций веществ x может быть предотвращено тем, что активные механизмы включают компенсирующие процессы еще до того, как возмущающие факторы вызовут изменение самих переменных состояния.

Эффективное управление жизнедеятельностью в организме возможно лишь при использовании активных механизмов; пассивные регуляторы могут управлять потоками веществ лишь локально: во внутриклеточных процессах и вблизи непосредственных потребителей — на расстояниях порядка размеров нескольких клеток, да и то при малых темпах протекания процессов жизнедеятельности.

Вернемся еще раз к рис. 22 и на примере транспорта кислорода продемонстрируем характер взаимодействия пассивных и активных механизмов при удовлетворении метаболических потребностей организма.

1. Пассивные механизмы управления транспортом кислорода работают лишь на последних этапах транспортной цепочки — на уровне клеточных компарментов (управление потоками типа y_1 , показанное пунктиром от компартамента x_1).

Все предыдущие этапы эстафеты (потоки y_2, y_3, y_4) обслуживаются активными механизмами. Очевидно, что исходно мощный поток кислорода, снабжающий весь орга-

низм, ветвится к концу пути на многочисленные потоки к отдельным органам, а потом и к клеткам. Пассивному управлению остается справиться уже с очень малыми объемами вещества в единицу времени, и оно оказывается вполне эффективным.

2. Активные механизмы управления первых этапов транспортной эстафеты ставят пассивные механизмы последних этапов в наилучшие возможные условия. Действительно, поток кислорода в клетку определяется процессом диффузии, где главным фактором оказывается разница напряжений $x_2 - x_1$. Активные механизмы альвеолярной вентиляции и сердечно-сосудистой системы доставляют насыщенный кислородом гемоглобин непосредственно к местам расходования — клеткам организма. Тем самым величина x_2 , непосредственно управляющая пассивным притоком кислорода к клетке, повышается почти до уровня x_4 — альвеолярного напряжения кислорода, что при данном x_1 дает максимальное значение градиента $x_2 - x_1$.

3. Пассивные механизмы являются «последним резервом» системы управления по обеспечению адекватного притока кислорода. Если активные механизмы исчерпают свои возможности в силу тех или иных причин (x_2 все-таки уменьшится вследствие «поломки» активных структур или ухудшения внешней среды — снижения v_1), то градиент $x_2 - x_1$ может все же поддерживаться на высоком уровне за счет падения x_1 . В этом случае приток кислорода все еще может оставаться равным w_1 , удовлетворяя потребности клетки. Кстати, в физиологии известно, что при повышенной физической нагрузке снижение концентрации кислорода в тканях многих органов происходит.

4. Наличие активных механизмов управления транспортом кислорода на первых этапах транспортной цепи позволяет поддерживать относительное постоянство переменных x_1 , x_2 , x_3 и x_4 несмотря на действие внешних и внутренних возмущений. Тем самым именно наличие активных механизмов становится той основной базой, которая обеспечивает постоянство важнейших параметров внутренней среды организма — гомеостаз.

3.6. Регулирование темпов и уровней

Процессы управления в организме (биохимическая и физиологическая регуляция) прежде всего должны поддерживать стационарное неравновесное состояние мета-

болической системы, т. е. постоянное уравнивание скоростей притока и потребления всех веществ в системах организма. Эта цель достигается сбалансированной работой всего комплекса прямых и обратных связей. Если, однако, рассматривать эти связи как набор отдельных управляющих звеньев, то кажется очевидным, что только часть их управляет собственно скоростями протекания (темпами) различных процессов — например, скоростями химических реакций, интенсивностями работы физиологических источников и стоков, объемными скоростями потоков веществ и т. д. Другая же часть регулирует не скорости — темпы, а сами уровни веществ и энергии в отдельных подсистемах организма.

«Концентрация, темп процесса или количество вещества — вот те величины, которые должны регулироваться», — пишет А. Гайтон, известный американский физиолог.

В частности, легко видеть, что работа всех пассивных механизмов направлена на то, чтобы уравнивать между собой темпы притока и оттока вещества: скорости зависимых потоков «подправляются» так, чтобы следовать за изменениями скоростей независимых (ведущих) потоков. Это же можно сказать и про большинство регулирующих механизмов в биохимической системе организма. Американские исследователи П. Хочачка и Дж. Сомеро, например, отмечают как главную цель биохимической регуляции и адаптации «настройку скоростей реакций и их направления, чтобы организм получал нужные продукты».

С другой стороны, чтобы предотвратить вредные нарушения уровней вещества или энергии в различных частях организма, также нужно вмешательство регуляторных механизмов. Например, повышение температуры тела выше определенных пределов сделало бы невозможной работу не только наиболее чувствительных нервных клеток, но и многих других сложно организованных структур в организме. Длительное повышение уровня глюкозы в крови приводит к нарушениям метаболизма. Снижение концентрации кислорода в тканях затрудняет процесс получения энергии. Во всех этих случаях в организме поддерживается относительное постоянство уровней перечисленных веществ (сахара крови, кислорода в тканях) или энергии (теплосодержания или температуры тканей).

Таким образом, в организме можно выделить два типа управляющих связей — управление темпами протекающих процессов и регулирование уровней веществ (и энер-

гии). Правда, такое разделение довольно условно: регулирование уровней своей конечной целью имеет все то же обеспечение должных темпов протекания жизненных процессов в организме. Но пока мы не будем вторгаться в вопросы соотношения, иерархии механизмов управления темпами и уровнями, а рассмотрим, как выглядят и чем отличаются механизмы регулирования уровней и темпов.

Напомним, что в теории управления для изображения систем автоматического управления (в частности, следящих систем и систем стабилизации) используются специальные блок-схемы, о которых говорилось выше (см. рис. 17 на стр. 63). Входным сигналом в них является задающий сигнал (любой природы — химической, электрической, механической), а выходной сигнал «следит» за ним, т. е. поддерживается по возможности ему равным.

Тогда разница между регулированием темпов и уровней в организме состоит попросту в физической природе задающего сигнала (будь то в системе физиологической регуляции, биохимической ауторегуляции или в наиболее сложных «системных» реакциях, затрагивающих поведенческие акты).

Представим теперь в виде системы автоматического регулирования простую цепочку из двух компартментов с пассивным регулированием скоростей доставки вещества. Исходная схема такой цепочки приведена на рис. 23.

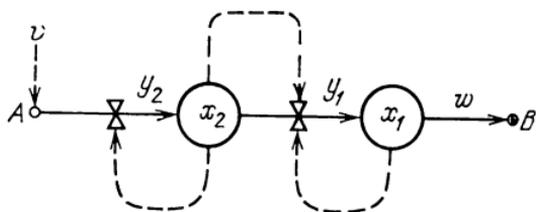


Рис. 23. Два компартмента с пассивным управлением скоростью притока

Скорость потока вещества по цепочке задается темпом его потребления в ведущем стоке B . Поступает оно из физиологического источника A , который забирает это вещество из окружающей среды с уровнем v . Под действием пассивных механизмов управления (например, путем диффузии) вещество перемещается сначала в компартмент x_2 , затем в x_1 и потребляется со скоростью w . Скорости потоков y_1 и y_2 (их темпы) зависят от градиентов соответствующих уровней:

$$\begin{aligned} y_1 &= k_1(x_2 - x_1), \\ y_2 &= k_2(v - x_2). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Перерисуем эту схему в виде системы автоматического регулирования (рис. 24). Задающим сигналом для компартамента x_1 является, очевидно, темп оттока w , а регулируемым — темп поступления y_1 . Для компартамента x_2 задающий сигнал есть выходной сигнал первого компартамента, y_1 , а регулируемый — темп y_2 .

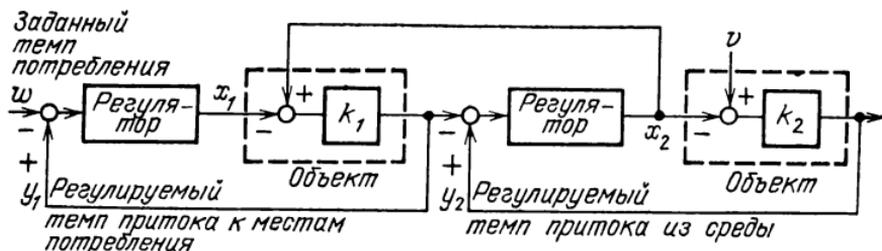


Рис. 24. Представление системы для случая, когда целью управления исследователь считает адекватное снабжение веществом (т. е. поддержание необходимой скорости его доставки)

Регулятором в обоих случаях служит сам уровень вещества в компарimente, а объектом регулирования — скорость притока.

Уравнения (3.5) являются, таким образом, уравнениями регулируемого объекта. Уравнение регулятора имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= y_1 - w \quad (\text{для первого контура}), \\ \frac{dx_2}{dt} &= y_2 - y_1 \quad (\text{для второго контура}). \end{aligned} \tag{3.6}$$

Рассмотрим теперь, как должна выглядеть система автоматического регулирования, представляющая механизмы регуляции уровня веществ в организме. В этом случае задающим сигналом является желаемая (или заданная) величина нашего уровня, называемая обычно уставкой. Регулируемый сигнал — действительный уровень (рис. 25).

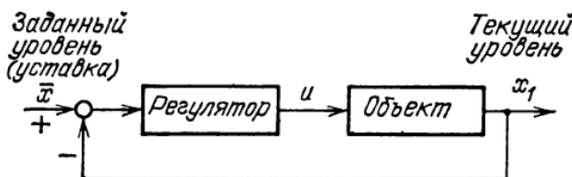


Рис. 25. Представление той же системы в другом виде, когда целью системы считается поддержание должного уровня расходуемого в ней вещества

Например, если x_1 — напряжение кислорода в тканях, то обычно предполагается, что его снижение ниже какого-то предела фиксируется хеморецепторами, в результате чего увеличивается кровоток через орган. Приток кислорода возрастает, и напряжение x_1 восстанавливается до желаемого уровня \bar{x} . Объект управле-

ния теперь описывается уравнениями (3.5) и (3.6), а для регулятора вводится дополнительное уравнение

$$u = K(\bar{x} - x_1).$$

Мы уже говорили, что реальная совокупность управляющих механизмов всегда намного сложнее, чем выделяемые исследователями подсистемы или даже отдельные контуры типа показанных на рис. 24 и 25.

Но когда исследователь производит такое выделение отдельного контура, оказывается, что он может воспользоваться для его описания и анализа любой из двух схем — или схемой на рис. 24, или схемой на рис. 25, но не обеими ими одновременно!

Эти схемы в определенном смысле противоречат друг другу — один и тот же сигнал x в первой схеме является регулирующим, т. е. подчиненным иерархически высшей цели, и меняется так, чтобы ее достигнуть. Во второй схеме тот же x — уже регулируемый сигнал, именно его постоянство «важнее всего», а все остальные сигналы должны меняться так, чтобы обеспечить его постоянство.

Эти противоречия — вовсе не надуманные. И в самом деле, сигналы типа «уровень» в организме играют двойственную роль. С одной стороны, они являются регуляторами темпов протекания жизненных процессов в клетках (транспортные потоки, темпы химических процессов определяются именно концентрациями веществ). Но регуляторы эти работают только в пассивных механизмах управления. А для многих активных механизмов те же уровни уже сами могут быть регулируемым сигналом, а цель активной регуляции здесь часто может быть сформулирована как поддержание их постоянства.

Пока работают активные механизмы управления, уровни эти постоянны. А постоянны уровни — постоянны и скорости процессов, от них зависящих. И только когда активные механизмы исчерпают свои возможности, роль управляющих сигналов переходит к самим уровням. Теперь уже они будут меняться ради поддержания должных скоростей протекания жизненных процессов.

Таким образом, можно подвести следующий итог рассмотрения процессов регуляции темпов и уровней в организме. Целью управления всегда является регуляция темпов внутриклеточных жизненных процессов — т. е. удовлетворение метаболических потребностей организма. Эта цель может быть достигнута простым путем, если обеспечено постоянство внутренней среды организма. Тог-

да постоянство скоростей химических процессов будет поддерживаться автоматически.

Постоянство внутренней среды обозначается часто термином «гомеостаз». Гомеостаз нужен организму прежде всего для того, чтобы наиболее экономичным путем обеспечить метаболические нужды организма. Но надо иметь в виду, что если механизмы жизненных процессов «рассредоточены» по всем клеткам организма и носят «локальный» характер, то гомеостаз поддерживается прежде всего за счет централизованных, общих для всего организма систем.

Поэтому закончим наше рассмотрение разделом, посвященным удовлетворению метаболических потребностей организма, оставив анализ гомеостатических процессов до следующей главы.

3.7. Удовлетворение метаболических потребностей организма

Говоря об удовлетворении потребностей организма, обычно имеют в виду следующее. В процессах жизнедеятельности (функционирование систем организма, текущий «ремонт» его структур) непрерывно расходуются вещества и энергия. Процессы расходования идут постоянно и практически независимо от того, каково текущее состояние физиологической и биохимической систем. Темпы процессов жизнедеятельности (и, следовательно, скорости расходования веществ и энергии в различных частях организма) определяются высшими уровнями управления в организме в соответствии с текущей программой поведения.

Место молекул каждого из веществ, израсходованных в процессах жизнедеятельности, немедленно занимают другие такие же молекулы из близлежащих компартментов этого вещества. Уровень вещества в этих компартментах начинает убывать, снижение чувствуют активные механизмы регуляции, которые увеличивают темпы продвижения вещества по всей транспортной цепочке, от истоков до стока.

Таким образом, любое изменение потребностей организма w , локализованных в ведущих стоках, активизирует пассивные и особенно активные механизмы u , так что ведомые физиологические и биохимические источники изменяют свои скорости в нужную сторону, уравнивая

сдвиги, вызванные изменениями w . Метаболическая система — вся совокупность источников, потоков, компарментов и стоков веществ — в конце концов приходит в новое стационарное неравновесное состояние. Уровни x в компартаментах перестают изменяться во времени, и постоянство это обеспечивается непрерывным притоком веществ извне. С примерами таких систем мы неоднократно сталкивались на страницах этой книги.

В терминах формализованного описания это означает, что потоки w_j и y_k в уравнении (2.4) на стр. 45 уравновешивают друг друга, так что для всех x_i , $i = 1, 2, \dots, m$,

$$\frac{dx_i}{dt} = 0. \quad (3.7)$$

Из уравнения (2.4) видно, что это соотношение достигается в том случае, если достигнуто равенство

$$\sum_{j=1}^n p_{ij}w_j = - \sum_{k=1}^N q_{ik}y_k, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3.8)$$

Последнее соотношение можно записать и в матричных обозначениях (2.5):

$$Pw = -Qy. \quad (3.9)$$

Равенство (3.8) (или эквивалентное ему (3.9)) можно назвать условием удовлетворения потребностей. Соотношение (3.7) отражает наличие стационарного неравновесия в метаболической системе при ненулевых потоках w и y .

В живом организме процессы удовлетворения текущих потребностей протекают, конечно же, совсем не так просто. Начать с того, что в организме всегда имеются некоторые запасы расходуемых веществ, сосредоточенные в компартаментах. Наличие запасов означает, что возрастание расхода компенсируется не сразу, а с опозданием. Разница покрывается за счет временного снижения запаса.

Чем больше запас, тем больший разрыв допустим между расходом и восполнением. Так, запасы белков, жиров и углеводов в организме достаточно велики, и их пополнение происходит всего 4—5 раз в сутки (с пищей во время завтрака, обеда и ужина). Кислород тоже поступает в организм порциями, но порции эти следуют чаще (15—20 вдохов в минуту). Это связано с тем, что запасов кислорода в организме хватает лишь на несколько минут.

Наличие характерных «постоянных времени» для разных биологических процессов отражается даже в тех еди-

ницах, которыми мы привыкли измерять различные потребности организма. О пище говорят, что потребность составляет около 4000 ккал/сут, а о кислороде — 250 мл/мин.

Итак, фактический баланс w и u должен быть обеспечен непосредственно «в активных зонах» метаболической системы (внутриклеточных структурах), а вне их баланс может обеспечиваться лишь в среднем, на отрезках времени порядка «характерных времен» для соответствующих процессов. Поэтому реальное удовлетворение потребностей идет по следующей схеме: на местах управления непрерывно поддерживает баланс веществ, а в остальном допустимы и большие колебания запасов веществ в компартментах — лишь бы сохранялись запасы. Значит, иногда система управления вместо точного слежения за темпами потребностей может ограничиться выполнением несложных соотношений такого рода:

$$x > 0.$$

А теперь рассмотрим еще один весьма любопытный вопрос: эквивалентны ли для организма понятия «удовлетворение потребностей» и «достижение стационарного неравновесия»? На первый взгляд это так: если организм получает из среды ровно столько веществ, сколько их расходует, то достигнут баланс веществ, а тем самым и стационарное неравновесное состояние.

Вспомним, однако, что биохимические процессы в метаболической системе образуют сложнейшую сеть реакций, протекающих к тому же с разными скоростями и заканчивающихся в разное время. Стационарное неравновесие в таких реакциях достигается неодновременно: сначала в самых быстрых, затем во все более медленных и так до ... Если бы потребности, однажды изменившись, не менялись бы более, то возникшие переходные процессы во всех компартментах закончились бы, и равновесие было бы достигнуто. Но ведь этого не бывает!

Поэтому следует считать, что «удовлетворение потребностей» означает уравнивание темпов притока и расхода только для части достаточно быстрых процессов в организме. Это процессы транспорта (физиологические источники), транспортные и энергетические процессы. Что касается более длительных процессов в метаболической системе (включая многие процессы синтеза, сборки, процессы перестройки метаболизма при адаптации и т. п.), то после достижения баланса по притоку — отто-

ку сдвиги в них только начинаются. Но относятся эти явления уже к другой области организменных феноменов — к адаптации, стрессу, напряжению и т. д. Все это будет рассматриваться в следующей главе, посвященной явлениям в целостном организме. А пока рассмотрим один очень важный пример — процесс удовлетворения потребностей организма в углеводах.

Мы уже имели дело со схемой механизмов управления углеводным обменом (рис. 20 на стр. 68). Перерисуем теперь эту схему в несколько упрощенном виде (рис. 26).

Глюкоза поступает в организм во время еды с пищей — несколько раз в сутки, и каждый раз из желудочно-кишечного тракта (источник ЖКТ) поток y_1 устремляется в кровь, повышая уровень глюкозы в крови, x_1 . Кровь — неудобное место для хранения глюкозы (ее объем мал — мала и емкость), и из крови глюкоза пассивно поступает в клетки тканей (эти потоки на рисунке не показаны для простоты), где и расходуются (поток w в стоке B).

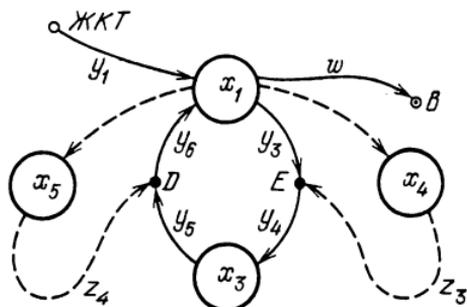


Рис. 26. Упрощенная схема углеводного обмена организма

Излишнее поступление глюкозы в ткани может привести к нежелательным изменениям метаболизма. В здоровом организме этого не происходит, поскольку поток глюкозы под действием управляющего гормона — инсулина немедленно переориентируется и направляется в два депо. Самым мощным организменным депо является печень, в которой глюкоза запасается в виде гликогена (компаратмент x_3), а поток этот (y_3, y_4) идет по пути $x_1 E x_3$. Другим депо являются периферические ткани (соответствующий путь на рисунке для простоты не показан, но его можно проследить на рис. 20).

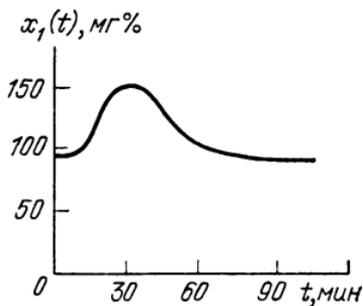


Рис. 27. Реакция организма на поступление сахара.

После приема пищи, содержащей глюкозу и другие сахара, содержание этих веществ («уровень сахара») в крови на какое-то время повышается

В результате уровень глюкозы в крови x_1 поднимается непосредственно после приема пищи не очень сильно (примерно со 100 до 150 мг %) и ненадолго. Это видно из графика на рис. 27, где приведена типичная «гликемическая кривая» $x_1(t)$ при так называемом глюкозотолерантном тесте (ГТТ), когда испытуемый выпивает стакан воды, в котором растворено 60 г сахара.

Когда глюкоза перестает поступать из ЖКТ в кровь ($y_1 = 0$), а потребление ее со скоростью w продолжается, уровень x_1 начинает снижаться. Однако тут же в ответ на такое снижение начи-

нает выделяться другой управляющий гормон — глюкагон (ком-
партмент x_5), и под действием управляющего сигнала z_4 сахар из
депо x_3 возвращается в кровь — поток (y_5, y_6) по каналу $x_3 D x_1$.

В итоге в организме идет поочередное включение каналов
 $x_1 E x_3$ и $x_3 D x_1$, а уровень глюкозы в крови, несмотря на перерывы
в питании, в целом в течение суток поддерживается в пределах
80—100 мг %.

Любопытно, как можно объяснить подъем уровня са-
хара после приема пищи. Иными словами, зачем это
организму? В последнее время выяснилось (при использо-
вании технических средств доставки инсулина в орга-
низм — аппаратов типа «Биостатор»), что этот выброс
глюкозы можно было бы полностью ликвидировать,
если бы совсем ненамного увеличить выброс инсулина.
Грубо говоря, система управления углеводным обменом в
здоровом организме вполне могла бы устранить «всплески»
глюкозы. Однако эволюция закрепила именно этот
тип реакции. Быть может, организму удобно на какое-то
время иметь «перестроенный» под высокий уровень глю-
козы крови метаболизм? Или регуляторные механизмы,
поддерживающие постоянство сахара в крови, все-таки
недостаточно эффективны?

Кажется, до сего времени нет ответа на такой, в сущ-
ности, простой вопрос. А ответ был бы очень важен для
конструкторов и инженеров, которые создают аппараты
для автоматического введения инсулина больным сахар-
ным диабетом. К этому интересному вопросу мы еще вер-
немся (см. ниже стр. 192, рис. 54).

Итак, удовлетворение потребностей организма в глю-
козе идет по схеме рис. 26 в основном из компартмента x_3 ,
а компартмент x_1 (глюкоза крови) является лишь звеном
транспортного передаточного механизма. Запасы x_3 на-
столько велики, что их пополнение можно не произво-
дить в течение, например, нескольких суток без сущест-
венных сбоев в работе метаболической системы.

Как можно изобразить процессы углеводного обмена в
виде системы автоматического регулирования?

Представим их как процессы в следящей системе, которая
изменяет свой выходной сигнал (темп подачи глюкозы потреби-
телям из имеющихся запасов) так, чтобы отслеживать задающий сиг-
нал — текущие потребности организма (рис. 28).

Рассмотрим сначала режим «натощак» (в таком режиме эта
система работает в нашем организме тогда, когда врач просит сдать
анализ крови на сахар). В этом случае переходный процесс, вы-
званный поступлением пищи, давно затух и работает верхняя це-
почка — отрицательная обратная связь, обозначенная на рисунке
как «следящая система I».

Потребление глюкозы из крови идет со скоростью w_1 (потребность мозга и некоторых других тканей). Уровень глюкозы в крови x_1 медленно снижается до тех пор, пока не будет перейден пороговый уровень X_1 , ниже которого начинается выделение глюкагона (x_5), под действием которого возникает поток сахара из печени в кровь (y_6). Этот поток увеличивается до тех пор, пока не уравнивается расход w_1 . Очевидно, такое уравнивание произойдет при каком-то значении x_1 , несколько меньшем порога X_1 . В норме эта величина x_1 и составляет «натошак» около 80—100 мг %.

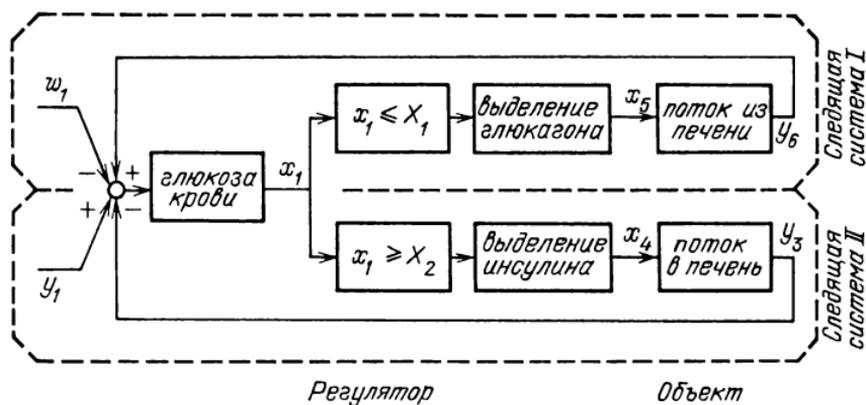


Рис. 28. Процессы управления в системе углеводного обмена.

Схема управления содержит два попеременно включающихся контура обратной связи, которые при избытке сахара направляют его в печень, а при нехватке — извлекают его оттуда

Другой режим работы в системе возникает сразу же после приема пищи. Через 10—15 мин после этого сахар из ЖКТ начинает всасываться в кровь (поток y_1). Поток y_1 много мощнее, чем расход w_1 , и x_1 повышается до уровня, большего порогового значения X_1 . Верхний канал на рисунке отключается. Зато как только наш x_1 превысит и другой порог ($x_1 > X_2$), включается «следящая система II».

Выделяется инсулин (x_4), сахар из крови направляется в печень (поток y_3). Замыкается отрицательная обратная связь в нижней части рисунка. По мере убывания скорости всасывания из ЖКТ убывает и следящий за ним поток y_3 , так что примерно через час y_1 и y_3 вместе уменьшаются до нуля. Непрерывавшееся все это время поглощение сахара из крови w_1 постепенно снизит уровень сахара x_1 до порогового значения X_1 и снова включится следящая система I. Два режима работы — и для каждого своя следящая система со своими активными механизмами.

Рассмотренный пример позволяет детально проследить за тем, как потребности организма превращаются в «задание» системе управления, которая успешно его выполняет.

Выше, говоря о потребностях, мы всегда имели в виду расходование каких-либо веществ в процессах жизнедеятельности.

тельности клеток. Тогда удовлетворение потребностей означает приток соответствующих компонент в организм, синтез из них нужных веществ и их транспорт к «активным зонам», где они и потребляются.

Можно, однако, говорить и о другого типа потребностях. Все рассуждения этого раздела (кроме примера, разумеется) можно повторить и для «симметричных» процессов, когда в организме образуется необходимость — тоже своего рода потребность — вывести побочные продукты, образовавшиеся в ходе выполнения жизненных функций. Выше говорилось о том, что ведущие биохимические стоки, как правило, представляют собой и источники побочных продуктов метаболизма (тоже, очевидно, ведущие). Те конечные продукты, которые организм не будет использовать, надо вывести в окружающую среду, и можно говорить о потребностях организма в их выведении. Соответствующие физиологические стоки образуют потоки этих веществ, направленные из внутренней среды вовне. Скорости этих потоков регулируются так, чтобы уравновесить независимые потоки этих веществ в ведущих источниках при метаболизме.

На этом можно было бы закончить разговор о потребностях организма и метаболических путях их удовлетворения. Но хочется несколько раздвинуть узкие рамки метаболических потребностей, которыми мы себя ограничивали до сих пор.

Понятие потребностей организма, конечно же, много шире простых биологических нужд в воде, воздухе и пище. Но даже удовлетворение этих «минимальных» потребностей организма в современных условиях жизни — дело не простое. Этот процесс затрагивает многие технические и даже социальные аспекты жизни общества.

Использование различных путей добывания пищи в свое время привело к общественному разделению труда и стало исходным пунктом экономического прогресса человеческого общества.

К этому времени биохимические и физиологические механизмы удовлетворения потребностей получили у человека подкрепление сначала за счет поведенческих реакций, а затем и за счет привлечения технических средств. По любопытным наблюдениям П. и Дж. Медавар, известных американских биологов и популяризаторов науки, нож стал выполнять некоторые функции зубов, фотоаппарат — некоторые функции глаза (напомним здесь, что кибернетические функции организма вообще направ-

лены на обеспечение существования метаболической системы организма).

Потребности большого современного города складываются из потребностей его жителей, а потребности жителей — из потребностей их метаболических систем. Поэтому вся городская сеть кафе и столовых, магазинов и овощных баз, продовольственных складов и хлебозаводов вместе с автокомбинатами, теплоцентралями и энергостанциями представляет собой специальный механизм удовлетворения метаболических нужд популяции, составляющей население города.

Развитие надорганизменных механизмов удовлетворения потребностей иногда называют экзосоматической эволюцией, так как все создаваемые для этого технические и социальные средства и механизмы представляют собой искусственные «внешние органы» человека, улучшающие и расширяющие возможности его соматических, естественных органов. Появление технических и социальных средств, которые лучше, эффективнее и экономнее удовлетворяют потребности организма, приводит к их распространению среди членов популяции — будь то автомобиль, очки или приборы ночного видения, аппарат «искусственная почка» или снаряжение космонавта.

Потребности организма, таким образом, удовлетворяются весьма и весьма сложной системой управления, начинающейся пассивными механизмами биохимической регуляции, пассивными и активными физиологическими механизмами, поведенческими реакциями, которые затем включают все более сложные технические средства, и завершающейся экзосоматическими средствами обеспечения функций организма и социально-экономическими механизмами управления в обществе.

К этим вопросам мы еще вернемся в главе V.

3.8. Высшие уровни управления в организме

Физиологические механизмы транспорта веществ, получения энергии и поддержания гомеостаза обеспечивают «внутренние» потребности организма. Их задача — поддерживать жизнедеятельность каждого внутреннего органа, каждой ткани, вообще каждого элемента организма, направив к ним соответствующие их потребностям потоки химических веществ. Начальной точкой каждого из этих потоков является физиологический источник на границе организма с внешней средой; поток кислорода начинается

в легких, потоки всех других веществ — в желудочно-кишечном тракте.

Но, чтобы обеспечить нормальное и бесперебойное снабжение внутренней сферы, организм должен постоянно следить за тем, чтобы сами физиологические источники получали необходимую для их работы «пищу» из окружающей среды. Что касается кислорода, то в нижних слоях атмосферы он есть везде и всегда, так что организм не имеет особых проблем с его «подачей» на вход своих внутренних транспортных путей.

Сложнее обстоит дело с сырьем и топливом для «химической машины» организма. Иначе говоря, добыча пищи и воды — не столь простое дело, как получение кислорода. Здесь мы впервые сталкиваемся с общей для «внешней» доставки веществ особенностью: если внутренние механизмы имеют дело с однородным и равномерным распределением веществ в среде организма, то во внешнем окружении и пища, и вода находятся далеко не везде, распределены дискретно и очень неравномерно.

Поэтому если регуляторы доставки веществ внутри организма могут быть очень простыми — для них достаточно лишь информации о концентрациях веществ, то регуляторным механизмам получения пищи и воды извне такой информации абсолютно недостаточно. Чтобы пища попала в желудочно-кишечный тракт, откуда она благополучно попадет ко всем внутриорганизменным потребителям, ее надо обнаружить, добыть (для этого приходится иногда преодолевать большие трудности) и съесть. Только тогда ее дальнейшую судьбу можно доверить биохимическим и физиологическим механизмам, о которых мы говорили в предыдущих разделах.

Весь сложный комплекс вопросов, связанный с обеспечением нужд и потребностей организма во внешней среде, решают высшие уровни управления. Ориентация в окружающих условиях, выяснение «благоприятных» ситуаций для удовлетворения жизненных потребностей (например, обнаружение объектов, которые могут стать пищей), планирование операций по добыче пищи и воды, забота о сохранении собственной безопасности и, наконец, реализация выработанных «планов» с учетом возникающих по ходу действия препятствий — все это составляет содержание общей задачи управления поведением организма во внешней среде.

Прочитав эти строки, специалист по управлению сразу же отметит, что круг возникающих задач у «центров

управления» животного организма во многом шире того, с чем сталкиваются управляющие устройства в технических системах.

В самом общем виде задача управления в технике ставится следующим образом.

1. Перед началом работы системы задается цель, т. е. некоторое «руководящее лицо» определяет для системы то конечное состояние, в которое она должна перейти после завершения процесса управления. Для межзвездного корабля, например, это координаты точки космического пространства, в которой корабль должен оказаться в нужный момент времени, чтобы встретиться с кометой Галлея или другим небесным телом. Если рассматривать лису, преследующую зайца, тоже как «техническую систему», то можно выявить аналогичную цель — совмещение координат лисы и зайца в какой-то момент времени.

2. Выясняется или задается множество возможных (допустимых) решений задачи. В той же задаче движения космического корабля — совокупность всех траекторий в космическом пространстве, приводящих к заданной точке пространства, причем начинающихся только на известных стартовых полигонах и в заданные периоды времени. Важным пунктом здесь является учет разного рода ограничений, накладываемых на допустимое множество решений (ограничен запас топлива, недопустимы слишком большие перегрузки и т. д.). Аналогичные «прикидки» должна делать и лиса, гонящаяся за зайцем, — хватит ли сил? Можно ли прорваться через густой кустарник?

3. Дается или определяется состояние окружающей среды во время движения по допустимым траекториям. Для запуска ракеты важно знать, что первый участок траектории всегда проходит в атмосфере, а последующие — в безвоздушном пространстве, но при возможных встречах с метеоритами. И лиса, прогнозируя движение по своей траектории, должна помнить о препятствиях, например о возможности встречи с охотником.

4. С учетом возможностей системы, ограничений и будущих условий из всего множества решений выбирается наиболее подходящее, «оптимальное» с точки зрения разработчика системы или «хозяина». Для выбора такого наилучшего варианта приходится привлекать какие-то способы сравнения вариантов между собой. Критерием качества могут быть такие количественные или качественные показатели, как время достижения цели, расход ресурсов, близость получаемого результата к запланированному и т. д. Обычно бывает трудно выделить какой-то один параметр для оптимизации решения, и поэтому идут на более гибкие, неформальные способы сравнения результатов и останавливаются на интуитивно лучших компромиссных вариантах.

5. Выбранный вариант траектории реализуется, причем для достижения цели используются различные способы текущего управления и контроля. Наиболее известны способы, основанные на обратной связи (см. выше разд. 3.2). Лиса тоже может использовать обратную связь для сравнения своих координат с координатами зайца и непрерывного корректирования своего движения.

Легко видеть, что комплекс задач управления, возникающий в живом организме, существенно шире такой

«классической» постановки задачи. Первое: организм нельзя «выключить» или «включить» подобно машине, поэтому понятия «начала работы» и «конца работы» системы управления в нем весьма условны. Организм должен решать общую задачу управления всеми своими функциями, включая и поведенческие, непрерывно. Даже задачи ремонта входят в общий круг задач управления в организме.

Второе: все задачи стоят перед организмом одновременно. Приходится как-то организовывать последовательность их решения. Обратимся к той же аналогии с лисой и зайцем. Даже заметив зайца, сытая лиса преследовать его не бросится; скорее, запомнит место встречи «на потом». Задачи более или менее упорядоченно (причем «сами собой») сменяют друг друга в программе поведения животного: организация сна, безопасного отдыха, охрана своего охотничьего участка от конкурентов, поиск брачного партнера и т. д. и т. п. Даже начав выполнение какого-либо процесса управления — того же преследования — лиса в любой момент может прекратить его, изменив цель своего поведения (причиной чего может быть пожар, появление брачного партнера, угроза встречи с охотником или просто вдруг возникшая «уверенность» в безрезультатности охоты).

Текущее поведение животного, выполнение программы краткосрочного поведения всегда включено в контекст более широких, «глобальных программ», что пока еще недоступно никаким системам управления, создаваемым человеком для решения технических задач.

И все же существует глубокая аналогия между способами решения задач управления в машине и в организме животного. Еще Норберт Винер говорил в своей «Кибернетике», что решение задач управления — это получение информации и ее обработка.

Попробуем рассмотреть, какая информация и как используется в процессе решения задач управления на каждом из пяти упомянутых выше этапов — и в технике, и в живом организме.

Этап 1 — целеполагание. Откуда берется сама задача управления? В технике ясно: ее ставит руководитель работы, начальник установки, вообще ЛПР — т. е. лицо, принимающее решение. А в организме? Как, например, у ребенка возникает «задача управления движением» при желании перейти из комнаты в комнату? А никак, просто в какой-то момент ребенок «осознал», что он «хочет» этого. Цель как бы сама собой возникла в сознании

ребенка, как говорят психологи, актуализировалась. Таким образом, пока мы можем только констатировать: на этапе выбора цели организм использует имеющуюся у него информацию неизвестным для нас образом.

Перейдем ко второму и третьему этапам. Как определяется необходимое для решения задачи управления множество возможных решений с учетом состояния внешней среды и всевозможных ограничений? В живом организме, с одной стороны, и в примерах практической деятельности человека, с другой, эти этапы различаются только используемыми методами и применяемыми «подсобными» средствами.

Математик классического склада склонен описывать свой объект с помощью уравнений, например дифференциальных. Тогда множество допустимых решений можно записать в виде аналитического выражения. Задача целиком решается на бумаге.

Правда, решение такой задачи довольно-таки далеко от практически возникающих в современной технике задач. Так можно рассчитать орбиты планет (вспомните открытие планеты Нептун «на кончике пера»). Но так уже нельзя рассчитать траекторию космического корабля, летящего к тому же Нептуну (не хватит точности). В более сложных задачах процессы по-прежнему описываются дифференциальными уравнениями, но аналитических решений в виде формул на бумаге получить уже не удастся. Приходится прибегать к помощи ЭВМ и просматривать все множество возможных в реальной жизни ситуаций, решая соответствующие уравнения и анализируя огромные массивы получающейся цифровой информации. В реальных задачах, например при анализе характеристик автопилота для современного самолета, такую работу выполняют десятки специалистов в разных НИИ в течение многих месяцев. Но даже тщательный просмотр возможных траекторий и вероятных режимов работы будущей системы не всегда гарантирует выбор правильного решения. Так, американские специалисты «проглядели» ошибочный выбор характеристик первого корабля «Спейс Шаттл» — в своем первом полете «Шаттл», как выяснилось, мог перемещаться при полете в атмосфере только по восходящей траектории, что могло бы привести к аварии при попытке сделать незапланированную посадку.

Дело в том, что любой численный анализ все же не учитывает всех характеристик реального объекта (в по-

следнем случае — летных характеристик «Шаттла» в условиях атмосферы). Поэтому если представляется возможным, то просмотр множества возможных траекторий системы (т. е. всех действий управляющего персонала с оценкой последствий) лучше всего производить «на самом объекте». Тогда для анализа множества поведений системы создается специальный комплекс тренажерного типа, где человек анализирует возможные решения в условиях, весьма близко воспроизводящих реальную жизнь. Так, авиационные тренажеры состоят из макета кабины пилота со всеми приборами и органами управления самолетом, а за стеклами кабины с помощью специальной аппаратуры воспроизводятся картины, которые видел бы летчик из настоящего самолета. При посадке на ночной аэродром, например, изображение получается с телекамеры, движущейся над миниатюрной моделью аэропорта, или синтезируется специальными программами на ЭВМ.

Но даже в таких «приблизженных к жизни» системах, когда множество возможных траекторий человек получает в виде последовательностей зрительных образов, а результаты принимаемых решений предстают перед ним в зримой или даже осязаемой форме, несовершенство дисплея, на котором человек получает информацию, может оказаться решающим фактором, не позволяющим полностью анализировать ситуацию.

Академик Б. В. Раушенбах рассказывает о проблемах ручного управления космическим аппаратом: «В силу конструктивных особенностей кораблей «Союз» там нет переднего остекления, как у летчика, следовательно, нет и видимости в направлении пространства впереди. Космонавт имеет возможность видеть в этом направлении только через перископы или телекамеры. На экране он визуально наблюдает за обстановкой. При этом возник вопрос: может ли человек по плоскому изображению на экране восстановить объемность естественной космической панорамы? Оказалось, что (...) это невозможно. Потому-то на кораблях «Союз» пришлось поставить — и сейчас они устанавливаются на кораблях — разного рода мишени, метки, которые нужно совмещать, и т. д., т. е. пришлось ввести дополнительные признаки, которые бы позволили по плоскому изображению пилотировать».

Мы еще вернемся к вопросу о «дисплее», на котором воссоздается окружающая среда, чтобы тот, кому эта информация предназначена, мог принимать должные решения и выбирать наилучшее поведение системы. Но это уже будет «дисплей», созданный в мозгу человека самой природой.

А пока продолжим сравнение различных способов решения задач управления. Нам уже ясно, что в зависи-

мости от «технического оснащения» как задание цели управления, так и анализ возможных путей ее достижения выглядят совершенно по-разному. При аналитическом решении в виде формул цель задается в виде цифр, при решении на дисплее цель может задаваться в виде графических образов, например точки.

При использовании тренажера цель управления задается в той же самой форме, что и в реальной задаче — например, в виде словесного описания, образа и т. д.

Точно так же обстоит дело и с описанием среды, в которой происходит «движение» системы: в математических постановках среда только обозначается, в тренажерных — предстает перед человеком, решающим задачу, во всей полноте зрительных, осязательных и других восприятий.

Следующий этап решения задачи управления — выбор из всех возможных траекторий поведения той, которая является в некотором смысле наилучшей (этап 4 на стр. 91). Теоретически здесь следовало бы прибегнуть к вычислению критерия качества для каждой из возможных траекторий. Фактически это легко сделать при решении задачи на бумаге; труднее — при расчетах на ЭВМ (не потому, что машина не может посчитать какие-то функционалы на реализуемых траекториях, а потому, что лучшее приближение к реальности ставит под сомнение необходимость их вычисления вообще). Наконец, при тренажерных методах решения сам вопрос о критериях качества, критериях отбора наилучшего варианта практически отпадает или по крайней мере задача формализации критерия качества, его вычисления теряет первоначальный смысл. Ведь критерий вводится для того, чтобы отобрать какую-то траекторию с тем, чтобы потом ее апробировать «в деле». А при использовании столь близкого подобия решаемых задач реальным условиям среды, которые возможны при тренажерных методах, адекватность получаемых решений можно сразу же оценить «на практике». Одно дело — выбирать решения на бумаге (без вычисления критерия здесь не обойтись), и совсем другое дело — движением штурвала минимизировать ошибку самолета при приземлении на посадочную полосу, которую от настоящей целью отличить.

Эти же соображения остаются в силе и тогда, когда мы захотим проанализировать, как реализовать найденное решение на практике. Решение, найденное в аналитической постановке задачи или в вычислительном эксперименте на ЭВМ, еще долго придется «модифицировать»,

т. е. переводить на язык привычных действий человека-исполнителя. Решение, найденное на тренажере, получается непосредственно в виде действий, ощущений, привычек, которые требуются в процессе реальной работы по управлению системой.

Итак, сделаем один очень важный вывод: методы решения задачи управления, несмотря на то, что сама задача не меняется, самым существенным образом зависят от тех «технических средств», которые удается привлечь для ее решения.

Здесь нам придется сделать маленькое отступление, чтобы договориться о терминах. Во-первых, давайте как-нибудь обозначим тот элемент системы, который осуществляет процесс управления, т. е. который определяет цель, оценивая свои возможности, выбирает наилучший вариант поведения и реализует его, учитывая текущее изменение ситуации. В разных научных дисциплинах для его обозначения используются разные обозначения, разные понятия. В технике (когда речь идет о человеке как управляющем элементе системы) говорят или о лице, принимающем решение (для краткости его обозначают аббревиатурой ЛПР), или — если речь идет о большей включенности человека в процесс — о человеке-операторе. В философских работах и в методологических рассуждениях используется термин «субъект управления». Обе эти «крайние» позиции кажутся сейчас не очень подходящими: «субъект» далек от управления посадкой самолета, ЛПР или «человек-оператор» в качестве управляющей инстанции прямо именуют человека. А если процесс управления идет в мозгу у самого человека? Остается взять в качестве опорного термина мелькнувшее в предыдущем предложении обозначение «управляющая инстанция».

Итак, процесс управления у нас будет осуществлять управляющая инстанция.

Задача управления предстает перед управляющей инстанцией не «как попало» и не «в чем мать родила». Задача управления предъясняется в «обработанном виде»: в математической постановке на бумаге, в виде уравнений и их графиков на экране компьютерного дисплея, в виде имитатора окружающей обстановки при работе на тренажере.

Можно по аналогии с терминологией, используемой в компьютерных дисциплинах, называть технические («аппаратные») средства представления условий решения задач

управления «интерфейсом». Слово это достаточно емкое и содержательное: в информатике и вычислительной технике интерфейсом называется совокупность аппаратных и программных средств, необходимых для стыковки между собой различных частей компьютера и вообще различных элементов системы.

Интерфейс задачи управления, таким образом, содержит в нашей трактовке технические или «аппаратные» средства представления информации для управляющей инстанции и алгоритмы работы с этой информацией.

Например, при математической постановке задачи для аналитического решения интерфейс включает бумагу, карандаш, способы записи уравнений и способы их решения. Интерфейс задачи управления тренажером состоит из объемного макета рабочего места оператора, плоского экрана с воспроизводимыми на нем изображениями, механизмов зрительной и тактильной рецепции человека-оператора, его опыта и знаний... Впрочем, здесь возможны различные толкования — очень уж сложны затрагиваемые нами вопросы.

Если бы эта часть текста писалась десять или даже пять лет тому назад, вряд ли можно было бы найти эквивалентные «технические» термины для многих биологических понятий и явлений. Сегодня аналогия с ЭВМ напрашивается сама собой. Работу мозга в нашем изложении удобно описывать в тех же терминах, что и работу компьютера. По крайней мере, «аппаратная часть» мозга поддается анатомическому и физиологическому исследованию.

Но уже завтра, возможно, сегодняшние представления о работе мозга могут принципиально устареть и потребуются совершенно новый язык ее описания, никак не коррелирующий с понятиями нынешней вычислительной техники. Что ж, такова судьба всех аналогий организма с машиной — организм намного сложнее любых машин, созданных руками человека. А пока — будем использовать понятия управляющей инстанции и интерфейса, с помощью которого она решает задачи управления.

3.9. Управление поведением у простейших животных

Теперь естественно задаться едва ли не очевидным вопросом, непосредственно вытекающим из предыдущего рассмотрения задач управления и «аппаратно-программного обеспечения» их решения. Каковы аппаратные и

программные средства, предоставленные эволюцией в распоряжение живых организмов для того, чтобы они могли решать задачи управления своим поведением?

По крайней мере, у простейших организмов, как сегодня кажется, и аппаратная реализация, и некоторые способы кодирования, переработки и использования информации для целей управления близки к расшифровке.

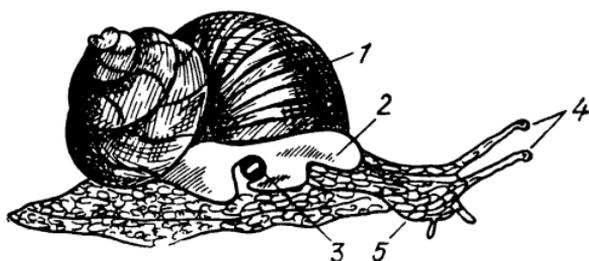


Рис. 29. Виноградная улитка:

1 — раковина, 2 — мантия, 3 — дыхальце, 4 — щупальца с глазами, 5 — положение ротового отверстия и глотки (на рисунке не видно)

Удобным объектом изучения работы высших уровней управления «на аппаратно-программном уровне» в животном организме стала виноградная улитка. Это животное (показанное на рис. 29) обладает хорошо организованным и довольно сложным поведением, построенным на основе безусловных рефлексов. Для нас интересны, в частности, пищевое и защитное поведение. Пищевой рефлекс позволяет улитке на расстоянии обнаруживать пищу, целенаправленно приближаться к ней и поесть ее. Защитных рефлексов у улитки несколько: например, прикосновение к мантии вызывает защиту дыхательной системы — закрытие дыхальца.

В нашей таблице относительной сложности различных живых организмов (см. табл. 4 на стр. 56) улитка относится к типу моллюсков.

Моллюски обладают развитой системой внешних функций и соответствующей им системой внешних органов: они имеют чувствительные щупальцевидные придатки, глаза, а также органы химического чувства. Пища поступает через ротовое отверстие с теркой (радулой) для соскабливания пищи, например, с камней и ее перетирания. В поисках еды виноградная улитка может перемещаться на большие расстояния, а обнаружив пищу, приближается к ней и поедает. Процессы добывания пи-

щи — по нашей терминологии — аппаратно и программно закодированы в нервной системе моллюска.

Нервная система улитки (рис. 30) образована немногочисленными крупными нейронами, что очень облегчает ее изучение. Ученые научились идентифицировать у разных особей эти нейроны и даже составили карты их расположения (на рисунке показана одна из таких карт).

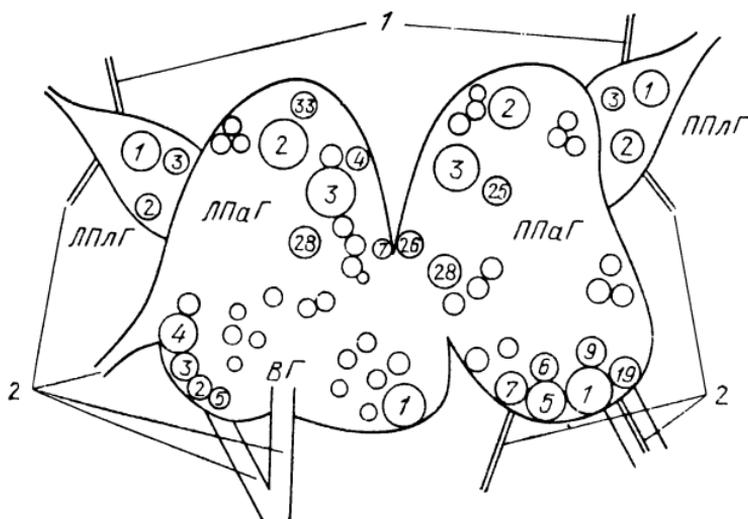


Рис. 30. Идентифицированные нейроны подглоточного комплекса виноградной улитки.

Для простоты на схеме цифрами обозначены только крупные нейроны. Буквами обозначены ганглии: ЛПаГ и ППаГ — левый и правый париеальные, ЛПлГ и ППлГ — левый и правый плевральные, ВГ — висцеральный. 1 — мускул дыхальца, 2 — прочие мускулы

На основе таких карт изучаются функции отдельных нейронов и их взаимодействие в ходе организации поведенческих актов.

Проще всего организован оборонительный рефлекс. Например, закрытие дыхальца при угрозе опасности осуществляется по принципу прямой связи (см. выше разд. 3.2 — стр. 58).

Аппаратно цепь управления при этом рефлексе выглядит так: вначале информация об опасности (например, сигнал раздражения при прикосновении к мантии) в виде нервных импульсов поступает от возбужденного нейрона-рецептора к командному нейрону. Если таких сигналов достаточно много, командный нейрон возбуждается и посылает нервный сигнал на мотонейроны. Их возбуждение приводит к сокращению соответствующих мышц и закрытию дыхальца.

На рис. 30 можно показать те нейроны, которые образуют управляющую цепь защитного поведенческого акта. Сенсорных нейронов, по-видимому, в этой цепи несколько (включены они, естественно, параллельно). Сегодня из них идентифицирован только один — ЛПа7. Командных нейронов известно два — ЛПа3 и ППа3; мотонейронов, которыми они управляют, известно тоже два, ППа33 и ЛПа33 (на рисунке показан только один). Они и закрывают дыхальце. Схема организации канала управления очень проста (рис. 31).

Сначала в системе управления выделяются отдельные признаки ситуации. В нашем случае такой признак, возможно, всего один — наличие раздражения. Командный

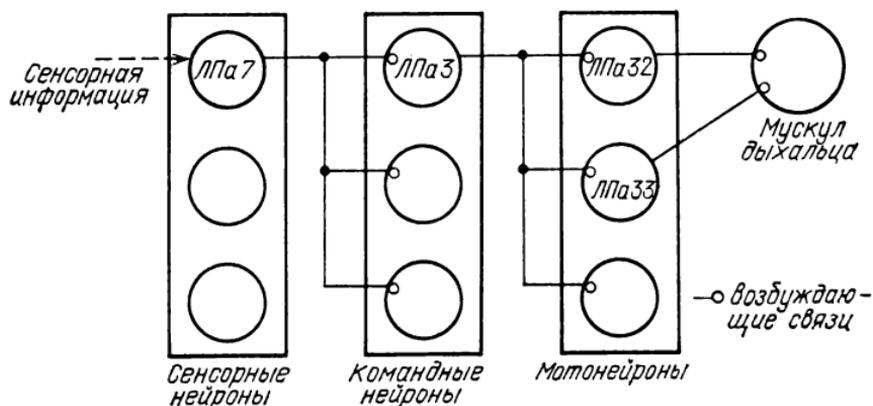


Рис. 31. Организация защитного поведенческого акта у виноградной улитки.

В ответ на поступление сигнала-стимула возбуждаются сначала сенсорные нейроны, затем командные и, наконец, мотонейроны, что приводит к закрытию дыхальца

нейрон реагирует только на сумму признаков, которая «аппаратно» определяет опасную ситуацию. Опасная ситуация возникает, если раздражение достаточно велико (признак обнаружен несколькими сенсорными нейронами).

В чуть-чуть более сложных поведенческих актах (например, при пищевом рефлексе) ситуация та же. Пища характеризуется несколькими признаками — например, отличием по яркости от окружающего фона, запахом и т. д. Тогда пищевое поведение описывается следующим образом. Глаза моллюска «блуждают» по пространству, и разные нейроны-рецепторы возбуждаются каждый раз, когда в окружающей среде имеется тот признак, на который «программно» настроен данный нейрон. Один из них реагирует на размер световых пятен, другой — на запах,

третий — на форму. Но вот в какой-то момент времени оказались возбужденными все рецепторы — в наличии все признаки пищи. Пища обнаружена, и возбуждается соответствующий командный нейрон. Им запускается двигательный комплекс мышц, которые сокращаются по заложенной программе — улитка движется по направлению к пище. Направление поддерживается очень просто — если есть комплекс признаков «пища» на рецепторах — движение продолжается, если хотя бы один признак исчез — движение к пище останавливается, и начинается снова случайное блуждание до обнаружения пищи,

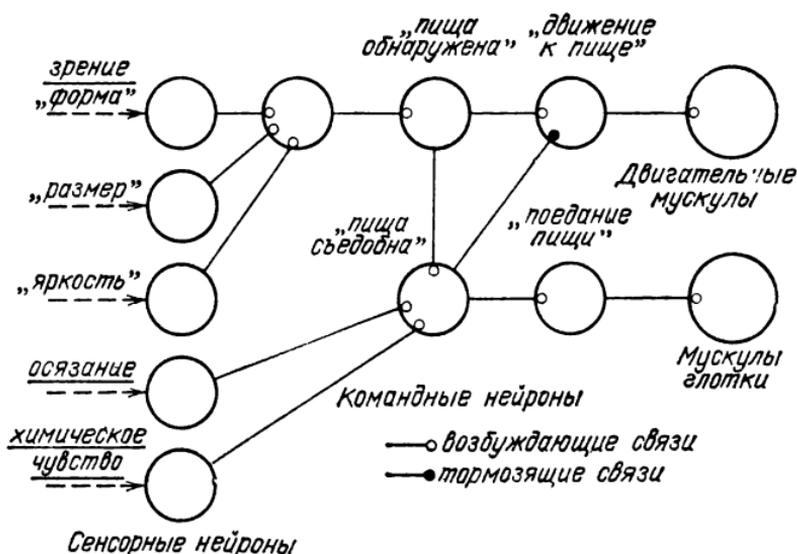


Рис. 32. Схема управления пищевым поведением виноградной улитки

Такое движение — с перерывами или без них — продолжается до тех пор, пока не возбудится еще один нейрон — осязательный. Теперь пища достигнута. Задача движения выполнена, мотонейроны пространственного перемещения тормозятся и возбуждается мотонейрон, запускающий мышцы глотки.

Программа пищевого поведения прерывается, как только выпадает любой из признаков ситуации на сенсорных нейронах. Примерная схема «аппаратно-программной» реализации пищевого поведения приведена на рис. 32. У виноградной улитки этот рефлекс идентифицирован пока не полностью: известны только некоторые из командных нейронов (ЛМц1 и ПМц1) и мотонейроны мышц

глотки (ПБк и ЛБк) — на рисунках эти обозначения не приводятся.

Легко видеть, что в основе организации поведения улитки лежит несколько простых принципов. Первый из них таков: кодирование информации осуществляется «номером канала». Грубо говоря, все нейроны одинаковы, но возбуждение нейрона, расположенного в разных местах цепи, означает различные вещи. Один нейрон означает наличие признака (сенсорный), другой — уже комплекс признаков («понятие»), третий — даже не «понятие», а «понятие-действие» (командный нейрон и мотонейроны).

Роль «управляющей инстанции» у виноградной улитки выполняет комплекс командных нейронов (вероятно, они никак между собой не связаны и каждый отвечает за свой рефлекс). Интерфейс внешней среды представлен совокупностью нейронов-сенсоров, где информация о среде сводится к крайне упрощенному представлению. Для решения тех простых задач управления, с которыми сталкивается улитка, оказывается достаточным иметь ограниченный перечень признаков среды (кодируемых на уровне «есть-нет») и еще более узкий круг «понятий» («пища», «опасность» и т. п.).

Ясно, что столь простые механизмы управления могут быть эффективными только в очень ограниченном диапазоне изменений внешней среды. Врожденный пищевой рефлекс улитки как раз и вырабатывался эволюцией на протяжении многих тысячелетий жизни животных в постоянных условиях обитания.

По мере увеличения числа нейронов в сенсорной части системы интерфейс может усложняться (возрастать число признаков, совершенствоваться «система понятий», улучшаться качество выполнения «действий»). Но все это происходит в рамках тех же программно-аппаратных средств, что и у виноградной улитки. Естественно считать, что такие механизмы сохраняются в «нижней» части управления поведением и у более высокоорганизованных живых существ — вплоть до млекопитающих. Даже поведение ребенка иногда может быть очень близким к рассмотренным выше схемам.

Лидия, которой недавно исполнился год и три месяца, четко выделяет в своем домашнем окружении один класс предметов, который она обозначает словом «к-хх». Понятие «к-хх» можно определить как «звучащий предмет», оно включает два признака — ограниченность объекта в пространстве и способность издавать звук. Совпадение обоих признаков для Лидии означает, что «к-хх» обна-

ружен, и факт немедленно фиксируется произнесением этого слова. В класс предметов «к-хх» попали телевизор, радио, телефон, стиральная машина и электробритва.

Даже на таком простом уровне организации поведения живые организмы приобрели множество интересных механизмов управления. Так, на схемах управления поведением виноградной улитки нейроны встречаются парами, левый и правый. Ориентация в пространстве — в частности, движение в направлении пищи, поддержание равновесия и т. д. — обеспечивается поиском (сначала хаотическим, потом организованным) такого положения, когда воздействие на симметрично расположенные органы (обоняния, равновесия, слуха) уравнивается.

Постоянная активность животного запрограммирована в самой аппаратной реализации системы управления — сенсорные раздражения поступают непрерывно, и возбуждение любой группы мотонейронов может произойти в любой момент.

Простое количественное усложнение и усовершенствование рассмотренных путей, казалось бы, может дать эффективные способы решения сколь угодно сложных задач управления. Понятия образуются сочетанием многих тысяч признаков, «первичные» понятия становятся базой для второго уровня понятий, те — для следующего и т. д. Растет иерархическая система все более высоких абстракций, усложняется система связей между ними. Кроме врожденных цепей возникают управляющие цепи на основе индивидуального опыта, обучения. В мозгу 10^{10} элементов — сколько же понятий, действий, связей могут дать их всевозможные сочетания!

Современная информатика и кибернетика в принципе могли бы расшифровать и эти сложнейшие сети, распутать связи аппаратной реализации цепей, проникнуть в тайны программирования процессов. Но...

Эволюция не остановилась на пути количественного усложнения механизмов управления, с которыми мы ознакомились на примере виноградной улитки. Она дала человеку (а в чем-то — и животным) качественно иные способы познания среды, принципиально новые пути реализации управления жизненными процессами.

И как бы ни были изощренны сегодняшние нейрофизиологические и биокрибернетические методы исследования механизмов мозга, исследователь пока не может продвинуться «вверх» даже по количественному пути — от виноградной улитки выше и выше.

«Выше и выше» — не удастся. Очень уж четко виден потолок, до которого рукой подать и который сегодня абсолютно недосыгаем. Речь идет о психике человека — мыслях, чувствах, переживаниях. Как и откуда на пути накопления сложности (от виноградной улитки — выше, выше, выше...) возникло сознание человека? Ощущения, восприятие, память, чувство, воля — что это такое? Для меня, автора этой книги, в явлениях психики и сознания бьется мучительная тайна жизни. Не тех ее явлений, о которых мы говорили в предыдущих разделах — метаболические процессы, кибернетические механизмы... — а той жизни, которой живем мы все, авторы и читатели, люди.

Сегодня ясно, как физиологические механизмы кодируют и преобразуют информацию. Ясно, что организм человека при рождении получает «в наследство» мощную аппаратную реализацию решающего устройства — мозга с соответствующим программным обеспечением (специалист по ЭВМ добавил бы — системным программным обеспечением). Вроде бы все характеристики таких систем — «вещественные», «энергетические», «информационные» — нашему пониманию доступны. Но в них нет подходящего места для психики.

Как физиологические механизмы участвуют в психических явлениях, включая их высшую форму — сознание? Это и есть тот потолок, о котором мы говорим. Ниже — физиология, биохимия, биофизика, кибернетика, информатика. Выше — только психика со своей спецификой. Граница абсолютно непроницаема, через нее нет никаких мостиков — нет даже намека на то, как можно было бы их перекинуть.

Современная наука может только повторить слова В. И. Ленина о том, что на вопрос, как совершается «превращение энергии внешнего раздражения в факт сознания», ответа нет, что этот процесс «остается еще исследовать и исследовать» *).

Поэтому и мы будем блуждать по обе стороны этой границы, пробуя выяснить, какими же средствами обла-

*) Ленин В. И. Полн. собр. соч. Т. 18. — С. 40, 46. Последние абзацы раздела — свободный пересказ слов советского психолога П. Я. Гальперина, а с вопросом этим можно ознакомиться по книге В. К. Вилюнаса «Психологические механизмы биологической мотивации» (М.: Изд. МГУ, 1986).

дает организм для решения задач управления во всей их сложности, которая адекватна сложности окружающего нас мира.

3.10. Интерфейсы человеческого организма

Будь осторожен, дорогой читатель: мы только робкие ученики, пытающиеся осознать то, что происходит в сложнейшей из существующих в мире систем — мозге человека.

Правда, у нас есть определенное оправдание. Мы будем ограничивать рассмотрение задачами управления, так что возможные упреки в свехупрощении, вульгаризации психических процессов не будем принимать близко к сердцу.

Итак, управление состоит в следующем. Некоторая управляющая инстанция через определенный интерфейс получает информацию об условиях задачи и, пользуясь имеющимися в ее распоряжении аппаратно-программными средствами, «просматривает» возможные варианты решений, выбирает подходящий и реализует его, сообразуясь с текущими условиями.

Нет никакого сомнения, что подобные процессы протекают и в мозге человека. Мало того, хорошо известно, что органы чувств — глаза, уши, тактильные рецепторы — передают информацию в мозг только в виде нервных импульсов, т. е. электрических сигналов, идущих по соответствующим нервам (зрительному, слуховому) в определенные анализаторные отделы мозга. На этом этапе физиологические механизмы рецепции внешнего мира очевидным образом «сжимают» информацию об окружающих нас явлениях, преобразовывают ее то в химическую, то в электрическую форму. Потом эта информация начинает обрабатываться на разных уровнях центральной нервной системы. Мир, разобщенный по ручейкам импульсов в отдельных нервных волокнах, постепенно возвращается к своему первоначальному виду — предметному образу среды.

То, что человек видит, воспринимает, то, что он считает внешним миром — вовсе не сам мир. Надо было стать человеком, чтобы понять это: нам в наших восприятиях дан не сам объективный мир, а только его образ, воспроизведенный на нашем внутреннем дисплее с той степенью полноты, правдивости и объективности, кото-

рую допускает аппаратно-программное обеспечение нашего мозга.

Субъективность, неполнота картины мира на нашем дисплее ясна хотя бы из того, что органы чувств человека неспособны воспринять многие характеристики внешнего мира — электромагнитные излучения за пределами узкого диапазона зрения, механические колебания — вне слухового диапазона, радиацию, тепловое излучение и т. д. Человек не отличает на расстоянии горячий чайник от холодного, двухпудовую гирию от ее картонной имитации у циркового артиста.

Но насколько удобнее и проще решать всевозможные задачи управления, касающиеся именно этого предметного мира, на нашем «внутреннем» дисплее! Оперируя информацией, данной на языке самих предметов и локализованной в их образах, мозг человека способен быстро и эффективно решать практически все вопросы, стоявшие перед ним в течение долгих тысячелетий эволюции, от первобытно-общинного строя до современных общественных формаций.

Собственное перемещение в окружающем пространстве, взаимодействие с предметами окружающей среды, их использование в качестве вспомогательных средств в повседневной жизни — для всех этих задач картина мира, синтезируемая интерфейсом человека, оказалась достаточной. Только в последние столетия потребовались другие интерфейсы для решения практических задач — появились математические формулы на бумаге, потом — компьютеры, тренажерные системы. О них мы говорили выше (разд. 3.8) — не симптоматично ли, что общая тенденция их развития в чем-то главном повторяет путь эволюции? Дисплей тренажера пока еще не объемен — но он явно идет к повторению внутреннего дисплея человеческого интерфейса.

Образ мира, синтезируемый мозгом человека, — тот «полигон», на котором решаются текущие задачи управления. Еще раз пробежим взглядом по основным этапам решения задачи управления: целеполагание, возможные пути достижения цели, выбор наилучшего, движение по «обобщенной траектории» к цели.

Наш внутренний интерфейс позволяет формулировать эти этапы и реализовывать их в наиболее удобной для человеческого сознания форме. Цель задается (по крайней мере, в простых случаях) непосредственно в образном виде. Множество возможных путей достижения цели — это знание свойств предметов окружающего мира, но

прежде всего — знание собственных возможностей, в простых случаях — динамических, в сложных ситуациях — самых разных, начиная от психологических характеристик своей личности и кончая своими организаторскими способностями. Перед внутренним взором предстает как бы полигон, где в образном виде перемещаются все действующие лица и где знания, опыт и интуиция определяют «правила игры». Если сравнить то, что происходит на нашем внутреннем интерфейсе, с какой-то изощренной игрой, то среди фишек, обозначающих участников, будет одна особенная, которая идентифицируется как «я». Фишку эту тоже можно увидеть на «внутреннем дисплее»: опустив глаза, можно осмотреть ее руки, ноги, одежду. Посмотрев в зеркало, увидеть ее лицо, изучить мимику; услышать речь.

Именно для этой «фишки» и разрабатывается программа деятельности, именно она и выполняет процесс управления, направленный на достижение поставленной цели.

Трудно удержаться от соблазна привести цитату из книги П. Я. Гальперина «Введение в психологию»: «Кто же выполняет эту деятельность? Кто испытывает побуждения, перед кем образы открывают панораму поля возможных действий? Очевидно, в центральной нервной системе вместе с «центрами», осуществляющими психическое отражение ситуации, выделяется особый центр, «инстанция», которая представляет индивид в его целенаправленных действиях. Перед ним-то и открывается содержание этих психических отражений. Эта «инстанция» располагает прошлым опытом индивида, получает и перерабатывает информацию о его «внутренних состояниях» и об окружающем его мире...»

Высшие сферы управления в человеческом организме можно представить себе следующим довольно наглядным образом: имеются огромные хранилища информации, где записываются все сведения о внешнем мире, данные о текущем состоянии самого организма, его потребностях и т. д. Хотя о том, в каких конкретных формах хранится эта информация, сегодня известно очень мало, ясно, что она представляет собой какие-то высшие обобщения тех последовательностей нервных импульсов, которые поступают к центрам организма по нервным каналам. Это — сфера интересов современной биохимии, нейрофизиологии, а в будущем — информатики и кибернетики.

Самым высшим уровнем этой части системы является генерация образа внешнего мира на внутреннем дисплее человеческого организма. На этом уровне как бы создается гигантская «книга», на страницах которой записаны все сведения о самом организме и окружающем мире.

Какое место из этой «книжки» читать, к каким выводам приходиться, как оценивать прочитанное — это уже совсем другая сфера, сфера психики. Здесь действие однозначных законов кибернетики и информатики кончается.

Законы психики действуют уже совсем по-другому.

Интересный эксперимент, подтверждающий наше высказывание, был проведен И. М. Фейгенбергом*). В гипнотическом сне человеку внушается, что он не видит левым глазом. В эффективности гипноза легко убедиться: закрыв ладонью правый глаз, испытуемый сообщает, что ничего не видит, хотя его левый глаз открыт.

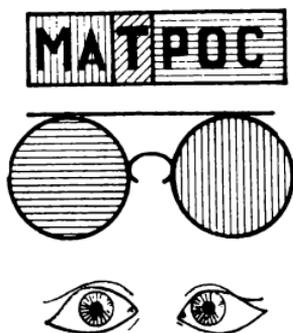


Рис. 33. Гипнотическая проба с поляроидами.

В этом эксперименте показывается, что при гипнозе поступающая по сенсорным каналам информация продолжает обрабатываться по обычным законам, но сознание может не воспринимать этой информации

После этого экспериментатор переходит ко второй пробе — пробе с поляроидами. Испытуемому надевают поляризованные очки, причем плоскости поляризации левого и правого глаза взаимно перпендикулярны. Испытуемый не знает о поляризации и считает, что очки просто солнцезащитные. После этого на экране ему предъявляется слово, которое он должен прочесть вслух. Хитрость состоит в том, что слово образуется тоже поляризованным светом. Например, слово «матрос» (рис. 33) поляризовано таким образом, что физически свет от букв «м» и «а» не попадает в правый глаз. От остальных букв свет попадает на сетчатку правого или обоих глаз. Опыт показывает, что при определенной глубине гипноза испытуемый читает слово «матрос», а не «трос», как следовало бы ожидать, — ведь левый глаз «не видит», в чем снова можно убедиться, закрыв правый, «видящий» глаз ладонью.

Итак, по законам физиологии информация поступает в мозг, где преобразуется и доходит до внутреннего интерфейса. Но «читатель» — та самая «инстанция, представляющая индивид в его действиях» — действует уже по другим законам — законам психики. Он может читать открывающуюся перед ним «страницу книги» с записанной на ней информацией, а может и не читать.

Точно так же обстоит дело и со многими другими опытами, основанными на внушении: человек может чувст-

*) Фейгенберг И. М. Видеть — предвидеть — действовать. — М.: Знание, 1986.

зовать или не чувствовать боль; после приложения безобидного пятака к руке на ней может образоваться волдырь, если испытуемому внушить, что пятак раскален. Законы психики позволяют «читателю» воспринимать имеющуюся информацию, игнорировать ее или даже читать не то, что записано.

Еще раз напомним, что современная наука практически не имеет данных об организации мыслительных процессов, памяти и т. д. Отрывочную информацию о возможных здесь явлениях получают пока лишь случайно, в основном при наблюдениях людей с различного рода отклонениями или нарушениями деятельности мозга. Приведем лишь пример, ставший классическим.

Во время оперирования больных с височной эпилепсией канадский нейрофизиолог и хирург У. Пенфилд заметил, что при электрическом раздражении височной области больные вспоминали явления своей жизни, казалось бы, ими совершенно забытые. Одна больная слышала военный марш, исполняемый оркестром, и могла напеть его, другой видел сцену игры в бейсбол, которую в обычном состоянии не помнил.

Можно сказать, что в этих случаях или происходит непреднамеренное выведение информации на внутренний интерфейс, или «включаются» механизмы чтения этой информации психическими инстанциями.

В последних разделах этой главы мы много говорили о внутренних средствах, с помощью которых «психические инстанции» «считывают информацию», представляемую им физиологическими инстанциями, — внутриорганно-интерфейсе, внутриорганизменном дисплее.

Возможно, кто-то из читателей захочет ознакомиться с тем, что достигнуто в этой области современными ЭВМ. Очень многое, если подходить с общенаучных позиций, и очень малое — по сравнению с организмом. О машинной графике, например, можно прочитать хорошую статью в сборнике «Современный компьютер» (Москва, «Мир», 1986 г.).

Ну и в конце главы, как кажется, мы можем дать комментарий к одному давнему спору еще 1960-х годов. Может ли машина мыслить? Этот спор давно затих, и у инженеров (по крайней мере, работающих с ЭВМ) осталось общее впечатление победы: разумеется, машина может мыслить. Решать задачи, обрабатывать информацию, принимать решения — вообще заменять интеллект во всех сферах.

Но, подводя итоги, так и хочется сказать: обрабатывать информацию — да, может. Мыслить, чувствовать — все-таки нет.

IV. ОРГАНИЗМ КАК ЦЕЛОЕ

4.1. Гомеостаз

Идея о том, что внутренняя среда организма должна оставаться постоянной и что такое постоянство является условием «свободной и независимой жизни», принадлежит великому французскому физиологу Клоду Бернару. «Все жизненные механизмы, как бы разнообразны они ни были, имеют только одну цель, сохранение постоянства условий жизни во внутренней среде...», — писал он.

Мы помним, однако, что Бернару принадлежит и мысль о том, что создание такой среды нужно не само по себе, а чтобы обеспечить организм, «снабдить его в надлежащей мере».

Эта двойственность формулировки целей управления прослеживается во всей истории физиологической науки об организменных регуляторных механизмах. Еще в 1860 г. И. М. Сеченов обсуждал «регуляцию прихода с расходом» и утверждал, что «механизмов, поддерживающих равновесие между этими двумя величинами, в организме очень много». И. М. Сеченов видел и связь между управлением темпами потоков и постоянством внутренней среды: «Приход и расход минеральных веществ равны между собой, и это есть, конечно, ручательство за то, что содержание этих веществ в организме остается постоянным».

Идея постоянства внутренней среды организмов достигла своего апогея после трудов американского физиолога Уолтера Кеннона, который в конце 1920-х годов ввел для этого понятия новый термин — гомеостаз.

«Постоянные условия, которые поддерживаются в организме, можно было бы назвать равновесием. Это слово, однако, имеет довольно точное значение для относительно простых физико-химических состояний в замкнутых системах, где уравниваются известные силы. Координированные физиологические процессы, ко-

торые поддерживают большинство установившихся состояний в организме, настолько сложны и специфичны для живых систем, включая, возможно, мозг и нервы, сердце, легкие, почки и селезенку, работающие совместно, что я предложил специальное обозначение для этих состояний — гомеостазис. Это слово не предполагает чего-то установившего и неподвижного, застывшего. Оно означает состояние, — состояние, которое может меняться, но которое относительно постоянно», — писал У. Кеннон в 1932 г. в своей замечательной книге «Мудрость тела».

Понятие гомеостаза оказалось настолько привлекательным, созвучным идеям кибернетики 1960—1970-х годов, что многие исследователи считали постоянство внутренней среды едва ли не абсолютом, а необходимость удовлетворения потребностей была на время отодвинута как бы на второй план.

Развитие технических средств, позволивших проводить многочисленные и более точные измерения различных переменных внутренней среды, показало, однако, что вариабельность внутренней среды существенно больше того, что казалось уже общепринятым. Выяснилось, например, что индивидуальные «нормы» по огромному большинству измеряемых переменных допускают очень заметные отклонения, что сами переменные с течением времени совершают колебания, а «нормы» резко меняются в зависимости от возраста, профессии, условий жизни организма.

Многие переменные, характеризующие минеральный обмен, вообще оказались нерегулируемыми (т. е. их регуляция осуществляется полностью пассивно). Концентрация некоторых компонентов в крови может меняться в десятки раз без видимых отрицательных последствий (концентрация лимонной кислоты, например, меняется в пределах от 1,4 до 30 мг %). Концентрация многих веществ на некоторое время возрастает и после приема пищи (для глюкозы это явление мы обсуждали в предыдущих примерах, аналогичный подъем наблюдается для липидов после приема жирной пищи — так называемая «абсорбтивная липемия»).

И вообще, современная биохимия полагает, что специальные механизмы существуют для поддержания постоянства многих (холестерин, липиды, глюкоза, мочевина и др.) веществ, но не для всех. В частности, для тех веществ, которые в принципе не синтезируются в организме (десяти незаменимых аминокислот, витаминов и т. п.), существует только один способ «регуляции» — регулярное получение их с пищей.

Сейчас, похоже, постепенно складывается концепция гомеостаза, свободная от ограниченности и ортодоксальности ранних кибернетических представлений и учитывающая достижения последних лет. Попробуем сформулировать некоторые положения современной трактовки концепции гомеостаза.

Гомеостаз — относительное постоянство переменных внутренней среды организма при внешних и внутренних возмущениях — является важным фактором удовлетворения жизненных нужд организма. Как и для любого механизма управления, для поддержания гомеостаза от организма требуется определенный расход метаболической энергии. Поэтому сфера, охваченная в организме гомеостазом, не беспредельна — постоянство внутренней среды поддерживается прежде всего там, где дополнительные энерготраты или абсолютно необходимы для жизнедеятельности, или окупаются расширением жизненных возможностей. В остальном гомеостаз поддерживается за счет «дешевых» средств — например, пассивной регуляции (если она справляется с возмущениями) и вообще там, где постоянство каких-либо веществ получается «путно», т. е. без расхода энергии.

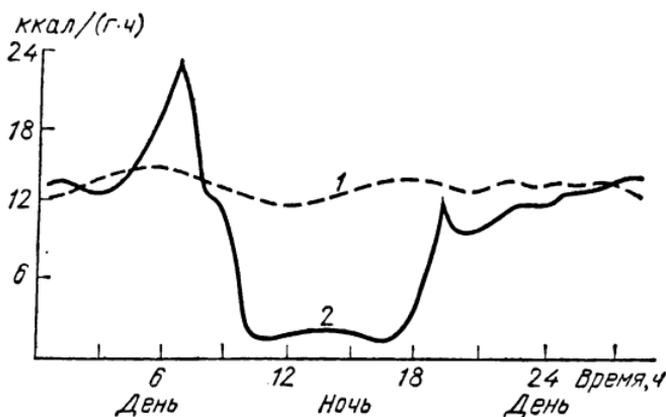


Рис. 34. Энергетические расходы на поддержание гомеостаза. Суточный график расходования энергии маленьким зверьком — землеройкой (1) и птичкой таких же размеров — колибри (2). Постоянство температуры у землеройки требует значительно большего суточного расхода энергии

Энергетические расходы на поддержание гомеостаза могут быть весьма большими. На рис. 34, например, сравниваются энерготраты двух животных одинаковой массы (землеройки и колибри). Землеройка поддерживает температурный гомеостаз, колибри по ночам впадает в спячку, и температура тела (соответственно и энерготраты)

падают. Количество энергии, которое расходуется на поддержание постоянства температуры у землеройки, можно определить по площади, заключенной между двумя кривыми: интенсивность обменных процессов при отсутствии регуляции температуры тела падает примерно в шесть раз.

Таким образом, экономия неизбежно приводит к тому, что «гомеостатируется» лишь некоторая часть переменных в организме. Можно быть уверенным, что к числу гомеостатируемых величин в организме животных и человека относятся прежде всего показатели обменных процессов в самых высокоорганизованных системах организма — в нервных клетках, в высокоспециализированных клетках внутренних органов и т. д.

Обеспечение гомеостаза — одна из целей самосохранения организма. Гомеостаз внутренней среды позволяет эффективно поддерживать процессы жизнедеятельности и жизненную активность, но потеря гомеостатических свойств какими-то системами еще не смертельна для организма. Жизнь продолжается и в экстремальных условиях, хотя это и может привести к плохим последствиям.

Гомеостаз организма способствует поддержанию жизни организма как целого. Поэтому в экстремальных условиях гомеостатические механизмы действуют «в интересах целостности организма», лишая «командными методами» некоторые части тела возможности удовлетворять свои потребности.

Начинается интенсивная физическая нагрузка — мышечные органы нуждаются в повышенном кровоснабжении, так как именно кровь приносит все необходимые для работы вещества. Казалось бы, чем шире раскроются сосуды, питающие работающие мышцы, тем скорее и лучше будут удовлетворены потребности мышечных тканей. Однако центральные гомеостатические механизмы — регуляция артериального давления — препятствуют этому: сосуды работающих органов расширяются под контролем центральных механизмов только так, чтобы не лишить кровоснабжения другие, более важные органы и ткани. На какое-то время после начала интенсивной физической нагрузки работающие ткани оказываются не в лучшем положении, зато по-прежнему постоянство артериального давления гарантирует сохранение кровоснабжения жизненно необходимых органов — ЦНС, сердца.

Организм попадает в экстремальные холододовые условия. Мерзнут руки и ноги — но по-прежнему поддержи-

вается жизненно важное постоянство температуры внутренних органов.

Гомеостаз — широкое и многогранное понятие. Кибернетика наряду с физиологией может еще многое понять и разъяснить в гомеостатических реакциях организма. Поэтому современная теория управления при анализе процессов в живых системах большое внимание уделяет и их гомеостатическим свойствам.

В терминах теории управления гомеостаз означает, что часть переменных внутренней среды — уровней x_i — в определенных условиях и в определенном диапазоне

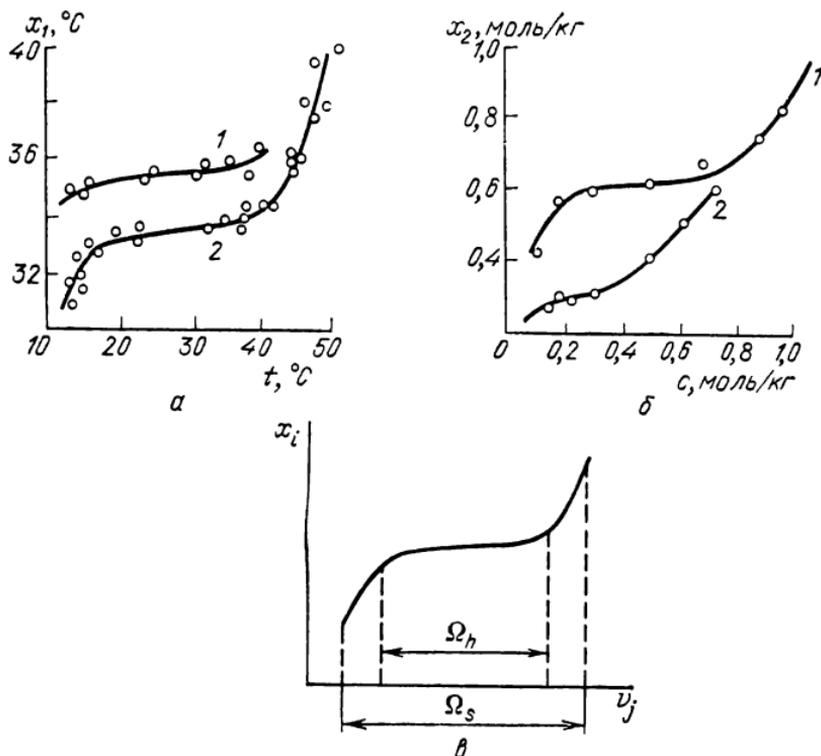


Рис. 35. Гомеостатическая кривая:

а) температура тела американского опоссума при различных температурах окружающей среды: 1) ночь, 2) — день (животное ведет ночной образ жизни, и ночью температура тела выше); б) осмотическая концентрация внутренних жидкостей моллюска в воде с разной концентрацией солей: 1) — морской моллюск, 2) — речной. Ясно, что морской моллюск лучше переносит пребывание в «соленой» воде; а) теоретическая зависимость «Гомеостатируемой» переменной внутренней среды; Ω_h —область гомеостаза, Ω_s —область стационарности.

активности инвариантны к возмущениям (или малочувствительны к их действию). Часто при формальном рассмотрении гомеостаза ограничиваются рассмотрением стационарных состояний. Именно для таких состояний строятся так называемые гомеостатические кривые — зависимости

переменных внутренней среды в организме от переменных внешней среды.

Два примера таких кривых показаны на рис. 35. Гомеостатические кривые имеют характерную форму — с плато посередине и крутыми участками по краям. Это легко понять: гомеостаз обеспечивается работой активных механизмов, исчерпание их ресурсов приводит к потере свойств гомеостаза. Область, где активные механизмы эффективны, дает плато; выход за пределы этой области приводит к тому, что соответствующая переменная внутренней среды перестает «гомеостатироваться».

Из кривых на рис. 35 видно, что при выходе за пределы плато жизнедеятельность продолжается, хотя гомеостатические показатели нарушены. Это лишний раз свидетельствует, что гомеостаз важен для организма не сам по себе, а скорее является фактором «удобства» протекания жизненных процессов. Конечно, выход за пределы плато для любого организма — чрезвычайное обстоятельство. Поэтому для совокупности условий внешней среды, в которых жизнь продолжается, но возможна потеря гомеостаза, используется специальное понятие — экстремальные условия.

В стационарных состояниях потоки расхода и прихода веществ уравновешены, и переменные x_i перестают меняться во времени. Обозначим через V_j стационарные значения внешних переменных, v_j , а через X_i — соответствующие стационарные значения уровней вещества в компартментах системы. Степень зависимости X_i от V_j удобно оценивать по величине производной (точнее — по абсолютному значению):

$$\sigma_{ij} = \left| \frac{\partial X_i}{\partial V_j} \right|. \quad (4.1)$$

Если зависимость $\sigma_{ij}(V_j)$ имеет характерный вид гомеостатической кривой (рис. 35, *в*), то можно говорить, что система обладает гомеостазом переменной x_i в отношении возмущения v_j . Формально это означает, что в некоторой области изменения v_j , обозначенной Ω_h , значение σ_{ij} много меньше, чем вне этой области:

$$\sigma_{ij} \ll \sigma_{ij}^0, \quad (4.2)$$

где σ_{ij}^0 — некоторое «характерное» значение этой величины вне области гомеостаза. Если, например, величины x_i и v_j измеряются в одних и тех же величинах, как на рис. 35, *а* и *б*, то $\sigma_{ij}^0 = 1$.

Выше было отмечено, что гомеостаз в организме важен прежде всего как механизм эффективного обеспечения жизненных потребностей. Действительно, жизненные процессы в организме — это процессы в его клетках. Регуляторные возможности клеточных механизмов управления, снабжающих живые клетки необходимыми веществ-

вами и энергией, не очень велики в том смысле, что они осуществляются в основном за счет пассивных регуляций. А «внешней средой», в которой живет клетка организма, и является внутренняя среда организма. Поддержание постоянства внутренней среды организма — это сужение диапазона условий, в которых должны справиться со своими обязанностями «слабые» регуляторные механизмы клеток. Постоянство внутренней среды организма в прямом смысле слова облегчает жизнь его клеток.

Постоянны условия во внутренней среде организма — достоянен и приток веществ в клетку, автоматически поддерживаются все нужные скорости биохимических реакций.

Чаще всего о гомеостазе говорят как о факторе, позволяющем клеткам организма не чувствовать изменений во внешней, окружающей организм среде. Но еще более важным свойством гомеостаза является его способность оградить клетки от возмущений собственных, возникающих в самом организме, в его внутренней среде. Прежде всего именно благодаря гомеостатическим механизмам клетки в организме могут работать с максимально допустимыми их структурой нагрузками, с наибольшими скоростями — гомеостатические механизмы демпфируют метаболические последствия работы каждой из клеток (выброс конечных продуктов, выделение тепла), которые представляют собой одну из самых важных форм локальных внутренних возмущений.

Способность организма гомеостатически регулировать свою внутреннюю среду позволяет ему справляться и с другими «внутренними» возмущениями — последствиями проникновения микроорганизмов, чужеродных биологически активных агентов, продуктов отмирания собственных клеток. Но еще раз подчеркнем: главное — это способность ликвидировать локальные последствия напряженной работы собственных структур. Так, по подсчетам К. П. Иванова, мощность каждой нервной клетки в организме достигает 0,123 Вт/г. Это очень много: если бы не было механизмов температурного гомеостаза, такая интенсивно работающая клетка погибла бы через 5—6 минут вместе со своими соседями.

Именно поэтому организмы высших животных, имеющие сложно организованные структуры внутренних органов и особенно нервных тканей, приобрели и содержат «дорогостоящие» гомеостатические механизмы. поддержа-

ние постоянства температуры тела — гомеотермия — поистине дорогое удовольствие для организма.

На ранних стадиях распространения кибернетических представлений единственной моделью гомеостаза была отрицательная обратная связь по рассогласованию. Потом стало ясно, что хотя модель с уставкой довольно хорошо описывает явление постоянства внутренней среды, она не является ни единственной, ни наилучшей. Мы не будем здесь задерживаться на критике этой ранней модели гомеостаза, отослав читателя к другой монографии автора *).

Для того чтобы получить малую чувствительность каких-то переменных в организме к возмущающим факторам, можно воспользоваться самыми разными способами. Именно так и обстоит дело в организмах. Далеко не все механизмы обеспечения гомеостатических свойств укладываются в жесткую схему отрицательной обратной связи с отклонением от уставки.

Поэтому рассмотрим кратко некоторые возможности такого взаимодействия переменных, которое снижает чувствительность некоторых уровней x_i к действию возмущений (переменных v_j) и тем самым способствует получению свойств инвариантности, постоянства внутренней среды в организме.

Самым простым способом такого взаимодействия является организация нескольких параллельных каналов достижения цели, работающих одновременно. Так, процесс удовлетворения потребностей клеток в энергии идет сразу по нескольким параллельным ветвям (две из них в свое время были показаны на рис. 5). При достижении одного и того же суммарного результата изменения в каждом из параллельных каналов могут быть существенно меньше, если таких каналов много. Это похоже на то, как при весеннем паводке подъем воды в верховьях и в среднем течении велик (один канал), а в низовьях, где река разделяется на множество рукавов, подъема воды при разливе почти не видно **).

Типичным примером такого разделения единого потока на «рукава» является один из механизмов терморегуляции у кроликов: при повышении температуры тела кровь направляется в расширившиеся сосуды ушей, и поверх-

*) Новосельцев В. Н. Теория управления и биосистемы: Анализ сохранительных свойств. — М.: Наука, 1978.

***) Любопытно, что это сравнение пришло в голову не биологу и не кибернетика, а географу (А. Д. Арманду)!

ность теплоотдачи резко возрастает, что способствует поддержанию постоянства температуры крови.

Пусть теплопродукция в организме кролика равна w (ведущий процесс), а теплоотдача (ведомый процесс) идет пассивным путем. Темп теплопотерь y тем больше, чем обширнее эффективная поверхность теплоотдачи S . Тогда

$$y = kS(v - x). \quad (4.3)$$

Если (без учета площади ушей) эффективная поверхность теплоотдачи у кролика равна S_1 , то при выполнении условия стационарности (при $y = w$) температура тела зависит от среды так:

$$x = v + \frac{w}{kS_1}. \quad (4.4)$$

Эта зависимость (характерная для животных без терморегуляции — пойкилотермных) показана на рис. 36, а.

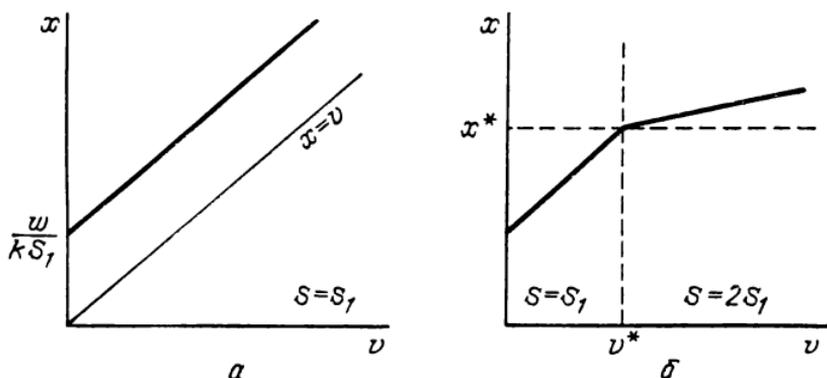


Рис. 36. Простой механизм улучшения гомеостаза у животных:

а) зависимость, характерная для отсутствия механизмов управления теплоотдачей, б) при повышении температуры среды до значения $v = v^*$ площадь теплоотдачи увеличивается вдвое: на графике появляется «гомеостатическое плато»

Если теперь при каком-то значении x (например, при $x = x^*$) включить дополнительную площадь теплоотдачи, то при $S_2 > S_1$ наклон линии $x(v)$ станет меньше. На рис. 36, б показано, как выглядит такая кривая при $S_2 = 2S_1$: гомеостатические свойства системы явно улучшились.

Обычно в регуляции важнейших переменных организма участвует не два, а существенно большее число механизмов управления. Тогда картина описания гомеостатических свойств усложняется еще и за счет того, что разные механизмы включаются поочередно, вытесняя друг друга. Для примера на рис. 37 приведены такие характеристики для механизмов, участвующих в регуляции кровообращения (конкретно — в регуляции артериального давления).

В случае многих переменных обеспечение гомеостаза достигается тем, что мощные централизованные транспортные механизмы постоянно «подзаряжают» множество пассивных механизмов, каждый из которых эффективно поддерживает постоянство «своей» переменной. Именно по такой схеме свой вклад в поддержание гомеостаза вносит система кровообращения. Она активно снабжает кровью все «уголки» организма, как бы приближая их к богатой кислородом внешней среде. Таким образом напряжение

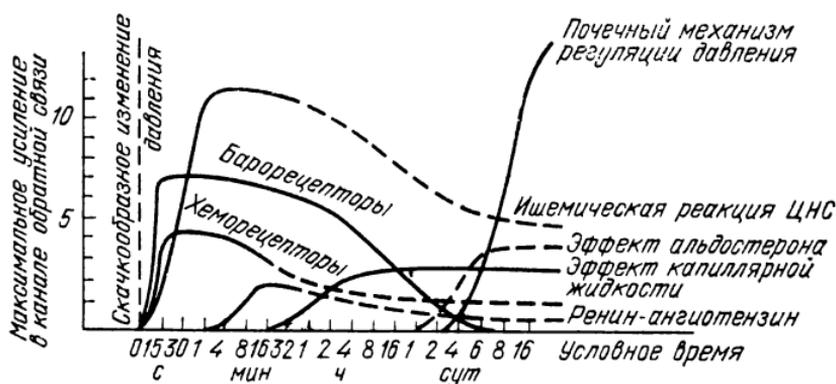


Рис. 37. Механизмы, участвующие в регуляции кровообращения. Изменение артериального давления вследствие каких-либо нарушений в организме вызывает включение целого ряда механизмов управления, «вытесняющих» друг друга по истечении характерного для каждого из них времени действия

кислорода по всей внутренней среде поддерживается постоянным. Кислород пассивно связывается в альвеолах с гемоглобином, а затем активно переносится в зоны с пониженной концентрацией, где кислород (снова пассивным путем) диссоциирует и поступает в организменную среду, обогащая ее.

Трудно, однако, утверждать, что регуляция кровообращения имеет единственную цель — обеспечить постоянство уровня кислорода в компартментах внутренней среды. Этому противоречит хотя бы то, что обычно далеко не весь кислород «отбирается» тканями из крови, так что кислорода в крови всегда «с избытком». Только пассивные механизмы связывания кислорода с гемоглобином и последующей диссоциации оксигемоглобина, дополняя активное кровообращение, обеспечивают кислородный гомеостаз органов и тканей организма.

Кровь переносит в организме еще множество веществ и, кроме того, тепло, участвуя тем самым в поддержании

гомеостаза по целому ряду других переменных внутренней среды. И эти факты трудно укладываются в схему «отрицательной обратной связи по уставке» — скорее, это совокупность прямых связей плюс какие-то параметрические обратные связи. Ведь здесь регулируется вовсе не уровень кислорода в каких-либо тканях (как, впрочем и не уровень углекислоты, уровень глюкозы или температура какого-то органа).

По-видимому, такие схемы управления с участием кровообращения могут быть изображены примерно так, как показано на рис. 38. Ведомый физиологический источник A управляется активным механизмом u_1 , так что возможности пассивной регуляции (пунктир z) достаточно для удовлетворения потребности w в ведущем стоке

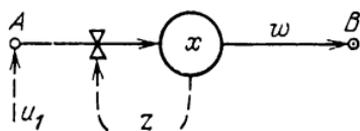


Рис. 38. Возможная схема взаимодействия активных и пассивных механизмов в системе.

Активное управление u_1 действует «грубо»: оно изменяет интенсивность источника A лишь до тех пор, пока возможностей пассивного механизма (пунктир от компартамента x) станет достаточно для поддержания баланса между расходом и приходом вещества

B . Ясно, что сигнал u_1 может быть даже никак не связан с уровнем x , достаточно только, чтобы источник A потенциально был мощнее стока w .

Наконец, рассмотрим еще одну — уже третью — возможность возникновения относительного постоянства переменных внутренней среды. Если активные механизмы имеют «пороговые» схемы включения, т. е. управляющие сигналы возникают при превышении сигналом пороговых уровней в одну сторону или при снижении их ниже какого-то другого уровня, то переменная x будет иметь тенденцию к постоянству между двумя пороговыми уровнями.

По такому принципу работает, в частности, механизм регуляции уровня глюкозы крови (см. выше рис. 28 на стр. 87). Схемы регулирования такого рода можно интерпретировать и как схемы управления «с уставками», если два порога, определяющие включение активных механизмов в обе стороны, близки друг другу.

Подводя итоги сказанному, еще раз подчеркнем, что гомеостатические качества организма возникают как результат сложного взаимодействия между различными переменными, различными механизмами управления. Приятие во внимание этих взаимодействий и позволяет, в частности, получить характерную форму гомеостатических кривых (см. выше рис. 35).

4.2. Гомеостатическая кривая

Общая схема, лежащая в основе явлений гомеостаза, которая приводит к платообразной кривой, может быть кратко описана следующим образом.

В обеспечении текущих потребностей организма принимают участие два типа механизмов, активные и пассивные. При любом изменении потребностей или при любом разбалансе «спроса и предложения» в организме в дело вступают одновременно и активные, и пассивные каналы управления, автоматически подстраиваясь под меняющиеся режимы работы.

Но в нормальных ситуациях активные механизмы реагируют на возникшие изменения настолько быстро, а их реакции настолько эффективны, что пассивные механизмы просто не успевают вступить в игру. Поэтому переменные состояния, которые в пассивных механизмах играют роль управляющих сигналов, почти не меняются, оставаясь практически постоянными. Тем самым активные механизмы сохраняют постоянство внутренней среды — гомеостаз.

Если же в силу тех или иных причин эффективность активной регуляции падает и регуляторные способности этого типа оказываются исчерпанными, задача удовлетворения потребностей перекладывается (конечно, тоже

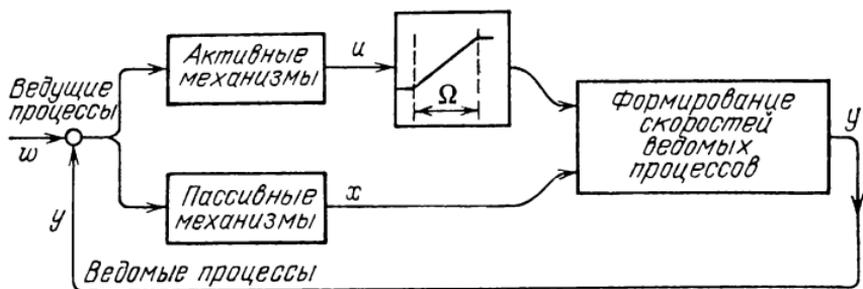


Рис. 39. Общая схема взаимодействия активных и пассивных механизмов в организме.

Раскогласование скоростей ведущих и ведомых процессов «включает» одновременно и пассивные, и активные механизмы управления скоростями ведомых процессов. Но активные механизмы реагируют быстрее, так что переменные x , выполняющие функции пассивных регуляторов, просто «не успевают» изменить свои значения, Гомеостаз, таким образом, сохраняется во всем диапазоне линейности Ω

автоматически) на пассивные механизмы. Теперь любое изменение в организме, вызванное сдвигами в его внешнем окружении или внутренними причинами, потребует соответствующего изменения переменных состояния —

постоянство внутренней среды нарушается ради удовлетворения потребностей.

Поскольку существует некоторая область «нормальных условий», в которой обычно и живет организм, то именно в ней активные механизмы и сохраняют работоспособность. Эта область и оказывается областью плато на гомеостатической кривой. Выход за ее пределы означает, что жизнь продолжается, но уже при нарушаемом (и чем далее — тем более) гомеостазе.

Эта общая идея иллюстрируется схемой рис. 39. Потребности системы формируются ведущими стоками (скорость потребления w), а физиологические ведомые процессы протекают со скоростью y , которая зависит от пассивных механизмов (переменная x , определяющая состояние внутренней среды, оказывает и регулирующее действие на поток y). Но в еще большей степени y определяется активными механизмами управления (переменная u).

Диапазон изменений в условиях функционирования, для которого сохраняется эффективность механизма u , охарактеризован как область адекватных реакций Ω .

Рассмотрим теперь, как — в такой чрезвычайно упрощенной трактовке — поддерживается и как нарушается гомеостаз в системе управления транспортом кислорода.

Если рассуждать очень грубо, то для кислородного транспорта можно указать именно два канала управления, как представлено на рис. 39. Пассивный механизм — увеличение отбора кислорода из единицы объема крови при снижении содержания кислорода в тканях:

$$y = k(v - x), \quad (4.5)$$

где y — скорость поступления кислорода (ведомый поток), v — концентрация кислорода во вдыхаемом воздухе, а x — во внутренней среде, тканях. Как всегда, k — некоторый коэффициент пропорциональности. Если надо увеличить приток кислорода y , приходится снижать x , т. е. нарушать гомеостаз.

Но кроме пассивного механизма (4.5) в системе есть множество активных механизмов — ради упрощения представим их все одним каналом: возрастанием кровотока через ткань в ответ на снижение содержания кислорода в ней. Если такое снижение превысит допустимое (величина x спустится ниже порогового значения \bar{x}), то кровоток резко возрастет:

$$Q = Q_0 + K_0 (\bar{x} - x), \quad (4.6)$$

где K_0 — коэффициент, определяющий эффективность активного управления.

Кровоток в организме ни при каких условиях не должен уменьшаться ниже некоторого предельного значения — такое минимальное количество крови обозначим через Q_m . В то же время из-за ограниченности пропускной способности сосудов, мощности сердца

и тому подобных причин кровотока не может и превысить некоторого максимального значения, обозначенного здесь как Q_M . Тогда соотношение (4.6) можно дополнить ограничением

$$K_0 = \begin{cases} 0, & Q \geq Q_M, \\ K, & Q_m > Q > Q_M, \\ 0, & Q \leq Q_m. \end{cases} \quad (4.7)$$

Если теперь объединить уравнения (4.5) и (4.6), то можно написать:

$$y = K_0 k (\bar{x} - x) (v - x) \quad (4.8)$$

при ограничении (4.7), разумеется.

Потребности в кислороде удовлетворяются, если в системе на рис. 39 возникнет стационарный режим, т. е. $y = w$. Тогда переменная x перестает меняться во времени и остается на уровне, который обозначим как x^S . Следовательно,

$$w = K_0 k (\bar{x} - x^S)(v - x^S). \quad (4.9)$$

Пусть для определенности кровотока Q (л/мин) ограничен пределами $Q_m = 4,0$, $Q_M = 20,0$, а $Q_0 = 5,0$. Далее, положим $v = 100,0$ мм рт. ст., $\bar{x} = 52,5$ мм рт. ст., $K = 2,0$, $k = 1,0$. Потребность в кислороде w равна для условий основного обмена 250,0 мл/мин.

Легко видеть, что для ориентировки мы взяли цифры, «правдоподобно» описывающие кислородный режим для целого организма.

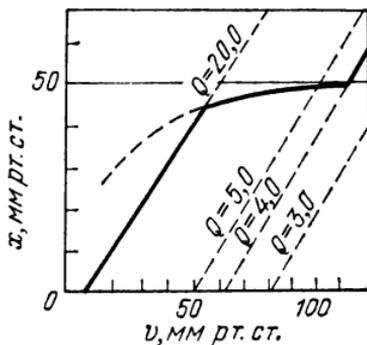


Рис. 40. Пример: возникновение гомеостатической кривой в модели кислородного транспорта.

Возрастание кровотока через ткани органа (активный механизм) приводит к тому, что процессы диффузии (пассивный механизм) обеспечивают практически постоянный уровень кислорода x^S в тканях при удовлетворении их потребностей в кислороде

При этих цифрах количество кислорода, забираемое из единицы объема крови (из 1 л), оказывается равным 50 мл/л.

Как выглядит решение уравнения (4.9), видно из рис. 40. Основная кривая на рисунке — нанесенная пунктиром и сплошной линией нелинейная зависимость x^S от v , — получается при постоянном значении $K = K_0$. Такая зависимость напряжения кислорода во внутренней среде организма — в тканях — получилась бы, если бы величина кровотока не ограничивалась возможностями сердечно-сосудистой системы.

Реально же наличие ограничений дает ограниченность гомеостатических ресурсов (две прямые пунктирные линии — слева для $Q = 20,0$ и справа для $Q = 4,0$). Каждая из них добавляет

к пологому участку исходной кривой более крутые наклонные участки, формируя тем самым окончательный облик гомеостатической зависимости. Сама гомеостатическая кривая выделена на рисунке жирной линией.

Пологий отрезок в середине кривой (в интервале напряжений v от 55 до 110 мм рт. ст.) отвечает условиям работы активных механизмов; при их отключении (когда срабатывают ограничения (4.7)) происходит переход на крутые боковые части кривой.

В теории автоматического регулирования говорят, что для получения большой эффективности механизмов управления надо иметь большие коэффициенты усиления. Обычно в живых системах активные механизмы имеют как раз такие большие коэффициенты — существенно бóльшие, чем коэффициенты усиления пассивных механизмов. Это означает, что должно выполняться соотношение

$$K \gg k. \quad (4.10)$$

Конечно, в нашем примере активные механизмы много эффективнее пассивных. Соотношение $K = 2k$ — следствие просто «неадекватного» выбора масштабов представления переменных. Это — обычное дело в биосистемах. Так что будем считать, что соотношение $K \gg k$ выполнено (ведь, в самом деле, достаточно начать измерять кровотоки не в л/мин, а в мл/мин, и в наших формулах величина K будет уже не 2, а 200, как нам и хотелось).

В течение длительного времени специалисты по анализу управления в физиологических системах обсуждают вопрос о том, насколько правомерно считать, что переменная состояния — конечно, такая, для которой наблюдается хороший гомеостаз — регулируется в соответствии с классической схемой стабилизации (регулирование по установке — рис. 25 на стр. 80).

На примере рассмотренной только что системы мы можем дать анализ возникающей ситуации и прокомментировать возможные варианты решения задачи. Обратимся для этого снова к рис. 40.

Область плато лежит несколько ниже границы 50 мм рт. ст., т. е. практически совпадает с пороговым значением включения активных механизмов в уравнении (4.6). Значит, если представить дело так, что порог \bar{x} выполняет роль уставки, мы не ошибемся сколь-нибудь грубо. Действительно, в этом случае сигнал \bar{x} будет входом системы, x — ее выходом (как и было на рис. 25), и в стационарных режимах выходной сигнал будет практически равен \bar{x} .

В чем же разница между тем подходом, который мы излагаем на страницах этой книги, и классическим? Разница — в точке зрения исследователя. Одна и та же система может быть изображена и как система управления, цель которой — удовлетворение потребностей (в ней постоянно внутренней среды — побочный результат,

служащий достижению основной цели), и как система регулирования уровня x — т. е. как система, работающая исключительно для поддержания постоянства внутренней среды.

Мы перерисуем схему управления транспортом кислорода в двух возможных вариантах. Сначала (рис. 41, а) — как систему удовлетворения потребностей. В таком виде она представляет собой частный случай схемы на рис. 39. Схема имеет два канала управления — пассивный (сверху) и активный (снизу) — с нелинейным пороговым механизмом включения.

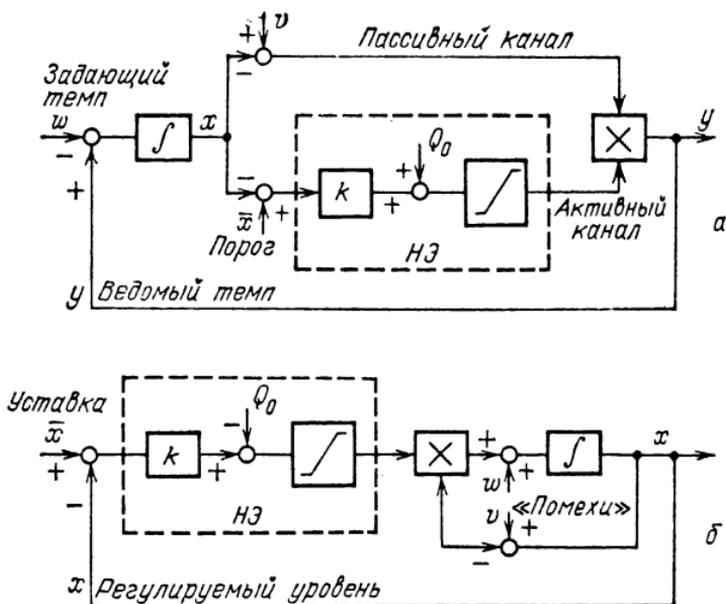


Рис. 41. Два варианта представления схемы управления транспортом кислорода:

а) система управления, цель которой — удовлетворение потребностей в кислороде (НЭ — нелинейный элемент), б) система стабилизации, цель которой — поддержание уровня кислорода в системе, который должен быть равен заданной установке

А на рис. 41, б эта же схема перерисована как одноконтурная система стабилизации величины x . Наличие помех v и w — а именно так должны сейчас трактоваться эти переменные — не позволяет системе до конца выполнить свою цель: точное равенство x и \bar{x} не достигается (ср. рис. 40).

Таким образом, представление системы управления транспортом кислорода в виде системы стабилизации вполне оправдано как некоторый этап исследований. Приходится только допустить, что эта система не вполне справляется со своей целью из-за действия возмущений. Что касается подхода к системе как к средству удовлетворения потребностей, то от такого небольшого недостатка он свободен.

4.3. Стресс

Повседневная жизнь заставляет человека активно реагировать на постоянно меняющиеся ситуации. Эти ответные реакции, несмотря на все их внешнее разнообразие, состоят из вполне определенного количества «элементарных» поведенческих актов. Развитие человека от первобытного к современному постепенно увеличивало число элементарных действий, из которых строится жизнь и деятельность человека, делало их более дифференцированными и приспособленными к возникающим ситуациям.

С усложнением условий жизни и производственной деятельности, когда возрастает роль и цена решений, ответные реакции делаются все более «специфичными» — каждой все более дифференцированной жизненной ситуации соответствует все более строго определенная ответная реакция. На производстве, например, вершиной подобной специализации стала конвейерная технология. Аналогичная ситуация сложилась в военной сфере, в непродуцированной деятельности человека, в спорте и т. д.*).

Но какие бы эффекторные механизмы ни включались организмом для выполнения необходимых по ходу дела специфических действий и операций — мышечная работа, речевое общение, мыслительные процессы с последующими сложными формами поведения, — для их осуществления всегда требуется повышение энергетических расходов. Поэтому любые специфические реакции всегда подкрепляются в организме одним и тем же генетически детерминированным комплексом реакций, носящим характер подготовки к интенсивным действиям эффекторной части. Такую неспецифическую реакцию организма (неспецифическую — т. е. одинаковую для всех видов внешних воздействий) согласно классической концепции известного австрийского физиолога Ганса Селье называют стрессом.

Стресс — это динамический процесс последовательного развития единообразных изменений в метаболической системе организма в ответ на действие любых существенных для целостности организма внешних факторов. По мнению Г. Селье, первая стадия стрессорной реак-

*) Очень интересно эти вопросы рассмотрены в книге немецкого психолога Ф. Кликса «Пробуждающееся мышление», переведенной на русский язык (Киев: Вища школа, 1985).

дии — стадия тревоги — возникает даже при таких обычных и повседневных событиях, как переход большой улицы, сквозняк в квартире, сильное чувство радости и т. д.

Стадия тревоги при непрерывно продолжающихся стрессорных воздействиях переходит во вторую — так называемую стадию резистентности, которая, в свою очередь, может закончиться стадией истощения, если действие слишком сильных стрессорных факторов не прекратится и далее.

Рассмотрим последовательные стадии развития стресса немного подробнее, обращая особое внимание на особенности управления этим процессом.

Поскольку при стрессе прежде всего возрастает (или должна возрасти) скорость расходования энергии из-за двигательных реакций, сразу же увеличивается потребность организма в АТФ. Поэтому суть процессов при стрессе состоит в интенсификации метаболизма для увеличения производства энергии. Начинаются эти процессы (по сигналу из ЦНС о наступлении стрессорной ситуации) с увеличения скорости синтеза одного из важнейших гормонов в организме — адренкортикостероидного гормона (АКТГ). АКТГ стимулирует (увеличивает скорость протекания) ряд химических реакций, итогом которых и является ускорение процессов синтеза энергии.

Схему производства энергии в организме мы уже рассматривали (см. рис. 8 на с. 43). До начала стресса в схеме работает практически только аэробный процесс выработки энергии (правая цепочка реакций на рисунке). При стрессе увеличивается и скорость синтеза энергии по «резервному» анаэробному пути (слева). Запускаются и процессы превращения гликогена в глюкозу. А это значит, что в организме одновременно растет количество пирувата — дополнительного субстрата для аэробного синтеза АТФ.

Чтобы утилизировать возросший приток топлива, надо усилить транспорт окислителя, т. е. интенсифицировать работу физиологических источников кислорода. Поэтому деятельность систем дыхания и кровообращения усиливается. Такова в общих чертах первая фаза стрессорной реакции в организме.

Подведем итог рассмотрению этой стадии, отметив следующие особенности, которые интересны для специалиста по управлению.

1. На стадии тревоги потребности организма в АТФ удовлетворяются полностью. Однако это удовлетворение достигнуто за счет включения энергоемких (активных) механизмов физиологической регуляции.

2. Переходные процессы в метаболической системе, начавшиеся под действием стрессорного фактора, на этой

стадии не заканчиваются. Хотя потребность в энергии удовлетворена, стационарное неравновесие в системе не достигнуто: скорость синтеза АТФ в митохондриях меньше скорости его расхода, так что общий запас АТФ в организме падает. Происходит уменьшение запасов гликогена и накопление пирувата. Возникшие метаболические сдвиги приводят к тому, что скорость распада некоторых белков превышает скорость их синтеза; их наличное количество в структурах организма поэтому уменьшается.

В результате, если действие стрессора не прекратится (или не ослабнет в достаточной степени), продолжающийся переходный процесс вступает в стадию резистентности. Эта стадия достигается не очень скоро — характерное время в зависимости от интенсивности действующих стрессорных факторов может составить, например, недели или месяцы.

Суть стадии резистентности — замещение краткосрочных (активных) механизмов физиологической системы долговременными (пассивными) биохимическими механизмами, чтобы потребности в энергии по-прежнему удовлетворялись, но более дешевым способом.

Это происходит так. Дефицит АТФ активизирует работу генетического аппарата клеток: в клетках работающих органов увеличивается объем и масса митохондрий. Мощность системы аэробного синтеза энергии возрастает, и синтез энергии по менее выгодному анаэробному пути сокращается. Теперь потребность в АТФ снова удовлетворяется практически лишь за счет аэробного пути, как было до начала стресса. Одновременно происходит усиление пассивных механизмов извлечения кислорода из крови, так что становится излишним увеличение кровотока и дыхания. Сердечно-сосудистая система возвращается к исходному (дострессовому) режиму работы.

Достигается уравнивание темпов расхода и синтеза АТФ. Уровень гликогена (при повышении калорийности питания) восстанавливается, но скорости его расхода и синтеза остаются увеличенными.

Однако переходный процесс при непрекращающемся действии стрессора также идет дальше. В качестве топлива, в частности, начинают использоваться жиры (липиды), и их запас в организме падает. Генетический аппарат клеток продолжает забирать из внутриклеточной среды многие белки, скорость синтеза которых по-прежнему отстает от скоростей их расходования; в организме возникает их дефицит.

Если действие стрессорных факторов не очень продолжительно и интенсивно, переходный процесс может закончиться на стадии резистентности. Но может наступить и третья стадия стресса — истощение. Причина ее — нехватка материала для замены выходящих из строя клеточных структур. Поддержание возникшего на второй

стадии стресса увеличенного производства энергии в митохондриях, синтеза АКТГ и других веществ в клетках коры надпочечников, некоторых других компонентов требует большого расхода белков. А скорость их синтеза в метаболической системе, как уже говорилось, отстает от этих вновь возникших потребностей.

Структура тех клеток, которые не получают замены своим выходящим из строя внутриклеточным элементам, меняется. Изменившись, клетки теряют способность нормально функционировать. В митохондриях снижается скорость синтеза АТФ, увеличивается разбаланс скоростей синтеза и расходования нужных белков, которые идут на восстановление работающих структур организма. Возникает патологическое состояние.

В принципе переходный процесс в организме, вызванный стрессом, может остановиться и на этой стадии, если действие стрессора ослабить или прекратить. Но если ранние стадии допускают возвращение организма к исходному состоянию, то на стадии истощения даже снятие стресса оставляет необратимые «следы» в структуре метаболической системы в виде измененных клеток.

Необходимо сказать еще несколько слов о том, как организм защищается от последствий стресса с помощью механизма утомления.

Первые же серьезные нарушения в удовлетворении потребностей организма в веществах приводят к изменениям во внутренней среде — существенному нарушению гомеостаза. Это вызывает сдвиги в работе наиболее чувствительных структур организма — прежде всего в нервной системе. Сдвиги эти, психически воспринимаемые человеком как утомление, заставляют его отказаться от дальнейших контактов со стрессором (прекратить непосильную работу, выйти из опасной зоны, снизить интенсивность выполняемых операций и т. д.). Тем самым организм выбирает для себя по возможности адекватные условия окружения, что способствует сохранению его нормальной жизнедеятельности.

4.4. Адаптация

В физиологии под адаптацией понимается любое приспособление организмов к условиям их обитания, направленное на поддержание их функционального состояния и гомеостаза. Адаптация организмов к условиям среды происходит на разных уровнях. Прежде всего, организмы

приспосабливаются к условиям окружения в ходе эволюции, так что их «специализация» закрепляется генетически. Поэтому каждый организм появляется на свет с определенными структурными и функциональными свойствами, позволяющими ему приспособиться к ожидающим его жизненным ситуациям.

Мало того, генетически предопределен и тот круг изменений в окружающей среде, к которым организм сможет приспособиться в своей жизни. Область внешних условий, в которых организм может нормально функционировать, определяется возможностями его регуляторных механизмов: чем больше эти резервы, тем шире спектр допустимых изменений. Мы не будем касаться здесь эволюционных аспектов адаптации, ограничившись анализом того, как идет адаптация конкретного организма с уже закрепленным генетически регуляторным аппаратом.

Говоря об адаптации отдельного организма к изменившимся условиям среды, обычно различают две стороны: собственно процесс адаптации и то состояние (адаптированность), которое возникает после его завершения. Рассмотренный в предыдущем разделе стресс и его стадийность — это тоже процесс адаптации организма к неблагоприятным факторам среды, который иногда может закончиться состоянием адаптированности, а иногда и нет.

Процесс адаптации можно описывать как процесс в компартментальной модели с источниками и стоками веществ и энергии. В физиологии обычно считается, что в состоянии адаптированности сохраняется обычный или устанавливается повышенный уровень жизнедеятельности, и, кроме того, сохраняется гомеостаз на всех структурно-системных уровнях организма. В наших терминах это означает, что независимые темпы w по окончании процесса адаптации возвращаются почти к исходным величинам, а переменные состояния x практически остаются неизменными.

Обычно считается, что адаптация является полной, если все системы организма сохраняют постоянство своих переменных, а адаптационные возможности системы не уменьшаются. При неполной адаптации в некоторых системах организма происходят уже существенные изменения значений переменных x , но общие показатели жизнедеятельности организма сохраняются, хотя и при неполных адаптационных возможностях. Крайняя степень неполной адаптации иногда называется кажущейся адаптацией.

Характерной чертой процесса адаптации является временное — на период переходного процесса — увеличение темпов метаболизма, т. е. потребления кислорода, других веществ. Так, у рыб и беспозвоночных животных при переходе из водной среды с одной концентрацией солей в среду с другой концентрацией потребление кислорода в период адаптации может возрасти в 8—10 раз.

Посмотрим, как можно объяснить такое возрастание темпов потребления веществ в процессе адаптации. Вспомним, что в поддержании процессов снабжения организма веществами участвуют два типа управляющих механизмов — пассивные и активные

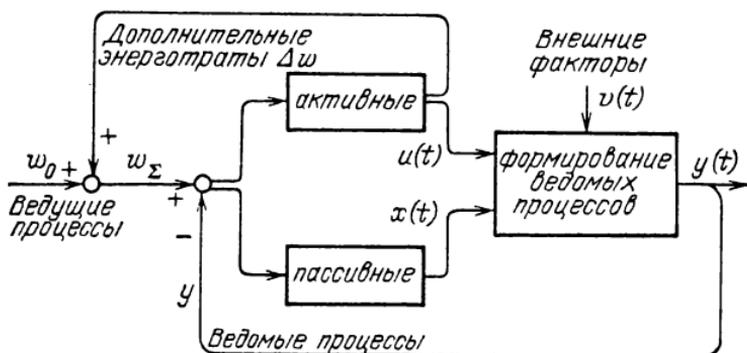


Рис. 42. Возрастание темпов расходования веществ и энергии при адаптации системы к изменениям среды.

При адаптации включаются активные механизмы, требующие для своей работы дополнительных энергозатрат; этот дополнительный расход энергии и увеличивает скорости протекания первичных процессов в системе

(рис. 39 на с. 121). Перерисуем эту схему чуть более подробно, обозначив, какое действие производит на процессы в системе изменение условий внешней среды (рис. 42). Изменение факторов среды $v(t)$ (при неизменном вначале характере работы активных $u(t)$ и пассивных $x(t)$ механизмов управления) приводит к изменению темпов ведомых процессов $y(t)$. Парушается баланс веществ — приток и расход их теперь не равны между собой. Пусть изменение среды носит «неблагоприятный» характер — тогда в организме возникает дефицит веществ.

Читатель может сам сопоставить описание происходящих в компартментальной модели изменений с тем, что говорилось в предыдущем разделе о стрессе.

Итак, на возникший разбаланс прежде всего реагируют активные механизмы u — ведь они мобильнее и мощнее пассивных. Включившись, они увеличивают свой вклад в процессы транспорта вплоть до достижения равновесия между ведомыми y и ведущими w_0 потоками веществ.

Но более интенсивное функционирование активных механизмов требует увеличения расхода метаболической энергии, так что текущие потребности организма возрастают на величину Δw . В это-

ге потребности организма в энергии возрастают до величины w_{Σ} , которая складывается из «старых» потребностей плюс возросшие расходы на функционирование активных механизмов.

Процессы в системе на этом, однако, не заканчиваются. В силу внутренних связей между переменными x_i продолжается их более медленное, по сравнению с реакциями $u(t)$, изменение и постепенно увеличивается вклад пассивных механизмов регуляции в процесс удовлетворения текущих потребностей. Величина Δw падает параллельно с уменьшением доли активных механизмов в этом процессе. Текущие потребности w_{Σ} постепенно уменьшаются почти до исходного значения w_0 . Процесс адаптации закончен.

Читатель вправе спросить: а как же гомеостаз? Ведь если активные механизмы переложили нагрузку с себя на пассивные, то соответствующие пассивные каналы отреагировали изменением своих переменных состояния, т. е. гомеостаз системы нарушен.

Ответ здесь довольно прост. Во-первых, действительно, ряд переменных состояния изменился, и их гомеостатические качества нарушены. Но это как раз те переменные, постоянство которых организму «не нужно», к постоянству которых он может быть попросту «равнодушен». А во-вторых, изменение гомеостаза «размазывается» по огромному множеству цепей химических реакций в биохимическом комплексе организма, так что во многих случаях сдвиг какой-то конкретной переменной может оказаться несущественным. Мы уже говорили для сравнения о том, что подъем воды в русле реки может быть значительно выше, чем в ее пойме, в низовьях, когда тот же прилив воды разливается по большому числу протоков.

В заключение отметим, что при адаптационных процессах возможны и такие ситуации, когда при изменении условий среды сами потребности w_0 могут резко измениться. Например, при сильном охлаждении организма темпы теплопотерь в окружающую среду резко возрастают, так что организм вынужден поддерживать высокий темп теплопродукции и после окончания переходного процесса.

Бывают случаи, когда условия, к которым должен адаптироваться организм, способствуют не повышению, а снижению потребностей w_0 . Это происходит, например, в условиях невесомости в космосе. Снижение интенсивности работы механизмов и связанное с этим снижение w_0 вряд ли можно считать «благоприятным» для организма космонавта, если иметь в виду необходимость реадaptации после возвращения из космоса на Землю.

4.5. Иерархия

Различные переменные занимают принципиально разное положение в системах организма. Одни из них — управляющие, регулирующие — играют очень важную, но вспомогательную роль с точки зрения жизнедеятельности. Они поддерживают нужные организму уровни управляемых переменных, обеспечивая гомеостаз организма и, тем самым, адекватное протекание основных жизненных процессов.

В свою очередь и управляемые переменные, постоянство которых нужно организму и которое, собственно, и означает гомеостаз, тоже неравнозначны. При ухудшении внешних условий (например, при кровопотерях) кислородный режим мозга поддерживается даже за счет снижения кровотока в почках, мышцах, других тканях. Охлаждение организма в первую очередь затрагивает «периферию» — конечности, поверхностные ткани тела, что способствует сохранению температуры жизненно важных внутренних органов (нервной системы, мозга, почек, сердца).

Неравноценность постоянства значений различных переменных проявляется и еще в одном аспекте. Нарушающееся при действии внешних или внутренних возмущающих факторов равновесие между темпами прихода и расхода восстанавливается для различных переменных с разной скоростью и заканчивается неодновременно. Сначала восстанавливается баланс трат и поступлений непосредственно в «активных зонах» метаболической системы. А там, где имеется запас расходуемых веществ, нарушенное равновесие восстанавливается с опозданием. Еще медленнее восстанавливается баланс веществ там, где происходит синтез веществ для восстановления клеточных структур функционирующих органов. Примеры такого разновременного восстановления можно найти в рассмотренных выше процессах стресса.

Удобной формой суждения об относительной «важности» различных переменных в организме, об их соподчиненности в структуре и функциональной деятельности организма является представление об иерархии.

Иерархией вообще называется расположение частей или элементов системы (целостного объекта) в порядке от высшего к низшему. В теории систем этот термин применяется очень широко для описания роли разных эле-

метов в функционировании объектов, для установления категорий превосходства и подчинения, разного рода приоритетных суждений и т. п. При анализе биосистем понятие иерархической организации применяется в основном при методологическом рассмотрении.

В начале раздела уже указывались несколько форм возможной иерархии переменных в организме. Сразу скажем, что иерархия в организме — понятие не однозначное. Во-первых, иерархия переменных определяется их ролью и местом в организменных системах управления. А поскольку часто цели управления зависят от текущего состояния организма и условий среды, то и иерархическая значимость тех или иных переменных в организме может меняться.

Все же управляемые переменные, целесообразное изменение которых является целью управления, должны считаться иерархически более старшими по отношению к управляющим переменным, изменения которых направлены на поддержание должных значений управляемых величин.

В наших терминах это означает, что иерархически высшую группу переменных образуют переменные типа w (характеризующие потребности организма), а вместе с ними и переменные типа y , характеризующие степень удовлетворения потребностей.

Переменные внутренней среды, определяющие ее гомеостаз, — переменные типа x вместе с регуляторными переменными типа u , описывающими активные механизмы управления, составляют иерархически низшую группу переменных.

Но и в пределах каждой группы однотипные переменные по-разному реагируют на внешние возмущения. Тогда их можно расположить в иерархическом порядке по степени защищенности от возмущений. Можно считать, в частности, что переменные типа уровней — переменные состояния x_i — тем выше в иерархической системе, чем лучше их гомеостатические свойства. Такая трактовка, впрочем, требует разработки количественных методов оценки гомеостаза, к чему мы еще не готовы (соответствующие методы будут рассмотрены ниже).

Что касается переменных типа потоков (w и y), то естественной кажется такая точка зрения. Чем раньше достигается уравнивание w_i соответствующим потоком y_i , тем выше в иерархическом плане расположена пара (w_i, y_i) , тем важнее потребность w_i .

В ходе стрессорных реакций, например, прежде всего обеспечивался баланс энергетических потоков — АТФ. Уравновешивание белкового и липидного обмена наступало позже, а при сильном стрессе такое равновесие вообще могло не наступать.

Итак, нам удалось выявить в организме несколько линий возможной иерархии переменных. Прежде всего, их относительное положение в системе связано с иерархичностью целей управления (цель поддержания адекватности снабжения организма, получения стационарного неравновесия выше, чем необходимость обеспечения гомеостаза), так что соответствующие переменные w и y занимают более высокое положение, чем переменные внутренней среды. Потом уже в пределах каждой из групп просматриваются отношения упорядоченности между различными переменными, одинаково встроенными в структуру организма.

Количественная оценка гомеостатических ресурсов переменных позволит поэтому более тонко судить об иерархии переменных внутренней среды.

Мало того, процессы адаптации, рассмотренные нами в предыдущем разделе, можно иногда трактовать как смену иерархии переменных в условиях изменившихся требований к организму.

4.6. Количественные оценки свойств организма

Рассматривая в предыдущих разделах различные аспекты деятельности целостного организма, мы впервые столкнулись с вопросами количественной оценки его свойств. Это и естественно.

Жизненные процессы в нормальном и здоровом организме так хорошо организованы и скоординированы, что у исследователя возникает впечатление их простоты и полной гармоничности. Поэтому суждений на качественном уровне очень часто хватает для того, чтобы понять их сущность и даже сделать многие практически нужные выводы. По такому пути и шло развитие методов классической физиологии, а затем и медицины. И только усложнение жизни, включение в круг естественных забот человека все более сложных технических и социальных процессов и механизмов изменило ситуацию.

Производственная деятельность, связь жизни с транспортом, технизация досуга и рекреации требуют от орга-

низма человека все большей дифференциации, четкости и стабильности поведенческих процессов. Человек все больше связывается с ноосферным технизированным миром, становится его частью. Оценки этого мира, естественно, переносятся и на многие функции человеческого организма.

Появляется необходимость в количественном описании как действий, производимых человеком во времени и пространстве, так и свойств самого организма. С одной стороны, это связано с управлением техническими средствами и технологическими производственными процессами, трудовой и спортивной деятельностью, а с другой — с выбором адекватных лечебных воздействий и доз лекарственных препаратов, необходимых данному организму, с оценкой профессиональных качеств и профпригодности, с разного рода классификационными суждениями.

Вообще говоря, количественные оценки появляются во всех случаях, когда человек должен принять ответственное решение, касающееся точно дозируемых действий. Когда в арсенале врачей появились эффективные средства восстановления функций больного организма (методы интенсивной терапии, сложные хирургические вмешательства, искусственные внутренние органы), когда инженеры научились создавать средства жизнеобеспечения в космосе и под водой, возникли и задачи управления ими. И первая задача, для которой требуется количественная оценка явлений в организме, — это принятие решения о необходимости вмешательства в жизнедеятельность, о начале применения технических или других высокоэффективных средств управления жизненными функциями организма.

А далее количественные методы оценки состояния организма должны использоваться уже непрерывно для слежения за ходом процесса управления, определения эффективности применяемых методов. Чем потенциально действеннее применяемые средства управления, тем точнее должен вестись контроль за ними, тем нужнее количественные методы оценки.

Скажем сразу, что если исходить из задачи применения оценок для слежения за ходом определенных процессов, то для каждой практической задачи понадобятся свои особые числовые оценки. Однако опыт показывает, что для решения конкретной практической задачи, как бы ни была она сложна, весь объем знаний об организме часто не нужен. А во многих случаях и вообще достаточно

лишь самых общих — и даже не количественных вовсе — оценок типа «практически здоров».

В других случаях достаточно привлечь самые простые количественные показатели. Если, например, ставится цель выявления сильнейшего спортсмена (это ведь тоже задача оценки свойств организма), то достаточно взять количественный результат, показанный на последних соревнованиях. Для решения чуть более сложной задачи слежения за спортивным ростом надо сравнивать результаты, показанные спортсменом на различных соревнованиях.

Школьный врач, оценивая физическое развитие подростка, производит измерение ряда параметров и делает это несколько раз за время обучения. Точно так же поступает поликлиника, проводя диспансеризацию населения: каждый раз измеряется определенное число параметров, и делается это более или менее регулярно. Измерения проводятся, таким образом, в динамике — в нескольких точках временного интервала.

Будем называть любые количественные оценки, которые делаются на основе однократных измерений (в одной точке — будь то какой-то момент времени, точка в геометрическом пространстве или точка в пространстве состояний), локальными оценками.

Тогда оценки, сделанные на всем множестве точек, можно назвать интегральными. Футболист, хорошо выступивший в 1988 году, но не показавший хорошей игры ни до, ни после этого, будет иметь хороший локальный показатель, но плохой интегральный (за ряд лет). Гимнаст, получивший высокие баллы по всем снарядам в том же 1988 году, имеет хорошие локальные показатели по каждому из снарядов и хороший интегральный показатель (по множеству снарядов).

Интегральный показатель, таким образом, суммирует (интегрирует) все локальные показатели в какой-то области (временной, пространственной, ситуационной).

Формально это положение можно записать следующим образом. Пусть множество точек, на которых рассматривается наша оценка, есть Ω — набор элементов $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$:

$$\Omega = \{\omega_i\}. \quad (4.11)$$

Локальная оценка h , измеряемая на каждом элементе ω_i , есть $h(\omega_i)$. Тогда интегральная оценка может быть записана в виде суммы

$$H = \sum_{i=1}^N a_i h_i(\omega_i), \quad (4.12)$$

или (если множество Ω непрерывно) в виде интеграла

$$H = \int_{\Omega} h(\omega) d\Omega. \quad (4.13)$$

Оценки h в соседних точках могут отражать временные изменения показателей (если ω_i — моменты времени). Тогда лучше писать, как обычно,

$$H = \int_0^T h(t) dt, \quad (4.14)$$

где $[0, T]$ — интервал времени, на котором велись наблюдения.

Если в качестве точек ω взять величины параметров, характеризующие внешнюю среду, то h и H дадут оценки того, как сохраняются свойства системы (локально и интегрально) при изменении условий внешней среды.

Выбор системы показателей ω и h должен, разумеется, производить эксперт — специалист, знакомый со спецификой решаемой задачи и знающий свойства организменных регуляций в данной ситуации. Дело кибернетики — разработать способы работы с оценками h и H .

Рассмотрим возможности описанного метода количественной оценки свойств регуляторных механизмов на примере ауторегуляции в организме. Возьмем сначала, как всегда, простой пример.

Если какой-то орган в организме снабжается кровью под давлением P , то кровоток Q через этот орган всегда остается более или менее постоянным, несмотря на изменение давления. Это обеспечивается специальными локальными механизмами ауторегуляции (здесь термин «локальный» употреблен в обычном для физиологии смысле — действующий в пределах какого-то органа).

Эффективность механизма ауторегуляции кровотока можно охарактеризовать отношением $\sigma = |\Delta Q / \Delta P|$. Чем меньше изменение ΔQ в ответ на данное изменение ΔP , тем меньше σ и тем лучше работает ауторегуляция.

Поэтому кажется естественным взять в качестве показателя h «обратное» отношение: $h = 1/\sigma$. Чтобы получить безразмерный показатель, введем нормировочный множитель Q_0/P_0 ; тогда окончательно можно определить h в виде

$$h = \frac{Q_0}{P_0} \frac{\Delta P}{\Delta Q}. \quad (4.15)$$

Здесь P_0 — некоторое «нормальное» значение давления, а Q_0 — кровоток через орган при этом давлении. На рис. 43 приведены полученные в эксперименте зависимости кровотока от перфузионного давления для сосудов мозга в норме (а) и при отключении ряда регуляторных механизмов посредством блокировки у животного

симпатических нервных стволов (б). Видно, что гомеостатические свойства системы при этом ухудшаются: плато кривой становится уже, чувствительность кровотока к изменению давления возрастает. Оценим ресурсы ауторегуляции в системе в обоих случаях.

Для простоты воспользуемся кусочно-линейным представлением гомеостатических кривых, как показано на рисунке. Данные

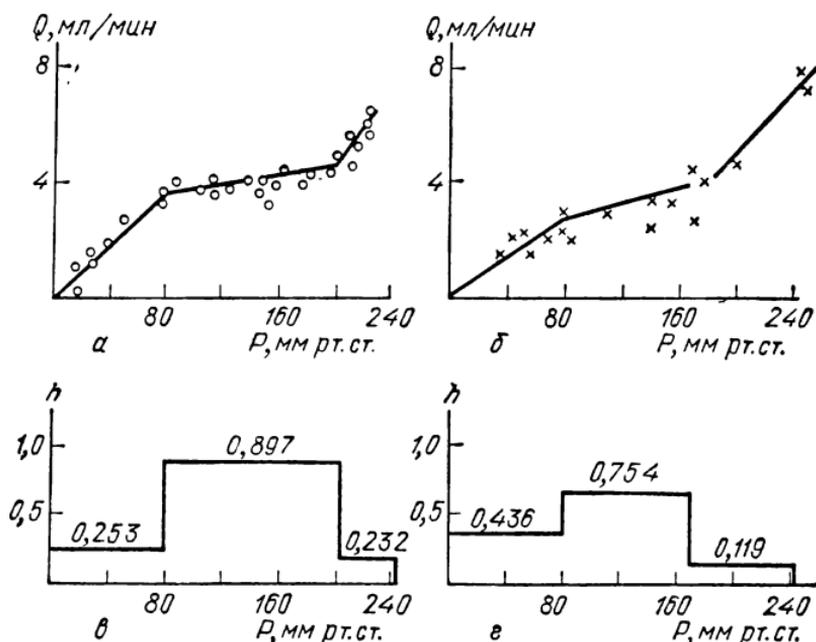


Рис. 43. Экспериментальные данные: зависимость кровотока в сосудах мозга при изменении давления на входе в сосудистую систему: а) механизмы регуляции мозгового кровообращения не нарушены, б) эти механизмы ослаблены путем химической блокады нервных путей, в) и г) — количественные оценки гомеостатических свойств сосудистой системы для обоих случаев соответственно

о величине гомеостатической способности ауторегуляции приведены в табл. 5.

Нормировка производится на величину $P_0 = 100$ мм рт. ст. и соответствующее значение кровотока, Q_0 . Так, для рис. 43, а величина $\sigma = \frac{100}{3,75} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta P}$. Величина h вычисляется по формуле

$$h = \frac{1}{1 + \sigma^2}, \quad (4.16)$$

которая для практических расчетов может оказаться удобнее, чем простое соотношение $h = 1/\sigma$, так как не надо брать модуля в выражении для σ и не возникает неопределенностей в тех случаях, когда величина чувствительности делается очень малой, т. е. при $\sigma = 0$.

Соотношение (4.16) и можно рекомендовать для применений. Ясно, что наилучший вариант, когда локальная гомеостатическая способность максимальна, отвечает случаю $h = 1$.

Зависимости $h(P)$ для условий нормы и отключения симпатических стволов приведены на рис. 43, *в*, *г* соответственно. Интегральная гомеостатическая способность, вычисляемая по формуле (4.13), дает для условий нормы $H = 143,3$ мм рт. ст., а для ухудшенного состояния ауторегуляторных механизмов $H = 105,4$.

Т а б л и ц а 5

Гомеостатические характеристики системы ауторегуляции кровотока мозга

Участки изменения P , мм рт. ст.	Норма			Отключение симпатических нервных стволов		
	0—80	80—200	200—240	0—80	80—170	170—240
σ	1,715	0,334	1,825	1,132	0,566	2,720
h	0,253	0,897	0,232	0,436	0,754	0,119

Использование оценок предложенного типа кажется очень привлекательным не только в рассмотренном случае. Однако на практике чаще используются более простые эвристические показатели.

Дело здесь не только в традициях. Для построения количественных оценок, о которых мы говорили выше, требуется довольно большой объем данных об исследуемом объекте (организме, его системе или органе). А врач или физиолог, как правило, должен делать свои выводы на основании очень незначительного количества данных. Измерение температуры тела, давления крови методом Куроткова, данные клинического анализа крови и мочи — вот тот привычный круг количественных данных, который до сих пор имеет в своем распоряжении участковый врач-терапевт. Да и большинство практических врачей пользуется тем же набором данных — может быть, добавляя только рентгеновские снимки и данные обработки электрокардиограммы, включая анализ RR -интервалов.

Поэтому область применения количественных оценок в экспериментальной медицине и физиологии все еще не очень широка. Мало-помалу они — эти оценки — входят в арсенал врачей, работающих в интенсивной терапии, применяющих в лечении новые технические средства (искусственные внутренние органы, автоматические дозаторы, аппараты вспомогательного дыхания и кровообращения и т. д.).

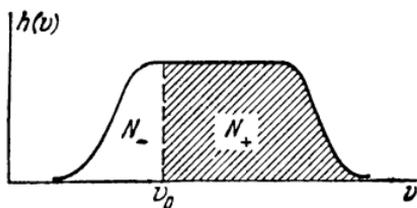
4.7. Ресурсы сохранительных свойств

Способность биосистем сохранять стационарное неравновесие и гомеостаз при существенных изменениях условий их функционирования и при вариациях окружающих условий является одной из их важнейших характеристик. Сохранительные свойства живых систем поэтому можно представить себе именно как единство их гомеостаза и способности поддерживать стационарное неравновесие. Сохранительные способности, определенные таким образом, оказываются тесно связанными с адаптационными и компенсаторными способностями живых организмов.

Мы сейчас обсудим возможность формального описания некоторых интегральных характеристик биосистем,

Рис. 44. Ресурсы гомеостаза в биосистеме.

Локальная способность поддерживать гомеостаз описывается функцией $h(v)$, которая представляет собой «перевернутую» гомеостатическую кривую. В точке $v = v_0$ можно оценить резервы системы, которые могут быть использованы или при повышении (площадь N_+), или при понижении (N_-) значений переменной внешней среды



основанную на введенном в предыдущем разделе показателе интегральных свойств. Обратимся к кривой, которая показывает, как в общем случае локальная способность системы сохранять свои свойства зависит от условий окружения (рис. 44).

Что означает эта кривая и как ее можно получить? Вспомним, что в системах организма гомеостаз соответствует только области «плато», где изменения Δv окружающих условий практически мало меняют состояние системы, приводя к малым сдвигам Δx . Если обозначить отношение $\Delta x / \Delta v$ через σ , то в пределах плато величина σ относительно мала. Тогда для показателя локальной гомеостатической способности можно взять величину h , определяемую (4.16).

Построив эту величину для всей области возможных изменений внешних условий, мы и получим характерный вид зависимости $h(v)$, который дан на рис. 44.

Функция $h(v)$, как и гомеостатическая кривая $x(v)$, также имеет плато — оно лежит тем выше, чем более полого идет плато гомеостатической кривой $x(v)$. Наклонные участки кривой $h(v)$ также соответствуют краям гомеостатической зависимости.

Теперь можно определить и запас гомеостатических свойств в системе, имеющей такую локальную характеристику гомеостаза,

как на рис. 44. В соответствии с (4.13) ее можно определить так:

$$H = \int_{-\infty}^{\infty} h(v) dv. \quad (4.17)$$

Величина H представляет собой площадь под кривой $h(v)$. Чем шире область плато, чем больше значения локального показателя в точках плато, тем больше общий ресурс гомеостаза, количественно задаваемый величиной H .

Если нас интересует способность системы сохранять гомеостаз при каком-то конкретном состоянии среды v_0 , то достаточно взять соответствующее значение $h(v_0)$.

А если нас интересует способность противостоять изменениям v в ту или иную сторону? Если, например, v должно увеличиться, то существенной окажется только часть кривой $h(v)$, лежащая вправо от исходной точки v_0 .

Часть кривой, лежащая влево от этой точки, будет «работать» лишь при уменьшении величины v .

Поэтому площадь под кривой $h(v)$, где h характеризует локальную гомеостатическую способность системы, будет определять резерв гомеостаза следующим образом: при $v > v_0$ резерв гомеостаза при возрастании v , а при $v < v_0$ резерв гомеостаза в случае убывания v . Обозначив эти резервы соответственно как N_+ и N_- , напомним:

$$N_+ = \int_{v_0}^{\infty} h(v) dv, \quad (4.18)$$

$$N_- = \int_{-\infty}^{v_0} h(v) dv.$$

Очевидно, что сумма $N_+ + N_-$, т. е. суммарный резерв гомеостаза, и равна интегральной гомеостатической способности системы, H .

Система, очевидно, находится в предпочтительном состоянии в том случае, если она имеет достаточный ресурс гомеостаза. Если априори неизвестно, какое направление изменений v более вероятно или более значимо, удобно считать, что соотношение

$$N_+ = N_- \quad (4.19)$$

отвечает «норме».

В норме механизмы регуляции не напряжены; при сдвиге условий окружающей среды в ту или иную сторону регуляторные механизмы системы напрягаются. Степень напряжения механизмов удобно определить в самом общем виде как долю гомеостатического резерва, которая «истрачена» системой при ее движении от начального, ненапряженного состояния к состоянию, возникшему при $v = v_0$:

$$v = \frac{H - 2N}{H} \cdot 100\%. \quad (4.20)$$

Если взять для примера механизмы ауторегуляции кровотока (рис. 43), то ненапряженное состояние этих механизмов соответствует нормальным значениям давления крови, когда P меняется в пределах 120—140 мм рт. ст.

Хотя положение и форма кривой $h(v)$, отражающей сохранительные способности организма и его систем, определяются прежде всего генетическим аппаратом, унаследованным этим организмом, известное влияние на них оказывает и внешняя среда. Для некоторых организмов, в частности, условия окружающей среды на самых ранних стадиях жизни «запечатлеваются», фиксируются в структуре их регуляторных систем. Такое явление носит название импринтинга. При помещении новорожденных животных в измененные температурные условия, например в камеры с высокой или, наоборот, очень низкой температурой, импринтинг способствует появлению у них приспособительных изменений в терморегуляторном аппарате, изменению шерстного покрова в соответствующую сторону. У растений, акклиматизированных к условиям северного климата, область гомеостаза также оказывается сдвинутой в сторону низких температур.

4.8. Оптимальность в технике и биологии

Структура и функции организмов возникли в результате длительного процесса эволюции, который сохранял наиболее жизнеспособные их формы, наиболее приспособленные к условиям обитания, наиболее целесообразные.

Точно так же и человек, создавая любые системы — приборы бытовой техники, промышленные предприятия, экономические системы, старается выбрать самые адекватные решения.

Конструктор, разрабатывая машину или какую-то другую техническую систему — автомобиль, телевизор, завод или компьютер, должен учитывать множество разнородных факторов. Прежде всего, создаваемая система должна хорошо и надежно выполнять свои функции. Завод должен выпускать продукцию, автомобиль — перевозить людей или грузы, телевизор — принимать программы телецентров, компьютер — обрабатывать информацию.

Но можно предложить много вариантов машины, каждый из которых в той или иной мере удовлетворяет поставленной цели. Как быть? В этом случае стараются из всех возможных решений выбрать наилучшее, причем оценка вариантов производится с двух точек зрения: качества выполнения функций и тех затрат, которые для этого необходимы. Качество и затраты — показатели противоречивые, так как для получения лучшего качества

требуются большие трудозатраты, более качественные (и дорогие) материалы и т. п. Поэтому задача выбора наилучшего решения всегда должна учитывать и необходимые ограничения.

Например, масса создаваемого прибора должна быть не больше заданной, в конструкции следует использовать только элементы отечественного производства, цена прибора и его энергопотребление не должны превышать контрольных цифр.

Наилучшая система, удовлетворяющая всем требованиям и ограничениям, обычно и называется оптимальной. Оптимальной может быть как структура системы (телевизор самый дешевый, самый технологичный, самый модный), так и ее функционирование (прием передач с наилучшим качеством, четкостью, звучанием и т. д.).

Оптимальным может быть и какой-то процесс, например процесс управления. Если управление вести так, что поставленная цель достигается за минимальное время при выполнении всех ограничений, то говорят об оптимальности по быстродействию. Оптимальность по энергозатратам означает, что процесс, удовлетворяющий конструктора своим быстродействием и точностью, выполняется с минимальными затратами энергии.

Задача об оптимальности управления ставится, как обычно (см. стр. 91):

— сначала задается цель управления — требования к конечному результату, который должен быть достигнут в итоге,

— формулируются или выявляются ограничения, которые не должны нарушаться или которые не могут принципиально быть нарушены в ходе процесса управления,

— выдвигается критерий качества, т. е. показатель, который в наилучшем варианте решения задачи должен быть минимальным (или, наоборот, максимальным — в зависимости от того, что оптимизируется — потери или достижения).

В теории управления эта постановка задачи оптимизации записывается формально. В несколько упрощенном виде это делается так. Показатель качества системы зависит от многих факторов — от характера протекания процесса, т. е. от переменных состояния $x(t)$, от величин управляющих сигналов $u(t)$ и от исходных параметров системы a . В оптимальной системе $u(t)$ надо выбрать так, чтобы показатель качества Q достигал минимума:

$$Q(x, u, a) = \min. \quad (4.21)$$

При этом не должны нарушаться ограничения, накладываемые на a , x и u .

Поиск минимальных решений в кибернетике и теории управления обычно выполняется путем расчетов на ЭВМ,

что требует формального описания объекта управления и окружающей его среды — как правило, в виде дифференциальных уравнений (описание объекта) и набора чисел (состояние среды и ее воздействие на объект).

Казалось бы, концепция оптимальности, получившая блестящую математическую разработку в середине 1960-х годов, дает окончательные рекомендации по созданию наилучших систем управления. На практике, однако, реализация выводов этой концепции встретила едва ли преодолимые препятствия.

Реально проектируемые системы с трудом вписываются в рамки этой теории — очень уж много параметров у современных систем, много и критериев их оценки, много ограничений, и чаще всего приоритеты задаются не формулами или цифрами, а неформальным путем, в неявном виде.

Действительно, инженер, который приступает к разработке прибора или какой-то другой системы, сначала должен определить круг функций, которые система должна выполнять. Ему же принадлежит право определять ограничения; возможно, он привлечет для этого узких специалистов по тем или иным вопросам проектирования. Потом вступят в игру «местные» ограничения — наличие тех или иных материалов, легкость получения каких-то деталей или сведений и т. д. В результате «оптимальных» решений может быть столько же, сколько инженеров проектирует прибор. В итоге и возникает ситуация, всем хорошо известная: наша промышленность выпускает десятки «оптимальных» конструкций телевизоров, сотни — чайных сервизов, бесчисленные количества фасонов обуви.

Ясно теперь, что «оптимальная» система может быть — в технике, конечно, — лучше или хуже в зависимости от наложенных на нее ограничений и — в меньшей мере — от круга выполняемых функций. Но ясно: чтобы «оптимальная» система была лучше, на ее создание надо накладывать меньше ограничений.

У конструктора технических систем почти всегда имеется определенная свобода выбора такой конструкции, которая будет адекватно выполнять желаемый набор функций при выполнении разумных ограничений, но поиск такой системы не сводится к простой минимизации показателя качества (4.21). Он носит творческий характер — анализ ситуации, определение необходимых и достижимых свойств системы, гибкий учет возможных ограничений и т. д.

Термин «оптимальность» имеет давнюю историю и в биологии. В различных биологических дисциплинах оптимальностью называли те наиболее благоприятные условия среды обитания или деятельности организма (его систем, органов), которые отражали «факт зависимости всех физиологических и биохимических процессов от условий среды». Противоположным по значению было понятие пессимума, характеризующее неадекватные условия среды.

В последние десятилетия, однако, термин «оптимальность» стал довольно широко использоваться при описании биосистем и в другом смысле, очень близком к технической трактовке этого термина. Суть подобного подхода сводится к тому, что свойства приспособленности живых организмов, их отдельных систем, их адекватность окружающей среде понимаются как оптимальность в том или ином смысле.

Впервые гипотезу об оптимальности конструкции организмов выдвинул и длительное время разрабатывал один из основателей количественной биологии Н. Рашевский. Эволюция его взглядов кажется настолько поучительной, что стоит рассмотреть их подробно.

Первоначальные положения были сформулированы следующим образом. Любой организм осуществляет ряд биофизических, биохимических и прочих функций, которые даже при одинаковой их интенсивности могут выполняться разными структурами. Выдвинутый в 1943 г. общий принцип гласил, что «конкретная структура или конструкция, которую мы действительно находим в природе, является простейшей из возможных структур или конструкций, способных выполнять данную функцию. Иными словами, из возможных вариантов выбирается тот, который удовлетворяет принципу максимальной простоты».

Спустя очень небольшое время Н. Рашевский пересмотрел этот принцип, справедливо полагая, что «простота — понятие неопределенное». Для математических применений такой принцип оказался неудовлетворительным, и его пришлось видоизменить, потребовав минимума затрачиваемого материала и энергии. В таком виде и был впервые сформулирован принцип оптимальности биосистем, известный под названием принципа оптимальной конструкции.

Оптимальность, однако, понятие тоже относительное. «Может, например, оказаться, — говорил Н. Рашевский, — что оптимальность с точки зрения количества материала не соответствует оптимальности с точки зрения затрат энергии. Кроме того, требования к конструкции можно снизить, если рассчитывать ее на более спокойные режимы функционирования.» Поэтому уже с 1961 г. исходный принцип формулируется в форме принципа адекватной конструкции организмов: «Конструкция должна быть адекватна заданной функции при заданных изменяющихся условиях среды»*).

*) См.: Р а ш е в с к и й Н. Модели и математические принципы в биологии // Теоретическая и математическая биология. — М.: Мир, 1968. — С. 54.

Особое внимание читателя хотелось бы обратить на слова Н. Рашевского о том, что энерготраты непосредственно связаны с кругом выполняемых системой функций. Нельзя бездумно минимизировать затраты даже при заданном априорно круге адресованных системе функций, надо подумать — а не стоит ли просто сузить этот круг? Так должен рассуждать инженер. А как дело обстоит в природе?

Рассмотрим пример, дающий непосредственный ответ на поставленный нами вопрос. Если построить зависимость затрат энергии (или потребления кислорода) при движении различных млекопитающих от их массы — что

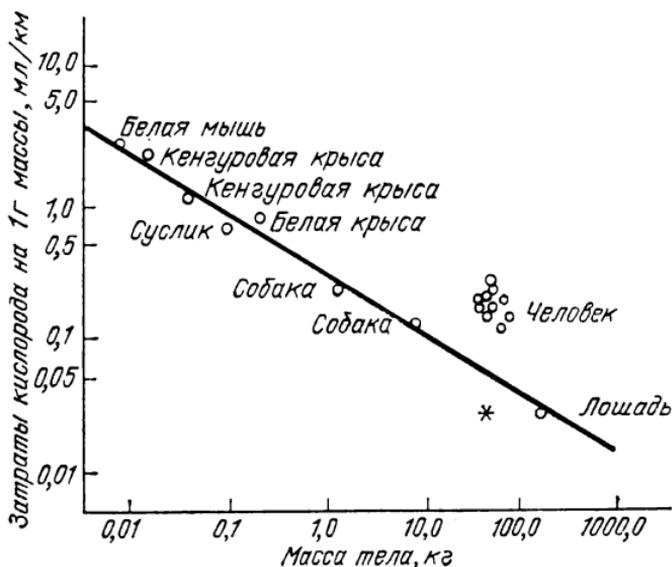


Рис. 45. Затраты энергии (потребление кислорода) при перемещении животных, обладающих разной массой тела, на расстояние в 1 км.

Человек тратит вдвое больше энергии, чем можно было бы ожидать от четвероногого животного с такой же массой тела. Обратите внимание на звездочку, отвечающую той же массе (около 80 кг): в природе нет животных, которые тратили бы на свое перемещение в пространстве столь незначительную энергию — объяснение см. на с. 172

и сделано на рис. 45, — то график принимает форму прямой в логарифмических координатах. Но одно исключение бросается в глаза — точки, соответствующие человеку, располагаются вдвое выше, чем следовало бы ожидать для четвероногих животных такой же массы. Расхождение, по всей видимости, объясняется тем, что дополнительная энергетическая стоимость передвижения у человека — это цена, которую ему приходится платить за пря-

мохождение, за то, что он имеет возможность освободить свои руки для других целей.

Обратите внимание еще на одну особенность графика. Для собаки там показано сразу две точки — по массе эти животные отличаются более чем в десять раз, но обе точки вполне ложатся на наш график. А это значит, что разные породы собак одинаково приспособлены к условиям своей жизни — адекватно сконструированы, если воспользоваться словами Н. Рашевского, а их масса и все связанные с ней параметры организма не так существенны.

По словам одного из классиков кибернетики, У. Р. Эшби, «требование найти оптимум может быть излишним; в биологических системах достаточно того, чтобы организм находил состояние или величины, лежащие в заданных пределах». Да и многие другие авторы считают, что в биосистемах нет стремления к достижению какого-то наилучшего состояния: уравновешение со средой достигается не в одной какой-то точке, а скорее в целой области возможных состояний системы. «Понятие оптимальности лучше заменить понятием гармоничности — насколько все части организма участвуют в создании условий, необходимых для существования каждой из них», — писал еще в 1964 г. замечательный советский биолог В. Н. Беклемишев.

Итак, концепция оптимальности оказалась слишком «жесткой» для биологических систем. Биосистемы — многоцелевые объекты, каждый организм сам формулирует цели поведения, сам определяет пути их достижения (только простейшие пользуются запрограммированными жесткими алгоритмами). Одно и то же состояние организма будет оптимальным в каких-нибудь ситуациях, при решении каких-то задач, и абсолютно неадекватным — в других случаях, при встрече с другими проблемами.

В терморегуляции, например, температура внутреннего «ядра» тела настолько важнее для организма, чем температура периферии, что естественные защитные механизмы у человека поддерживают постоянство внутренней сферы всегда прежде всего за счет кистей рук. А представим себе теперь, что этот человек — оператор-подводник, работающий в экстремальных холодных условиях (каждый час работы такого оператора на больших глубинах обходится, кстати, зарубежным фирмам в десятки тысяч долларов). Оптимально ли «нормальное» распределение тепла в таких условиях? Ведь за час работы ядро никак не сможет сильно остыть, через час водолаз уже будет наверху, в тепле. А «естественное» охлаждение и переохлаждение кистей рук препятствует качественному выполнению подводных работ.

Организм, настроенный на природный «оптимум», оказался недостаточно гибким при кардинальной смене ситуации.

И в природных условиях можно найти много примеров, когда одни и те же свойства имеют для разных организмов разную ценность в зависимости от особенностей их жизни и приспособления к среде. Мы уже обращали внимание читателя, что процесс поддержания жизни — даже в покое и в нормальных условиях среды — дело очень дорогое и трудоемкое. Поддержание свойств, необходимых для выживания данного вида живых организмов, обходится самим организмам недешево. И в этой ситуации равно возможны два пути достижения цели. Сохранение вида при «худшей», но и дешевой приспособленности каждой особи может быть обеспечено большей плодовитостью, т. е. небольшим «удорожанием» процесса воспроизводства.

В любом случае в эволюционном процессе закрепляется определенное соотношение между совершенством функций и ценой, которую приходится за такое совершенство платить. Это соотношение может быть как на правом, так и на левом фланге борьбы за оптимальность: несовершенные, но дешевые, или «высококачественные», но дорогие. Компромисс кажется наиболее приемлемым решением такой дилеммы.

К этому вопросу нам еще предстоит вернуться, когда будут обсуждаться вопросы «дублирования» естественных механизмов организма их техническими аналогами. Если энергетические ограничения в организме всегда существенны и природа вынуждена балансировать между дорогим — хорошим и удовлетворительным — дешевым, то конструктор технических средств поддержания жизни часто свободен от «энергетических затруднений».

Все-таки кажется, что большинство организмов, созданных когда-либо природой, оказались обладателями «слишком дешевой» структуры, чтобы раз и навсегда закрепить за собой возможность сохранения вида. В эволюционном процессе одна такая «недорогая» конструкция при смене условий обитания не усложняется, а просто заменяется другой, сходной же сложности.

Палеонтологические данные свидетельствуют о том, что вновь возникающие виды «очень приспособлены» к своей среде — они быстро (конечно, в геологическом масштабе времени) распространяются в ней. Но, закрепившись в сообществе живых организмов, новый вид тем самым изменяет среду обитания (в нее ведь входят не только абиотические факторы, но и сам биос). Поэтому, достигнув некоторого максимума, численность вида по-

степенно начинает снижаться, и сам вид может полностью исчезнуть. Так вымерло около 90 % всех созданных природой к настоящему времени таксонов.

На рис. 46 для примера приведена распространенность различных хвойных пород в процессе смены геологических эпох. Были ли «оптимальными» вымершие виды?

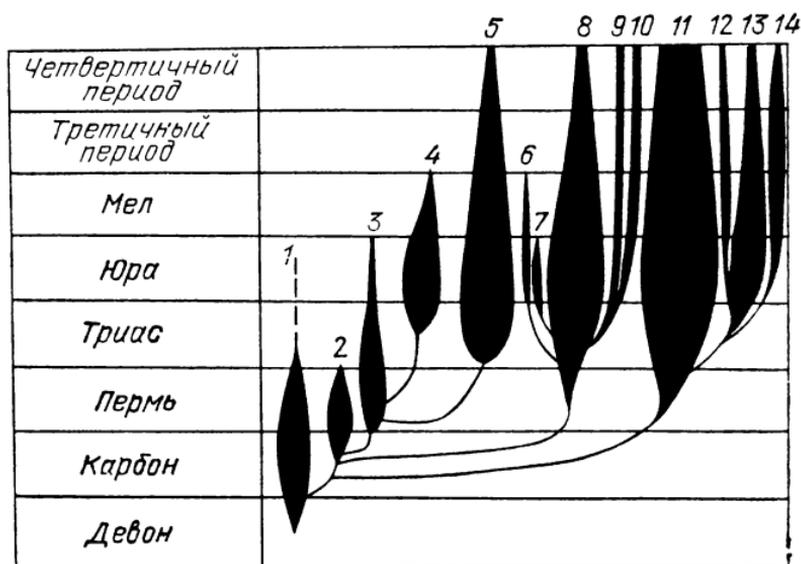


Рис. 46. Распространенность разных хвойных пород деревьев в различные геологические эпохи.

Приведены палеонтологические данные о 14 семействах; шесть из них полностью вымерли, остальные пережили в прошлом периоды «процветания», которые также давно минули. Толщина линий отвечает распространенности каждого семейства

Или, развиваясь в направлении максимальной приспособленности — к «оптимуму», они просто не успевали достичь его?

Эволюция близорука — она отдает предпочтение тем видам, которые получают преимущество немедленно. Тем самым в принципе достижимым является ближайший локальный максимум приспособленности, получаемый за счет мелких мутаций в конструкциях организмов: кардинальные мутации, как правило, не дают жизнеспособных организмов. Не потому ли в эволюции так и не возникли организмы «сверхсложной» структуры, которая позволяла бы им не вымереть в геологических масштабах времени?

Критический анализ эволюционного процесса, данный с позиций конструктора технических систем, принадле-

жит известному польскому писателю-фантасту (и, пожалуй, такому же хорошему специалисту в теории систем) С. Лему — и анализ этот был им назван «пасквилем на эволюцию». В своей замечательной книге «Сумма технологии» С. Лем писал: «...Эволюция оставляет своим творениям самые примитивные органы и биотехническое оснащение, лишь бы с их помощью они управлялись с сохранением вида».

Блестящее высказывание, которым можно было бы и закончить раздел книги об оптимальности систем в биологии, если бы эти слова точь-в-точь не означали «принципа максимальной простоты» Н. Рашевского, с которого началась эволюция его взглядов на проблему оптимальности и адекватности живых организмов.

4.9. Организм в окружающей среде

Среда, в которой живет организм, описывается множеством характерных черт, особенностей. Часть из них проста — это относится к тем характеристикам, которые относительно постоянны (температура, концентрации веществ) или меняются по относительно несложным законам (смена дня и ночи, сезонность). Отношение организмов к таким параметрам среды обитания решается на уровне гомеостаза, адаптации и других форм реагирования, рассмотренных в предыдущих разделах.

Но природа устроена значительно сложнее: вода сконцентрирована в ручьях, реках, озерах; съедобная растительность — в лесах, на лугах; животная пища вовсе не стремится стать жертвой. Жизнь в такой изменчивой среде неизбежно требует от организма гибких приспособительных реакций — каждый шаг животного по неровной почве в определенной мере уникален; каждая муха, съеденная лягушкой, требует «индивидуального подхода».

Пионерский подход в области анализа поведения организма в среде обитания был разработан Н. А. Бернштейном, которому впервые удалось показать, что необходимым условием жизни и деятельности организма в изменчивой среде является его способность к целенаправленному поведению. Н. А. Бернштейн изучал в основном организацию движений у человека, но его идеи вполне распространяемы на любые формы поведения: достаточно лишь механические «траектории» органов движения заменить на «обобщенные траектории» поведения других систем организма.

Подобно тому как в ходе выполнения движений организм перемещается в пространстве по определенной траектории, направленной к конечной цели движения, поведенческий процесс любой степени сложности идет по своей «обобщенной траектории», целью которой является удовлетворение какой-либо потребности организма.

Говоря о сложных формах поведения, мы снова (как уже было при обсуждении высших уровней управления в организме в гл. 3) будем пользоваться терминологией и понятиями психологической науки *).

Чтобы жить, организм нуждается в веществах и энергии. Эту простую мысль мы повторяем уже в который раз — и каждый раз вопрос поворачивается новой стороной. Вещества и энергия нужны каждой частичке организма — каждой его клетке, каждому органу. Нужда организма в кислороде, питательных веществах, воде — это нужда, определяемая основой жизни — обменом веществ. Понятно, что само зарождение жизни могло произойти в среде, которая максимально способствовала удовлетворению таких нужд.

Термин «нужда» используется здесь в самом общем плане — нужда организма в кислороде может пониматься и как состояние кислородного голодания организма, и как факт невозможности жизни в бескислородной среде. Для количественного описания текущей «нужды», т. е. для конкретного задания необходимого в данный момент темпа потребления O_2 , мы, как и ранее, оставляем термин «потребность» (см. выше разд. 2.1). Потребности, понимаемые в таком смысле, хорошо описывают ситуации, когда нужные организму «блага» (те же вещества, энергия) распределены в окружающей среде более или менее однородно, не очень зависят от меняющейся ситуации, но вряд ли могут использоваться при описании более сложных взаимоотношений организма и среды. Так, организм нуждается в самосохранении, но потребность в реализации этой нужды возникает далеко не всегда. А когда и возникает (у животных, к примеру, — когда они встречают хищника, или на них идет охота, или случается пожар в лесу), то описать ее простой функцией времени, как потребность $w(t)$ в кислороде, просто не удастся.

*) В основном мы следуем идеям очень интересной книги В. К. Вилюнаса «Психологические механизмы биологической мотивации» (М.: Изд. МГУ, 1986).

Поэтому здесь мы дадим и общебиологическую трактовку понятия потребностей (естественно, не формализуемую на нынешнем уровне наших знаний о жизни). Потребность организма — это такая его нужда, для удовлетворения которой он вооружен специальными механизмами обнаружения и устранения. В определенном смысле можно сказать, что все то, из чего состоит организм, представляет собой механизмы удовлетворения потребностей.

Чтобы яснее показать разницу между нуждой и потребностью, приведем такой пример. Даже простейшие животные нуждаются в воде — у них есть нужда, чтобы не высох водоем, в котором они обитают. Но потребностью эта нужда становится только у видов, способных предвидеть приближающееся высыхание водоема и что-то ему противопоставить — перемещение в другой водоем, впадение в спячку, чтобы сохраниться за счет торможения метаболических процессов, и т. п.

Развитие потребностей в ходе эволюции означает расширение сферы непосредственного контроля за условиями существования, общее увеличение жизнеспособности благодаря уменьшению зависимости от среды. Потребности удовлетворяются в результате взаимодействия систем организма с окружающей средой и происходят эти взаимодействия по физическим законам среды. Мы говорили выше о пассивных и активных механизмах управления в организме: разница между ними в том, какую долю составляют действия законов природы. Потребность растительного организма в воде удовлетворяется практически целиком пассивно, за счет природных механизмов осмотического давления, капиллярных сил и т. п. Когда холоднокровное животное устраивается на солнцепеке, оно лишь эпизодически вмешивается в процессы, от него не зависящие, — согревание лучами солнца происходит после этого само по себе.

Но как бы ни были разнообразны отношения организмов со средой, потребности формируются не только особенностями такого рода. Сами механизмы удовлетворения потребностей, создаваемые у животных эволюцией, начинают требовать для своей успешной деятельности специальных условий или операций. Температурный гомеостаз сам по себе не является необходимым условием жизни — потребность в постоянстве температуры внутренней среды появилась как условие нормальной или, лучше сказать, эффективной работы метаболической системы, а затем и нервных клеток, нервной системы, ЦНС и, на-

конец, психики. Но нервные процессы в своем развитии настолько приспособились к условиям постоянной температуры, что вне их уже не могут осуществляться! «Потребность в сохранении этих условий, не следуя прямо из исходных нужд жизни, в итоге становится жизненно необходимой. Таким образом, можно говорить о потребностях, производных от других потребностей, — пишет В. К. Вилюнас.— Обобщенно говоря, потребности являются продуктом эволюционного развития системы организм — среда».

Обычно, говоря о потребностях животного организма в среде, стараются как-то сгруппировать их. Одной из возможных форм группировки является выделение первичных биологических потребностей (потребности в пище, воде, кислороде и общая экскреторная потребность), затем потребностей, связанных с сохранением целостности организма в различных по важности ситуациях (потребности в постоянной температуре тела, избегании боли, «личной безопасности», в сне и отдыхе, активности, агрессии), и, наконец, потребностей, связанных с продолжением вида (половая потребность, потребность в уходе за детенышами).

Эти двенадцать типов потребностей, введенных одним из основателей теории мотивации поведения К. Мадсеном, могут быть дополнены лишь в небольшой степени. Пожалуй, важным дополнением к этому списку можно считать только включение познавательной потребности.

Удовлетворение этих потребностей и определяет то многообразие во взаимоотношениях организмов со средой, где в понятие среды включается и все множество других живых организмов. Средства удовлетворения потребностей становятся постепенно настолько важными, многообразными, что из средств обеспечения жизни становятся ядром жизненных явлений, самой жизнью.

В первую очередь это относится к психическим механизмам.

4.10. Психика

Приспособленность организма к условиям среды, его жизнеспособность означает на низших уровнях эволюционной лестницы его «уравновешивание» с абиотическими — как правило, пространственно-однородными — факторами среды. Например, речь может идти о приспособленности и уравновешивании по температуре, газовому

составу, а при жизни в воде — о температуре, солености, питательных веществах, более или менее равномерно распределенных в толще воды.

На высших уровнях эволюции приспособленность означает уже весьма сложно организованное взаимодействие организма со средой: поиск подходящих условий для обитания, рождения детей, ориентацию в предметном мире, постановку и решение задач по присвоению нужных для жизни веществ и предметов. Хотя цели организмов и на этом уровне остаются теми же, что и для простейших существ, их выполнение наталкивается на массу трудностей, неведомых низкоорганизованным организмам. Пути получения из окружающей среды нужных веществ в необходимом наборе и поддержание на этой основе постоянства своей структуры и функционирования становятся принципиально другими. Теперь уже не обойтись без сложного аппарата обработки информации о структурно-неоднородном мире вещей и существ — и эволюция дает этот аппарат. Нервная система со свойственными ей механизмами обработки информации вполне приспособлена для решения таких проблем. В разд. 3.9 мы довольно подробно рассмотрели, как решаются задачи, связанные с обнаружением пищи в среде и ее добытием у виноградной улитки. С точки зрения инженера, вообще говоря, не видно причин, почему бы подобные «бесчувственные» механизмы управления не справились и с решением любых более сложных задач такого рода. Ведь даже проблема роботизации производства в ближайшие годы приведет (да уже и сегодня привела) к созданию подвижных роботов, решающих задачи ориентации в «производственно-организованной» среде, обнаружения «целей», перемещения к ним и их «обработки». В целом это вполне изоморфно задаче «присвоения» объектов реального мира живыми организмами.

По этому пути и идет современная компьютерная технология, что ведет к созданию «искусственного интеллекта» и всех других компьютерных чудес.

Как это ни удивительно для инженера, свято верующего во всемогущество техники, эволюции этого оказалось мало. Эволюционный процесс дал организму значительно более высокую форму взаимодействия с информационно-неоднородной средой, которая (форма взаимодействия) при сегодняшнем уровне науки и техники никак не может быть воспроизведена ни компьютерными, ни какими-либо другими известными методами. Эта

форма «обработки» информационных процессов — психика.

Я затрудняюсь здесь квалифицировать психику в терминах инженерных, технических, компьютерных или других наук (даже взял в кавычки слово «обработки» в предыдущем предложении). Эту часть анализа приходится оставлять психологическим дисциплинам и философии. Скажу только, что в принципе не кажется невозможным воспроизвести все вещественные структуры (аппаратное обеспечение), энергетические и информационные потоки («программное обеспечение») живого мозга, создав его полную вещественно-информационную модель. Она будет перерабатывать внешнюю и внутреннюю информацию «точно так же», как и мозг, в одинаковых ситуациях давая одинаковые ответы и реакции. Но разница между мозгом и такой его моделью останется принципиальной: у модели за пределами воспроизводимых явлений останется психика живого мозга.

Психика — это не сама способность эффективно перерабатывать информацию (что относительно легко воспроизвести в технических устройствах типа того же искусственного интеллекта), психика — активное и страстное отношение к «обрабатываемой информации», чувствования, переживания, боль и радость. Сразу же, чтобы четко подчеркнуть разницу между «информацией о боли» и самой болью в организме человека, приведу пример, известный по учебникам психотерапии (наблюдение Г. Б. Геренштейна, 1920-е годы).

В хирургическую клинику была доставлена больная К., 52 лет, которой требовалась серьезная операция на органах малого таза. Поскольку наркоз был противопоказан, была предложена операция под гипнозом (больная оказалась сильно внушаема). Доцент Г. Б. Геренштейн погрузил больную в гипнотическое состояние прямо в палате и, убедившись в том, что она перестала чувствовать боль, перевез в операционную. Весьма сложная операция длилась около полутора часов и прошла успешно. Наложены последние швы, и больная пробуждается. Доцент Г. Б. Геренштейн спрашивает больную: «Ну, как вы себя чувствуете?» и получает неожиданный ответ: «Безобразие, доктор». От неожиданности присутствующие переглянулись, решив, что женщина терпела боль под «наркозом», если можно так его назвать. Но последовало продолжение: «Да как же не безобразие, какой день морите голодом, а когда будет операция, неизвестно!» Про голод понятно — поскольку операция затрагивает кишечник, надо, чтобы он был «чистым». А вот насчет боли — ведь при отсутствии нарушений в периферической нервной системе поток нервных импульсов, несущих информацию о боли при хирургическом вмешательстве, продолжает поступать в ЦНС от кожи, подкожных рецепторов, рецепторов внутренней среды.

Информация о боли в организме имеется. А саму боль организм не чувствует». Правильнее говоря, психический уровень организма под воздействием гипноза не воспринимает информации, которая ему «предъявляется» на физиологическом уровне.

Современная техника способна воспроизводить процессы переработки информации, но нет даже намека на то, как проникнуть в существо процессов чувствования, переживания, мышления, боли. Если завтра робот скажет вам, что он радуется вашим успехам — не верьте ему. Машина радоваться не может, как не может и мыслить.

Правда, я могу оказаться и неправым. А вдруг техническое воспроизведение живого, чувствующего мозга «атом за атомом», «кирпичик за кирпичиком» даст такую машину, в которой «само собой» возникнет и чувствование? Просто так, как некая «эманация» над аппаратно-программным комплексом обработки информации, подобно тому как из черно-белых букв возникает постройка «Войны и мира» *).

Что же «делает» психика в организме? Современная психология утверждает, что приспособительное значение психики для жизни организма состоит в организации целенаправленного поведения. Эти положения были четко сформулированы трудами А. Н. Леонтьева, Н. А. Бернштейна, П. В. Симонова и особенно П. Я. Гальперина, который писал: «Целестремительность отсутствует среди физических процессов и ее вообще нет в мире до тех пор, пока в организме не возникает активное противоречие — требование действовать, но не так, как организм умеет, не автоматически, а как-то иначе, причем еще неизвестно, как. И в качестве условия, одного из условий выхода из этого противоречия, образуется психическое отражение ситуации».

Прокомментируем эти слова, еще раз встав на позицию инженера — специалиста по ЭВМ и компьютерным методам исследования систем. Эта позиция, вполне четко сформулированная, не вполне убедительна: многие задачи организации целесообразного поведения можно решать и на «допсихическом» уровне. В частности, задачи поиска цели, выбора траектории для движения к ней, управления самим движением по данной траектории при наличии любых (в том числе и непредвиденных) препятствий вполне под силу даже не очень совершенным сегодняшним ЭВМ:

*) Такие мысли могут возникнуть, например, при чтении книги Тейяра де Шардена «Феномен человека» (М.: Мир, 1987).

были бы датчики координат цели, устройства переработки информации и исполнительные устройства на движущихся объектах.

Дело в том, что в технических задачах управления исходная «политика поведения» сформулирована извне — человеком, лицом, принимающим решения (ЛПР). В организме нет такой внешней инстанции — все стратегические задачи управления жизнью, поведением должны решаться «на месте», высшей инстанцией самого организма, его «я». Психика, по всей видимости, не просто позволяет решать задачи управления. Психика дает возможность создания «центра управления» в организме, состоящего из двух компонент — информационного дисплея, на котором выдается физиологическая информация о внутреннем состоянии организма и о внешней среде, и психологического «читателя» этой информации, — той инстанции, которая «представляет индивид в его целенаправленных действиях» (см. выше разд. 3.10).

Психика представляет собой уникальный инструмент управления, позволяющий «с птичьего полета» озирать все множество необходимых для жизни организма проблем, включать каждую из них в контекст общей ситуации и стратегии жизни. Чувство голода, желание отдохнуть, внезапное беспокойство — все это возникает перед внутренним взором как бы «само по себе», всплывая у человека на уровень сознания из каких-то неосознаваемых глубин. (Психологи говорят об «актуализации» того или иного желания, побуждения, чувства.)

Сознание работает только с «актуализированными» явлениями мозговой деятельности, но психика отвечает и за саму «актуализацию».

Вы когда-нибудь играли в «компьютерные игры»? Нет? Эти игры ведутся на экране — дисплее персонального компьютера, например на обычном телевизионном экране. Это очень затягивающее занятие. Лет десять тому назад тогдашний президент Филиппин Маркос даже запретил ввоз компьютерных игр в страну, чтобы не отрывать молодежь и другие слои населения от полезной для общества деятельности.

Привлекательность этих игр — в их «жизнеподобии». Игра — это последовательность принятия решений и их реализация в некотором хотя и условном, но очень привлекательном мире — в мире враждебных «духов», искателей сокровищ, разбойников. «Упаковка» задач делает их решение увлекательным развлечением. А в школе? Вспомните, весело ли было решать задачки по алгебре или физике. Кому как, потому что это было трудно — очень неудобен школьный аппарат решения — надо писать формулы, цифры, складывать их... Отдать бы все эти вычисления кому-нибудь, а самому только радоваться правильным ответам! И похвале учителя!

Сложнее решаемая задача — больше необходимых выкладок. Для описания «путешествия в страну чудес» — мегабайты информации, миллионы и миллионы цифр. Сжать их в предметные образы, направить на решение задач не только сухие правила арифметики, но весь жизненный опыт человека — вот поле приложения психических механизмов в организме. Психика — тот игровой полигон, на котором организм проигрывает задачки из области реальной жизни, получая своеобразное «удовольствие» от правильных решений, потому что только правильные решения могут сохранить ему жизнь. Природа — учитель организма, она учит его решению задач на психическом уровне, завлекая его положительными эмоциями, награждая радостью и наказывая болью, разочарованием, переживаниями.

Конечно, психическая сфера базируется на «допсихических» уровнях обработки информации, подобно тому как в компьютерных играх выводимые на экран дисплея образы представляют собой итог сложных процессов обработки цифровой информации. В мозгу, по всей видимости, используются другие физические принципы обработки информации, чем в наших ЭВМ, но в нем есть и понятные нам механизмы обработки (по крайней мере, в их внешних проявлениях).

Иногда случай «открывает» доступ к тайникам «информационной машины» мозга. В печати иногда мелькают сообщения о «феноменальных счетчиках», когда человек после какой-нибудь аварии вдруг обнаруживает у себя способность проделывать вычислительные операции фантастического объема — складывать, умножать, извлекать корни из многозначных чисел, тут же выдавая ответ, сам собой «всплывающий в мозгу». Не надо путать этот феномен с эстрадными способностями артистов быстро проделывать такие вычисления за счет тренировки и использования осознаваемых приемов быстрого счета. Похоже, что в нашем случае в результате аварии в мозгу возникают случайные, не предусмотренные природой каналы выведения на психический уровень «полуфабрикатов мысли» — промежуточных результатов обработки информации на нижних этапах подсознательной области.

«Язык» психики — это «язык» действий в пространстве потенциальных возможностей и решений. Решение задач непосредственно на языке окружающего мира, без тех упрощений, которые делает наша современная наука — физика, математика, кибернетика, вычислительная техника — вот то подлинное преимущество, которое дает организму психика.

Отсюда идет вся специфика психического решения задач управления, Только в современных «отстраненных

от жизни» науках мы используем формализованные языки, потерявшие образную связь с окружающим миром, — языки формул, цифр. Язык человека — язык образов, сцен, происходящих на внутреннем дисплее психики. Особенно ясно это, если проанализировать архаические языки бушменских или других племен Африки, использующих примитивные средства общения.

Язык племени *эве*, например, — просто последовательность сцен, описываемая с точки зрения деятельности. Предложение «Я ставлю перед моим дедом суп и рядом еду» (еда — что-то вроде нашего пудинга) звучит у *эве* так: «Я взял суп — взял, пошел, пришел — дед мой — перед лицом — дал ему — пришел, взял еду — взял и пошел и поставил суп сторона — поставил дед мой — перед лицом — и дал еду». Можно, пожалуй, поспорить, как будет легче описать ситуацию — на языке *эве* или же на современных компьютерных языках высокого уровня — бейсик, фортран, си, ада...

Ну вот, пожалуй, мы охарактеризовали психику человека (а возможно, и высших животных) так сказать, с технической стороны, как аппарат решения задач. Психика предстала перед нами как служанка жизни. Но ведь это далеко не все. Психика — не только вспомогательное средство жизнеобеспечения организма — психика сама по себе жизнь. Эмоции, переживания, чувства — это и есть тот язык, на котором говорит «внутренняя жизнь» человека. Природа, наделившая организмы способностью к приспособлению в любых условиях, через психику управляет деятельностью организмов, «рекомендуя», в каком направлении, для решения каких задач, когда и как надо пользоваться возможностями организма для удовлетворения своих нужд.

И мы возвращаемся, так сказать, снова «с неба на землю», от высот интеллектуальной и эмоциональной жизни человека — к потребностям его организма, его систем, органов, тканей и тех клеток — мельчайших живых компонент нашего тела, с которых начиналась эта книга.

«Желания, влечения и т. п. выполняют функцию побуждения: к чему еще они могут побуждать, если не к предметам, необходимым для удовлетворения потребностей?» *)

*) В и л ю н а с В. К. Психологические механизмы биологической мотивации. — М.: Изд. МГУ, 1986. — С. 88.

В. ОРГАНИЗМ В ТЕХНИЧЕСКОМ ОКРУЖЕНИИ

5.1. Технические средства поддержания жизни

В жизни современного человека трудно представить ситуацию, когда бы он противостоял силам природы один на один, «с голыми руками». Даже Робинзон Крузо на необитаемом острове уже мог пользоваться целым рядом предметов, в природе не встречающихся и изготовленных человеком. Часть этих вещей была спасена им с корабля, потерпевшего крушение (посуда, одежда и обувь, трут и огниво, бумага и чернила), другую Робинзон изготовил сам (зонтик от солнца, свечи из козьего жира, деревянную лопату для вскапывания огорода, удочку).

Все эти вещи принадлежат к широкому классу орудий труда и бытовых предметов, которые используются человеком в повседневной жизни, в трудовой деятельности, на отдыхе. Многие из них используются человеком (как это делал и Робинзон Крузо) в сложных жизненных ситуациях для облегчения существования и удовлетворения своих биологических потребностей.

Давайте остановимся немного подробнее на том, что в предыдущей фразе можно понимать под словами «облегчение существования». Вернемся назад и восстановим в памяти рис. 4 (стр. 19), на котором организм представлен в виде двух взаимодействующих систем — информационно-кибернетической системы «рецепторы — ЦНС — эффекторы» и метаболической системы, которая обеспечивает постоянство структуры организма, вырабатывает для этого нужные вещества и энергию.

Сохранение жизнедеятельности и работоспособности организма на практике означает, что он способен адекватно выполнять полный набор кибернетических и метаболических функций. Информационно-кибернетические функции его состоят в том, чтобы: а) воспринимать жизненно важные факторы внешней среды, б) выбирать соответст-

ной близости и в достаточном количестве находились нужные компоненты. Это и есть одно из условий того, чтобы жизнь организма в среде была не только возможной, но и удобной. Именно поэтому в хороших условиях человек пользуется техническими средствами для облегчения жизни, достижения комфорта, а в сложных — для того чтобы вообще сделать жизнь возможной.

Как же использовал Робинзон Крузо добытые им и заново созданные предметы для обеспечения своего существования? Попробуем разобраться в этом подробнее, а результаты нашего анализа представим рисунком под номером 47.

Напомним, что, согласно Даниэлю Дефо, Робинзон взял с корабля одежду, обувь, парусину, бумагу и чернила, посуду и инструменты, трут и огниво, подозрную трубу, «два пистолета и три охотничьих ружья», порох и свинец для изготовления пуль. Взял он еще серебряные пластины и «немного отличного бразильского рома», но в нашем изложении двух последних предметов мы касаться не будем.

Кое-что он изготовил и сам — эти вещи мы перечислили уже в первом абзаце раздела, — но не очень много.

Слава богу, Робинзон был мужчина здоровый, и поэтому вмешательства (например, хирургического или даже лекарственного) во внутреннюю среду его организма не потребовалось. Поэтому квадратик «организм» на рис. 47, полностью повторивший схему рис. 4, останется в этом разделе нетронутым.

Метаболические потребности Робинзон удовлетворял, как и все люди (и животные тоже), за счет пищи, воды и воздуха. Посуда позволяла ему всегда иметь воду под рукой, воздуха на острове (он был расположен на уровне моря — а это не всегда так) хватало, огонь давал возможность есть жареное (а с использованием посуды — и вареное) мясо. Известно, что тепловая обработка пищи повышает эффективность ее использования желудочно-кишечным трактом.

Но пищу надо было где-то брать. На острове было вдоволь фруктов и плодов, водились козы и птицы, была рыба и жили черепахи. И все же не будь у Робинзона лопаты для вскапывания огорода, удочки и ружья, его взаимодействие со средой ограничилось бы простым собирательством. Технические средства для охоты и рыболовства, землепашества и строительства расширили спектр возможных поведенческих действий и облегчили их. Башмаки и одежда позволили совершать и дальние походы с целью добывания пищи.

Чтобы легче переносить жару и холод, Робинзон использовал кроме одежды и зонтик, холодные ночи проводил в хижине. Эти технические средства способствовали стабилизации тепловых потоков на границах организма со средой, и нагрузка на естественные механизмы терморегуляции поэтому снижалась.

Для облегчения планирования операций по добыче пищи, подготовке еды (а после появления опасности из-за вторжения макроврагов — людоедов — и для своей защиты) Робинзон пользовался в основном только одним техническим средством — подозрной тру-

бой. В долгосрочном планировании (выбор сроков для посева и сбора зерна, расчет необходимых запасов воды и пищи и т. д.) применялись и другие технические средства — светильники для работы после захода солнца, бумага и чернила для ведения календаря. Тем самым помощь от технических средств получало не только рецепторное звено (подзорная труба, светильник, свечи), но и блок ЦНС (использование твердых носителей информации — дневник). Правда, ЦНС получала такую помощь через естественные рецепторные каналы связи.

О помощи эффекторной части мы уже сказали выше — и очень подробно, о скромном вкладе технических средств в функционирование метаболической системы (стабилизация потоков веществ и тепловой энергии) — тоже. Поэтому предоставляем читателю возможность еще раз — без всяких комментариев с нашей стороны — рассмотреть рис. 47.

Теперь, завершив экскурс в историю Робинзона, посмотрим, как происходит общение человека с техническими средствами поддержания жизни сегодня.

Для достижения различных бытовых и производственных целей человек издавна применял разнообразные технические средства. В ходе технической эволюции эти средства непрерывно усложнялись — от простейших орудий труда, одежды, жилища к современным машинам и механизмам, компьютерам, космическим аппаратам и искусственным аналогам органов самого организма.

Интуиция человека приводила к тому, что выбор средств, необходимых для решения той или иной практической задачи, и способ их приложения всегда соответствовал свойствам и самих этих средств, и их потребителя — организма. Динамические характеристики камня или мотыги как орудия труда первобытного человека отлично соответствуют характеристикам руки как исполнительного элемента и параметрам мозга как решающего и управляющего устройства.

Поэтому вплоть до недавнего времени процессы подбора, изготовления и применения технических средств, их согласование со свойствами организма как управляющего органа осуществлялись эмпирически. Лишь в последние десятилетия появилось специальное научное направление, которое стало изучать человека и его деятельность в условиях производства с целью оптимизации условий труда и самого процесса трудовой деятельности. Такая наука получила название эргономики, и одной из ее задач стало согласование орудий труда с характеристиками человека как производственного звена. А потом появилась и техническая эстетика, анализирующая проблемы промышленного производства предметов труда и

быта, создания наилучшей среды для производственной деятельности и отдыха человека.

Появление этих научных направлений в целом отразило тот факт, что с течением времени технические средства, развиваясь, могут достичь предела логико-вычислительных и двигательных, т. е. управленческих (в широком смысле), возможностей организма человека. Психологические стороны взаимодействия человека с техническими средствами в процессе производственной деятельности стали предметом изучения еще одной стыковой дисциплины — инженерной психологии.

Переломный момент в отношениях человека с техникой наступил в сороковых годах нашего века, когда во время второй мировой войны появились первые радиолокационные установки. Радиолокатор резко расширил возможности зрительной рецепции как источника информации о положении и перемещении воздушных целей противника. Нарушение равновесия между объемом получаемой информации, содержащимися в ней потенциальными возможностями управления, с одной стороны, и реальными способностями человека, включенного в контур управления, с другой, оказалось критическим. Именно это повело к бурному всплеску новых идей и методов, которые по сей день диктуют развитие важнейших направлений современной науки, и не только тех, которые связаны с исследованиями организма человека.

В те военные годы чисто практических целей удалось достичь довольно быстро за счет создания автоматических систем наведения зенитных пушек. В таких системах была необходимость быстро, оперативно и без участия человека проводить множество вычислений; появились разного рода решающие приборы, моделирующие установки и т. п., что стало истоком могучей ныне отрасли вычислительной техники и информатики. Компьютеризация общества стала сегодня действительно символом революции в отношениях человека и техники.

Понимание того, что одни и те же процессы переработки информации и управления по единым законам протекают и у человека, и в машине, привело к появлению и быстрому распространению идей кибернетики (прежде всего теории управления, называвшейся тогда теорией автоматического регулирования, и теории информации). Формальный аппарат и методы кибернетики, ориентированные сначала на технические системы, были почти сразу же использованы и для исследования самого организма

человека уже как методы биологической (в частности, физиологической) кибернетики.

Наконец, осознание необходимости единства организма человека и технических средств, т. е. понимание того, что они могут и должны работать в едином комплексе для достижения общих целей, дало идею создания биотехнических систем. Появление таких систем — систем, в которых биологические и технические компоненты объединены едиными механизмами управления и взаимодействуют ради общего результата, породило на стыке технических и биологических дисциплин еще ряд научных направлений.

Одним из них стало создание систем компенсации утраченных или ослабленных функций организма, как сенсорных — зрения, слуха, так и вегетативных — кровообращения, дыхания, пищеварения и т. д. Новый толчок получили и методы протезирования двигательных функций человека.

Другим и, возможно, более важным направлением стало создание систем поддержания физиологических функций человеческого организма в сложных или вообще непригодных для жизни условиях. Задачи такого типа все чаще возникают в связи с расширением сферы производственной деятельности человека. Технические средства защиты человека-оператора используются для поддержания его работоспособности при работе в космосе и под водой, в географических регионах с суровой природой (Робинзон Крузо работал поистине в райских условиях) и на вредных производствах, в аварийных ситуациях и при спасательных операциях.

Во всех указанных случаях физиологические системы организма тесно взаимодействуют с инженерными (техническими) средствами обеспечения жизни. Поэтому возникшее направление, которое фокусирует внимание исследователя на взаимодействии физиологических и технических систем, на работе физиологического комплекса организма в технически организованной среде, получило название инженерной физиологии. Этот термин впервые прозвучал в 1980 г. в выступлении академика В. А. Трапезникова на совместной сессии АН СССР и АМН СССР, проходившей под девизом «Фундаментальные науки — медицине».

5.2. Аналогия между организмом и машиной

В основе всех смежных научных направлений, лежащих на стыке биологических и технических дисциплин, в той или иной мере просматривается аналогия между организмами и техническими системами, созданными руками человека.

Аналогия вообще — это сходство, соответствие каких-либо явлений, предметов или процессов, проявляющееся в некоторых их существенных свойствах. Удобство аналогии как способ проникновения в сущность сложных явлений состоит в том, что эти явления уподобляются более простым и поэтому хорошо изученным и понятным.

Естественно, что аналогия стала и щедрым источником гипотез относительно устройства организма и характера протекающих в нем процессов — как на ранних этапах развития биологических и физиологических наук, так и в наши дни. По существу, и наша основная схема, представляющая организм в виде двух взаимодействующих систем, информационно-кибернетической и метаболической, является итогом вполне определенной цепи аналогий, сводящей сложные процессы в организме к логически ясным и простым «машиноподобным» конструкциям. Именно поэтому так легко вписались в схему организменных взаимодействий те технические средства, которыми в свое время пользовался Робинзон.

Современные аналогии между организмом и машиной начинаются с наблюдений французского философа — а также физика, математика и физиолога — Рене Декарта, который, по-видимому, первый уподобил тело человека механическому устройству. По Декарту, человек представляет собой соединение безжизненного механизма — тела — с душой, обладающей мышлением и волей. Позже эти взгляды получили развитие в работах врача и философа, тоже француза, Ламетри, который в своей книге «Человек-машина» рассматривал человеческий организм как самозаводящуюся машину, подобную часовому механизму. Последовательный механистический материалист, Ламетри не видел необходимости в душе, считая, что поведение организма определяется его ответными реакциями на окружающий мир, который он чувствует посредством специальных систем — органов чувств.

И в это время и позже, как читатель легко заметит, аналогии диктовались прежде всего тем накопленным научной материей, который находился на ее «переднем крае».

Успехи химии и паровой техники в XVIII веке привели физиологическую науку к первым химическим аналогиям. Уже Лавуазье, выяснивший роль кислорода в жизненных процессах и дыхании, сравнивал организм с тепловой машиной. Позже немецкий физиолог и гигиенист Рубнер развил целое научное направление, в котором аналогия организма с тепловыми машинами была положена в основу анализа процессов теплообразования и теплоотдачи. Кстати, здесь можно сделать одно довольно любопытное отступление, касающееся рубнеровских взглядов (оно связано и с анализом концепции оптимальности, который был дан в конце предыдущей главы).

В рамках теории Рубнера было установлено, что для всех животных справедливо общее утверждение: на каждый килограмм массы тела при любых геометрических размерах в течение жизни расходуется одно и то же количество энергии — так называемый энергетический фонд, равный 191 000 ккал/кг. Поэтому мелкие животные с более высоким темпом метаболизма имеют короткую продолжительность жизни, а крупные виды с их сниженной интенсивностью обмена живут много дольше. И удивительный факт, который лучше передать словами советского ученого, специалиста по возрастной физиологии И. А. Аршавского: «Совершенно непонятное исключение в свете этой теории — человек, энергетический фонд которого в 4 раза выше, чем у остальных млекопитающих». Если уникальный энергетический фонд человека — 725 800 ккал/кг — настолько превосходит фонд всех других животных, можно ли вообще говорить об энергетической оптимальности конструкции организма млекопитающих?

Современный этап в развитии аналогий организма и машины, в который вошли идеи кибернетики, начинается с Норберта Винера, который в своей «Кибернетике» развил основную идею общности процессов управления в организмах и машинах. Возрастание роли ЭВМ, распространение компьютерной грамотности и основ информатики в современном обществе не могли не привести к появлению новых оттенков в возникающих аналогиях. Все естественнее становится точка зрения на организм как на систему, процессы в которой протекают в соответствии с закодированными программами, содержащимися в самом организме.

Вероятно, самая ранняя «компьютерная» трактовка организменных процессов была намечена академиком А. П. Ершовым в 1981 г.: «Программами буквально напичкан наш организм. Все без исключения физиологические процессы — это огромная, тщательно отлаженная и сложно устроенная библиотека программ... Развитие

организма есть выполнение генетической программы, записанной в геномном наборе».

Подводя некоторый промежуточный итог истории аналогий организм — машина, можно привести следующую табл. 6.

Такой таблицей обычно заканчивают рассмотрение аналогий организма с машиной (впервые я встретил ее в работах английского специалиста по биокибернетике

Т а б л и ц а 6

Аналогия организма с машиной

Аналогия	Авторы	Прототип	Авторы
Механическое устройство	Декарт (1595—1650)	Механика	Галилей (1554—1642)
Тепловая машина	Ламетри (1709—1751) Лавуазье (1743—1794) Рубнер (1854—1932)	Термодинамика	Ньютон (1642—1727) Карно (1796—1832)
Химическая машина	Пастер (1822—1895)	Термодинамика	Пригожин (1952)
Химическая машина с кибернетическим управлением	Современная биохимия и биокибернетика	открытых систем; кибернетика	Винер (1894—1964)

П. Цалова). Такая таблица была включена и в текст пленарного доклада на IX Всемирном Конгрессе ИФАК — Международной федерации по автоматическому управлению, который готовился автором вместе с крупными советскими специалистами по применению технических и кибернетических идей и методов в медицине и медицинских приборах, В. А. Викторовым и В. И. Шумаковым. Идеи этого доклада будут широко использоваться в дальнейшем тексте книги.

Но вернемся к аналогии между организмом и машиной. Ведь она может трактоваться еще и с других позиций. Откуда такая тесная аналогия между естественными системами — организмами, и техническими устройствами, машинами, системами, создаваемыми руками человека? Не творит ли человек мир вещей «по образу своему и подобию»?

По представлениям современной биохимии эволюция метаболических систем шла «задом наперед». Если сейчас в организме происходит цепочка метаболических реакций $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$, то «можно думать, что в самом начале возникла потребность в веществе D , и самой древней реакцией была реакция получения D из C , а C было «сырьем», запас которого имелся в окружающей среде. Лишь после того, как этот запас начал иссякать, возникло давление отбора в пользу способности получать C из другого сырья, т. е. B и т. д.*).

Метаболические потребности диктуют ход химической эволюции. Но ведь то же самое можно сказать и о всех других путях удовлетворения потребностей организмов. Польский писатель и философ С. Лем писал: «Гомеостаз — так ученые называют стремление к равновесию, т. е. к существованию вопреки изменениям, — создал известковые и хитиновые скелеты, противодействующие силе тяжести, обеспечил подвижность посредством ног, крыльев и плавников, облегчил пожирание с помощью клыков, рогов, челюстей и пищеварительных систем и в то же время защитил от пожирания панцирями и камуфляжами...».

И далее — в противоположность большинству животных человек не приспособливает себя к среде, а среду преобразует в соответствии со своими потребностями. Значит, если потребность должна быть удовлетворена и дальше, она приводит к переходу от «нормальной», внутриорганизменной перестройки в эволюционном процессе к эволюции «заорганизменной» или «экзосоматической» (термин, впервые предложенный пионером математической экологии А. Лоткой). Произведения рук человеческих, используемые в качестве орудий и инструментов, становятся продолжением человеческого тела. Машинный мир, создаваемый человечеством, в своей структуре и по выполняемым функциям повторяет организм. Рис. 48 показывает, как структура машинного мира, продолжая структуру организма, повторяет ее. Хотя формы машин и механизмов, «экзосоматических органов» человечества, могут быть абсолютно непохожими на аналогичные организменные структуры, функции их — в развитии человеческих возможностей и способностей.

Питер и Джин Медавар, авторы уже цитированной книги «Наука о живом», проиллюстрировали это поло-

*) Мы цитируем здесь едва ли не самую интересную книгу по проблемам эволюции: Э. Майр, Ф. Айяла, Р. Дикерсон и др. «Эволюция», переведенную на русский язык (М.: Мир, 1981).

жение очень интересным образом: «Некий студент-медик однажды спросил, могут ли развиваться у людей крылья, которые обеспечили бы им возможность летать. Вопрос

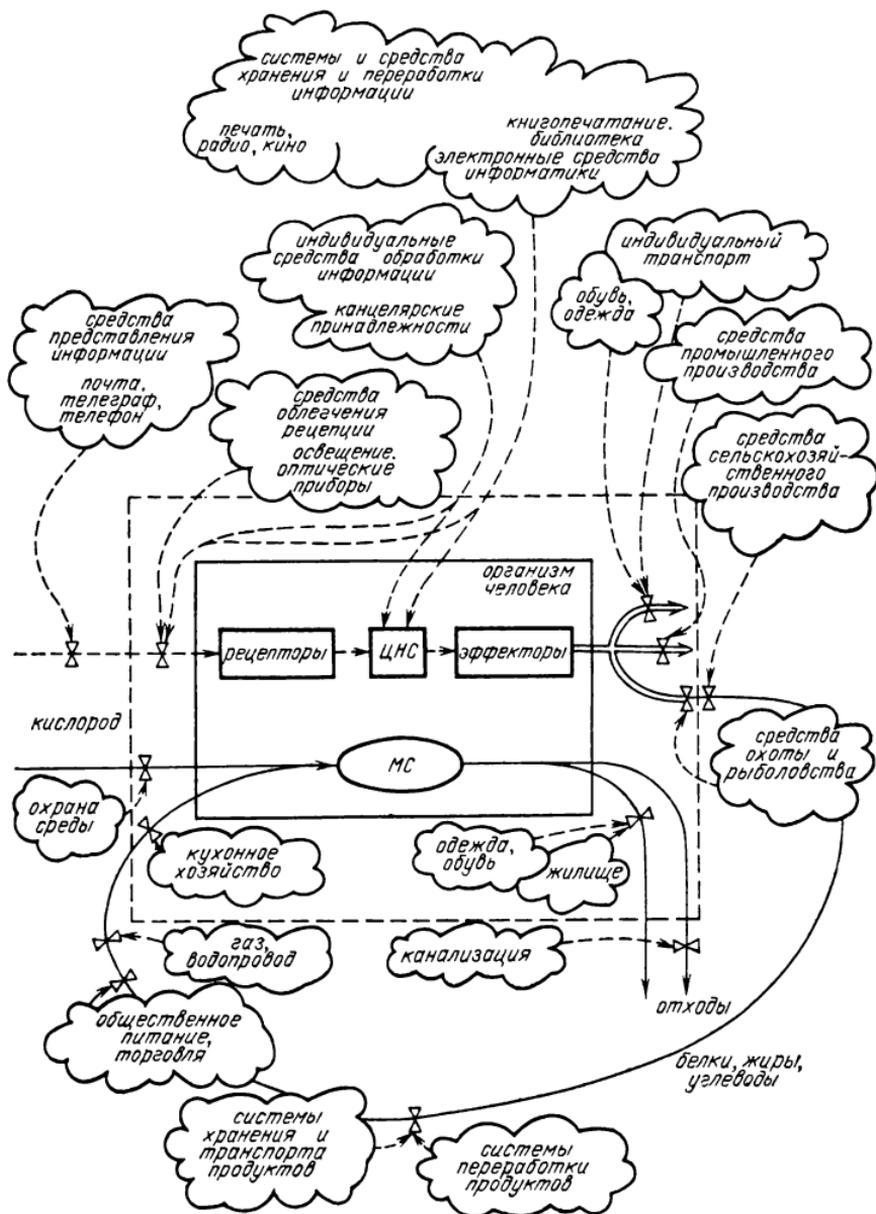


Рис. 48. Организм в мире техники.

Структура машинного мира, созданного руками человека, продолжает и развивает структуру организма, расширяя сферу его возможностей и способностей

этот запомнился главным образом потому, что студент вынужден был повысить голос, чтобы перекричать шум пролетавшего над зданием самолета...».

А до самолета были колесницы древнего мира и кареты эпохи абсолютизма, воздушный шар Монгольфье и пароход Фултона... И велосипед. Изобретение велосипеда означало еще одну — пусть небольшую — победу над ограничениями, налагаемыми законами природы.

Вспомните рис. 45 на стр. 147: переход человека к прямохождению увеличил необходимые для перемещения тела энерготраты примерно вдвое по сравнению с четвероногими животными такой же массы. Но прямохождение освободило руки, дало толчок работе мозга, начался процесс экзоэволюции — и был изобретен велосипед, вшестеро снижающий расход энергии на перемещение в пространстве.

На рис. 45 поэтому и была поставлена звездочка — это расход энергии для человека на велосипеде.

Пример, конечно, тривиален, но я просто не знаю, как можно с такой же наглядностью отразить экономичность других транспортных средств, будь то закованный в латы конь средневекового рыцаря или современный поезд на магнитной подушке. Читатель сам может поразмышлять на эту тему, разглядывая рис. 48.

Кстати, из рисунка видно, что экзосоматический прогресс коснулся в большей мере информационно-кибернетических функций организма, и в существенно меньшей — его метаболической сферы. Напомним, что мы рассматриваем в этой книге только технические аспекты аналогии человек-машина. На более сложных вопросах социально-экономических аналогий мы не останавливаемся, хотя они и занимали творцов кибернетических концепций в организменной регуляции. Вспомним хотя бы, что заключительный раздел главной книги У. Кеннона назывался «Отношения биологического и социального гомеостаза»...

Итак, сегодня организм в представлениях биохимиков и кибернетиков во многом аналогичен сложному биохимическому производству, где основная продукция выдается биохимическими «цехами» под генетическим контролем, транспортные функции и снабжение обеспечивается физиологическими системами, а общее руководство, как текущее, так и перспективное, поручено информационно-кибернетической системе и психике.

Конечно, такой подход во многом сужает сферу возможных аналогий между организмом и машиной — объектом, созданным руками человека, ограничивая ее относительно простыми экономическими и производственными системами. Но и в этой области легко прослеживаются интересные, а порой и достаточно глубокие параллели.

Карл Маркс, рассматривая особенности мануфактурного производства, заметил эту аналогию и, ссылаясь на «Происхождение

видов» Дарвина, подчеркнул приспособленность органов человека и используемого инструмента к выполняемым человеком производственным функциям.

Многие принципиальные положения, касающиеся управления в организме, были прослежены К. Марксом и в мануфактурном производстве*). Так, в предыдущих разделах большое внимание мы уделяли соотношению, существующему между двумя целями управления в живых системах, — управлению темпами жизненных «производственных» процессов и поддержанию постоянства внутренней организменной среды — гомеостаза. Тогда удалось выяснить, в частности, что гомеостаз в организме можно трактовать как один из наиболее простых способов достижения основной цели управления — обеспечения нужной для жизни интенсивности обменных процессов.

Так вот, аналогичная ситуация складывалась и в мануфактурном производстве. «Совокупный механизм мануфактуры покоится на том условии, — пишет Маркс, — что в данное рабочее время должен быть достигнут данный результат. Лишь при этом условии различные дополняющие друг друга процессы труда могут совершаться непрерывно, один рядом с другим во времени и пространстве... Изготовление данного количества продукта в течение данного рабочего времени становится техническим законом самого процесса производства**).

Поддержание должных темпов производства, согласованность скоростей всех процессов — главная задача управления производством, «технический закон производства». А как же гомеостаз? Смысл гомеостаза, конечно же, ясен и для мануфактурного производства: это постоянство всех внутренних для производства условий. Нужен ли он при мануфактурном производстве и если нужен, то зачем? Способствует ли он согласованности всех темпов рабочих процессов — т. е. получению главного результата управления?

«Этот результат достигается... лишь несовершенно, так как мануфактура не в состоянии точно контролировать общие химические и физические условия производственного процесса», — заключает К. Маркс. Современные технологические процессы предусматривают значительно более жесткий контроль за состоянием рабочей среды (химического состава и чистоты сырья и воздействующих агентов, состояния микроклимата в производственных цехах — температуры, влажности, содержания пыли и т. п.), что вполне аналогично поддержанию гомеостаза организма и преследует те же «оптимизационные» цели — уменьшение брака, постоянство качества изделий и т. д., а в итоге — получение «на выходе» производственных цепочек должных темпов производства продукции.

Остается, правда, неясным, можно ли — по аналогии с организменными процессами — использовать «нарушение» гомеостаза как «последний резерв» производства, чтобы в крайнем случае поддержать должные темпы производственных процессов.

Если сузить рамки рассмотрения соотношений «организм—машина» еще больше и от аналогий между процессами в них перейти к параллелям в отдельных технических средствах, выполняющих в живых системах и в тех-

*) М а р к с К. Собр. соч. Т. 23. — С. 358.

нических системах одни и те же функции, то мы окажемся в другой очень интересной области аналогий.

И аналогии эти, в отличие от параллелей более общего характера, имеют уже не только общетеоретическую значимость, но и приобретают выраженный практический смысл в связи с появлением реально работающих биотехнических систем — систем, в которых «аналогичные» органы естественных биологических и искусственных технических устройств сопрягаются, стыкуются и работают вместе, так что нужные результаты получаются в ходе тесного сотрудничества систем организма и их технических аналогов.

5.3. Биотехнические системы

В современной жизни с примерами взаимодействия систем организма и различного рода техническими средствами мы сталкиваемся буквально на каждом шагу. На одном полюсе здесь находится клетка в искусственной питательной среде, а на другом — проблемы сохранения экологической среды от губительных последствий промышленного производства. Человек настолько привык к повседневному общению со средствами облегчения, поддержки и сохранения жизненных процессов, что использование одежды и обуви, огня, жилища и транспортных средств никому и в голову не приходит считать биотехническими проблемами.

А между тем дело обстоит именно так: человек плюс его жилище, человек плюс его одежда и т. п. — в общем случае такие комплексы являются биотехническими. И инженер, разрабатывающий жилище, должен согласовывать его характеристики с биологическими потребностями человека-обитателя. Хорошо, если это обычный дом, — тогда особых трудностей при проектировании встретиться не должно. А если это подводное жилище для акванавта или кабина космического корабля? В любом случае выполнение гигиенических требований является обязательным условием правильного решения задачи конструирования обитаемых конструкций — будь то средства индивидуальной защиты (скафандр космонавта и водолаза, снаряжение пожарника), спасательные средства для моряков и летчиков, кабины современных самолетов и космических кораблей, жилища полярников и акванавтов, наконец, квартиры, общественные помещения и подземные туннели в современном городе.

Но наиболее очевидную область взаимодействия биологических систем (например, организма человека) и технических средств самого разного характера представляет собой медицина сегодняшнего дня. Медицинское приборостроение, в частности, во всем мире становится одной из самых быстроразвивающихся и перспективных отраслей производства, наряду с такими «престижными» отраслями, как авиакосмическая и электронная промышленность. Технические средства широко используются как в диагностике (вспомните хотя бы рентген или даже просто процедуру взятия крови из пальца), так и на всех последующих этапах контроля и лечения (здесь хотелось бы упомянуть не только нож хирурга, но и аппараты Илизарова для сращивания костей, гипербарические камеры и лазерные установки для операций на хрусталике).

А наиболее сложные комплексы медицинского назначения, состоящие из тесно взаимодействующих биологических и технических частей, используются для замены органов человеческого организма. Это протезы двигательных органов с биоэлектрическим управлением, автоматические дозаторы лекарственных веществ и особенно вспомогательные и искусственные внутренние органы (такие, как аппараты искусственного дыхания, системы вспомогательного и искусственного кровообращения, искусственная почка и другие средства очистки крови, искусственные аналоги поджелудочной железы).

Технические средства в составе биотехнических систем, применяемые в медицине, чаще всего облегчают работу отдельных естественных органов больного организма или заменяют их. Но они могут использоваться и для замены сразу нескольких органов или систем — таков, например, аппарат «сердце—легкие», который во время хирургических операций выполняет функции дыхания и кровообращения одновременно.

В задачах медицинской диспансеризации и массовых осмотров населения технический компонент системы — диагностическая аппаратура — взаимодействует уже с целыми группами населения, способствуя выявлению заболеваний на самых ранних их стадиях.

В целом схему применений биотехнических комплексов в медицинской сфере можно изобразить так, как показано на рис. 49. Возможности технического компонента в биотехническом комплексе достаточно разнообразны — от простых информационных функций и роли советчика до выполнения обязанностей физиологического управ-

ляющего механизма в организме человека. По вертикали показаны разные уровни организации биологических систем, входящих в комплекс, — от отдельной клетки до популяций и экосистем (а может быть, и общества в целом).

Ясно, что биотехническим комплексам диагностического типа свойственны лишь односторонние связи — от биологического к техническому. В мире выпускается несколько тысяч различных приборов, которые формируют биотехнические комплексы с каким-либо видом связи с пациентом. В последние годы технические средства медицинской диагностики сделали резкий скачок в своем

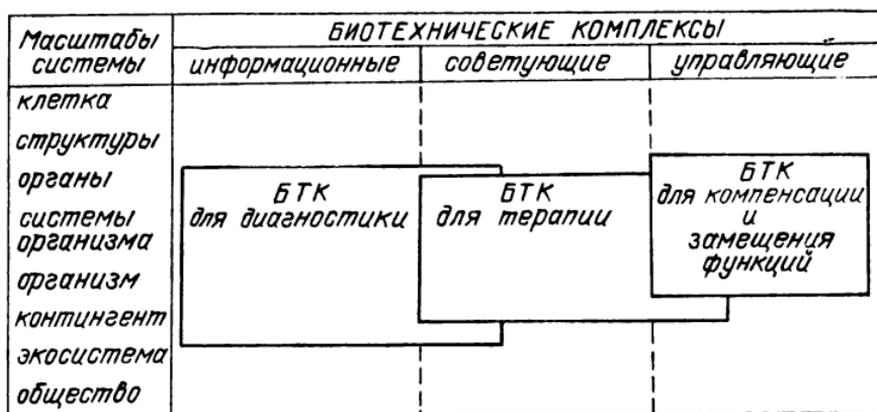


Рис. 49. Применение биотехнических комплексов.

В зависимости от решаемых задач такие комплексы включают в себя в качестве биологической компоненты биосистемы различного уровня

развитии, что прежде всего связано с изменением ситуации в медицинской диагностике: широким распространением среди медиков мнения о необходимости комплексного подхода к диагностике. Для диагноза часто требуется получение такого большого числа разнообразных признаков, что применение технических средств их получения и обработки стало насущной необходимостью.

В современных биотехнических диагностических комплексах используется информация, получаемая по следующим каналам:

- электромагнитное излучение органами и телом человека практически во всех частях спектра;
- видеосигналы, аудиосигналы и тепловое излучение;
- химические воздействия (пробы);
- механические воздействия (пробы);
- психо-фармакологические воздействия.

Наиболее эффективным диагностическим средством, однако, оказались устройства электрофизиологического типа, они и получили самое широкое распространение. Их дополняют рентгеноскопия, ультразвуковая локация, гамма-томографические системы.

Все это наиболее типичные примеры диагностических систем сегодняшнего дня.

Что касается видеосигналов, то выдающимся техническим достижением последних лет стало создание гибких эндоскопов — устройств, позволяющих наблюдать состояние внутренних полостей организма без оперативного вмешательства.

Более высокая роль технических средств в биотехнических комплексах связана с расширением их возможностей, когда в задачах диагностики они не только предоставляют информацию врачу, но и производят ее обработку вплоть до постановки предварительного диагноза. В этом случае технические средства выступают в роли своеобразного «советчика» врача.

Широкое поле применения в медицинской практике найдут (и уже находят) биотехнические комплексы при наблюдении за пациентами, находящимися в тяжелых состояниях (послеоперационный период, шок), или за организмом здорового человека (глубоководные погружения за привычный уровень глубин в 60 м, невесомость и т. д.). Такие биотехнические комплексы иногда называются системами мониторингового наблюдения. Степень сложности их различна, так что среди мониторинговых систем можно выделить и «советующие» системы, и биотехнические комплексы, выполняющие какие-то элементы автоматического управления состоянием организма.

К первым относятся распространенные системы индикации параметров жизненно важных систем организма, ко вторым — комплексы автоматического поддержания глубины наркоза или автоматические системы вентиляции легких, применяемые в ходе хирургических операций.

Наиболее сложными биотехническими системами можно без всяких сомнений считать современные искусственные внутренние органы — устройства, позволяющие заменять техническими аналогами жизненно важные функции человеческого организма. Но эти системы настолько специфичны, что здесь мы не будем их рассматривать — это пришлось бы сделать по необходимости кратко, — а оставим до специального параграфа.

Мы привыкли считать, что помощь медика нужна чаще всего больному организму. Однако современная жизнь, связанная с необходимостью производственной деятельности человека в таких непривычных, а часто и экстремальных условиях, как арктические и антарктические регионы, глубокий космос и необъятные пространства континентального шельфа, работа аварийных и спасатель-

ных бригад, все чаще заставляет вводить медицинский контроль и медико-техническое обеспечение жизни и деятельности здорового человека. Часто задача управления состоянием человека-оператора, находящегося в таких условиях, оказывается связанной с самыми разными механизмами воздействия на организм, включая и технические средства.

Так, для обеспечения длительной работоспособности летчика или космонавта (часто речь идет о непрерывной работе в течение 24—30 ч подряд) используются следующие способы и средства управления:

- индивидуальная регламентация периодов труда и отдыха;
- физиолого-гигиенические средства (включая регуляцию параметров среды обитания);
- психогенные средства и методы (психосоматическая саморегуляция);
- электрофизиологические средства (электростимуляция нервно-мышечного аппарата организма, воздействие на его активные точки);
- фармакологические препараты (транквилизаторы, стимуляторы деятельности центральной нервной системы);
- физические процедуры (массаж, сауна, гидропроцедуры).

Пока что такие задачи управления решаются в экспериментальных исследованиях, но комплексы биологических и технических средств для обеспечения жизнедеятельности и работоспособности здорового организма получают все большее распространение. Поэтому и они заслуживают отдельного параграфа, который ждет читателя ниже.

А пока продолжим рассказ о разных сферах организации биотехнических систем и комплексов. Наиболее близки медицинским комплексам, работающим с целостным организмом, устройства поддержания жизни отдельных органов или их систем, выделенных из организма. Так, если какой-то орган — сердце, почка — ожидает пересадки в организм больного человека, то он содержится в специальных контейнерах, где ему создаются условия, максимально приближенные к внутриорганизменным. Можно сказать, что в этом случае гомеостаз «внутренней среды» для консервируемого органа целиком поддерживается — плохо или хорошо — искусственной системой биотехнического типа.

Биотехнические системы типа контейнеров с поддержанием жизненных условий для содержащихся таким образом органов могут использоваться и для промышленного производства ряда ценных веществ, которые может производить только организм. Продолжая функциониро-

вать вне организма, такие органы будут синтезировать те же продукты, что и в организме, — адреналин, инсулин и т. п. Сейчас в этой области ведутся интенсивные исследовательские работы и получены первые результаты.

Наконец, для производства многих кормовых белковых веществ, лекарственных препаратов и других соединений используются популяции микроорганизмов, живущие в промышленных установках — ферментерах.

Как внимательный читатель, должно быть, уже заметил, мы касались прежде всего таких систем, где взаимодействие организма и технических средств происходило, так сказать, на нижнем уровне иерархической организации живых систем — метаболическом. Получение питательных веществ, воды, кислорода, сохранение теплового состояния, отведение продуктов обмена — вот та область, в которой работают искусственные органы, защитное снаряжение. Сюда же можно отнести и поддержание жизнедеятельности популяций микроорганизмов в технической среде.

В значительно меньшей степени мы касались другой области взаимодействия систем организма с техникой — сферы кибернетических функций. Напомним, что организм как система, выполняющая совокупность метаболических и кибернетических функций, рассматривалась в разделах гл. 2, а его схема — все та же схема рис. 4, которой мы пользовались, когда анализировали различные аспекты технической вооруженности человека на необитаемом острове — Робинзона.

Как же согласуются системы организма с техническими средствами, если иметь в виду возможность такого взаимодействия на уровне кибернетических и метаболических функций? Попробуем разобраться в этом подробнее.

Начнем со взаимодействия на кибернетическом уровне организменных функций. С такой ситуацией придется сталкиваться прежде всего при анализе производственных систем, когда человек-оператор управляет сложными промышленными установками (энергостанциями, транспортными средствами, производственными агрегатами). Такие системы представляют собой, очевидно, частный случай биотехнических систем и называются они эргатическими системами. Наиболее часто этот термин встречается применительно к сложным диспетчерским проблемам (управление вокзалом, аэропортом и т. п.).

В эргатических системах человек-оператор выполняет свои функции в качестве одного из элементов (хотя и очень важного) технической системы. Человек должен воспринимать информацию о ходе процессов в обслуживаемой им системе, принимать адекватные решения и исполнять их (или давать команду на их исполнение). Круг задач, характерных для эргатических систем, включает разработку средств автоматизации обработки входной информации, создание методов и технических средств представления такой информации человеку-оператору, создание вспомогательных систем-советчиков для облегчения процесса принятия решений, контроль за текущим состоянием человека-оператора, анализ различных режимов работы человека как звена управляющей системы (режим

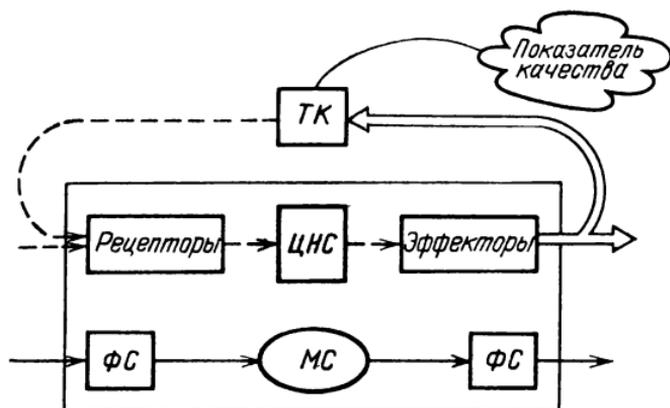


Рис. 50. Взаимодействие человека и машины в системах эргатического типа.

Информационно-кибернетические системы организма используются для управления машиной — техническим компонентом ТК. Качество такой человеко-машинной системы определяется тем, насколько хорошо функционирует ее техническая часть, машина. ТК — технический компонент, МС — метаболическая система, ФС — физиологические системы

супервизора, режим управления и т. д.). Ясно, что из всех систем организма «работает» в эргатических системах только цепочка «эффекторы-ЦНС-эффекторы».

На рис. 50 показано, как происходит стыковка организменных элементов с технической компонентой биотехнических систем эргатического типа. Обозначения здесь очень просты — ТК означает «технический компонент».

Взаимодействие человека и машины в эргатических системах направлено на решение одной из двух принципиальных задач — это или принятие решений, или управ-

ление. Принятие решений — исключительно внутренний процесс, протекающий в организме человека и не проявляющийся вовне.

А под управлением при анализе таких систем обычно понимают несколько более широкую область деятельности, чем в тех задачах теории управления, о которых мы говорили в разделах гл. 3. Здесь управление — это выбор общей цели (на данный отрезок времени или на данный этап процесса), ее детализация, получение по ходу управления необходимой информации, переключение режимов работы и т. п. Управление всегда реализуется путем внешних действий, через эффекторы человеческого организма. Эти действия непосредственно влияют на динамику управляемого технологического процесса.

Описание процессов принятия решений — за пределами настоящей книги. Мало того, и часть процесса управления (та, которая выходит за рамки «классической» теории управления) представляет для описания большие трудности. Поэтому мы можем показать здесь, как описываются формально только динамические процессы в системе, состоящей из двигательного аппарата человеческого организма и технической системы, которая этими движениями управляется.

Эта ситуация иллюстрируется схемой рис. 51. Сразу скажем, что она сродни тем простым схемам, о которых говорилось, например, в разделе 3.2 (см. стр. 62). На рис. 51 зрительные рецепторы организма также воспринимают сигнал рассогласования ϵ ; константа

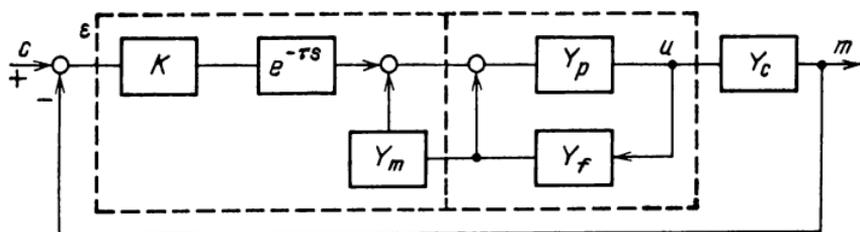


Рис. 51. Модель биотехнической системы эргатического типа. Биологические и технические элементы в системе описываются в модели единообразно: как для тех, так и для других нужны только характеристики их динамических свойств

K — величина, характеризующая такую рецепцию, а τ — запаздывание в ЦНС, связанное со зрительными процессами, проведением импульса по нервным волокнам и т. д. Далее, Y_p — передаточная функция органа, который управляет механизмом (рука, нога), Y_f и Y_m — передаточные функции, моделирующие динамические свойства мышечных волокон и высших уровней обработки сигнала — проприоцептивную обратную связь. Остальные переменные

на рисунке характеризуют механическую часть биотехнической системы: Y_c — передаточная функция механического исполнительного устройства, s — входной, а m — выходной сигналы в задаче слежения, u — сигнал управления. Символ s — переменная преобразования Лапласа.

И из этого рисунка видно, что в эргатических системах человек работает как подчиненный элемент системы. Его деятельность направлена на то, чтобы достичь заданных характеристик протекания процессов в машине. Можно сказать, что эргатические системы — это системы, где не машина обслуживает человека, а человек машину. Конечно, вся техника служит человеку, но только опосредованно. А непосредственно деятельность человека в таких системах идет в соответствии с выводом: «организм для техники».

Другой тип взаимодействия биологического и технического компонентов биотехнических систем возникает в тех случаях, принципиально отличающихся от рассмотренных выше, когда техника включается в состав комплексов для того, чтобы восстанавливать или корректировать функции живых систем. Противопоставляя такие ситуации положению дел в эргатических системах, можно назвать подобные комплексы «техникой для организма».

Коррекция функций организма, входящего в состав биотехнической системы, может производиться как на кибернетическом, так и на метаболическом уровне. Во втором случае организм входит в состав биотехнических систем своими физиологическими механизмами доставки и выведения веществ, а также биохимическими механизмами их переработки. Основную роль здесь играют, однако, физиологические механизмы — именно они, как было выяснено в свое время (см., напр., табл. 3 на стр. 21) ответственны за обмен веществами с окружающей средой. Организм, представленный своими физиологическими системами, играет в биотехническом комплексе роль управляемого объекта (обладающего, впрочем, и своими собственными механизмами управления). Качество комплекса, включающего физиологический и технический компоненты, определяется теперь тем, насколько хорошо функционирует его физиологическая часть, попросту говоря, сам организм. Так, эффективность работы искусственного сердца определяется тем, хватает ли его регуляторных возможностей для обеспечения нормального существования организма, в который оно встроено.

Точно так же происходит дело и с включением искусственных органов для коррекции или восстановления функций на кибернетическом уровне. Качество протезов органов движения оценивается по тому, насколько хорошо восстанавливается двигательная функция.

Чтобы отличать тип биотехнических систем, в которых «машина служит организму», от эргатических систем, в которых «организм служит машине», первый тип систем называют инженерно-физиологическими системами.

В инженерно-физиологических системах функции биологического компонента (организма или его частей) могут оказаться значительно более разнообразными, чем в эргатических. Это связано с тем, что организм играет в них роль активного объекта, выполняющего весь круг жизненных явлений. Так, если в состав организма включается какой-то один орган технической природы, его введение должно не только восстановить соответствующую — довольно-таки узкую — функцию, но и сохранить в неприкосновенности все остальные функции. Значит, круг вопросов, которые надо решать в инженерно-физиологических системах, сразу же выходит за пределы той специфической функции, о которой идет речь при постановке задачи протезирования.

Происходит это потому, что любое — казалось бы, и не очень существенное — вмешательство в функционирование организма оказывает многочисленные «побочные действия», подчас незапланированные.

Задачей искусственных клапанов сердца, например, является обеспечение полного выброса крови из сердца. Однако вживление первых конструкций таких клапанов показало, что они являются таким местом в организме, где часто образуются тромбы — небольшие сгустки крови. Тромбообразование опасно тем, что, оторвавшись, такой сгусток может достичь какого-то узкого сосуда и закупорить его. Пришлось сугубое внимание обратить не только на конструкцию клапанов, но и на способы их соединения с тканью сердца, на выбор материалов клапанов, тщательность их изготовления и т. д.

Другой пример. Технические средства очистки крови предназначены для выполнения функции почек — выведения «отходов» биохимического производства организма. Однако вскоре обнаружилось, что в некоторых случаях искусственная почка способствует излечению ряда заболеваний — даже таких, как определенные формы психозов.

Из-за сложности функций, которые выполняют организм и его системы в составе инженерно-физиологических комплексов, приходится при изучении биологических систем применять более сложные формы математического

описания. Модели систем организма, применяемые для исследования процессов в инженерно-физиологических системах, часто должны включать обменные процессы. Тогда мы возвращаемся к тем самым формам представления организма в виде совокупностей источников, компартиментов, потоков и стоков, о которых говорилось в разд. 2.3—2.5.

Общую схему взаимодействия физиологических систем организма с техническими элементами можно представить себе следующим образом. Рассмотрим схему

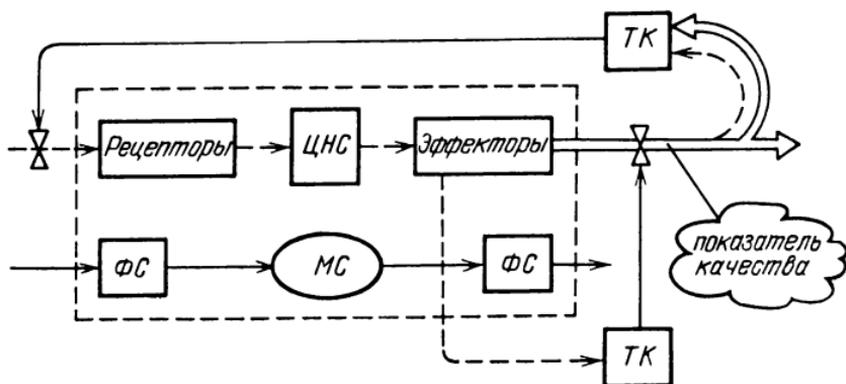


Рис. 52. Инженерно-физиологическая система для коррекции кибернетических функций организма.

Технические компоненты включаются так, чтобы восстановить или расширить возможности входных или выходных каналов информационно-кибернетической части организма. Они или способствуют процессам получения информации организмом (на рисунке — канал управления в верхней части), или же непосредственно включаются в процессы рабочей активности (на рисунке — нижний канал). В обоих случаях результат оценивается по характеру и качеству действий самого организма. Например, при подборе очков у глазного врача эффект коррекции зрения оценивается по ответам пациента. Обозначения те же, что на рис. 50

включения технических компонентов для протезирования рецепторных или эффекторных систем организма (рис. 52). Эта схема может работать как при разомкнутой, так и при замкнутой обратной связи.

С обратной связью работают, например, схемы так называемой «биологической обратной связи» — biofeedback. В системах биологической обратной связи технические средства используются для того, чтобы дать пациенту возможность следить за качеством выполнения таких функций, которые в противном случае выполняются бесконтрольно. Например, у человека после мозговых травм может нарушиться координация движений. Чтобы скорее и эффективнее восстановить ее, информацию о характере мышечных усилий можно превратить в визуальную форму и представить пациенту на экране дисплея — например, на простом телевизионном экране. «Подгоняя» образ картинки на экране под заданный врачом образец, пациент быстро улучшает свои двигательные возможности.

Без обратной связи включается большинство более простых систем, обеспечивающих информационный обмен — очковая оптика, разного рода приборы дальновидения и ночного видения.

Эта же схема охватывает протезы двигательных органов, включая манипуляторы и экзоскелетоны. Последние представляют собой устройства (впрочем, не получившие широкого распространения), упрочняющие опорно-двигательный аппарат человека и увеличивающие его мощность при сохранении естественной способности человека управлять своими движениями. Качество таких систем, как и прежде, определяется тем, насколько хорошо восстанавливаются функции организма или насколько расширяются их возможности.

Для поддержания процессов в метаболической системе организма с помощью технических средств применяется схема подключения, показанная на рис. 53. Эта схема

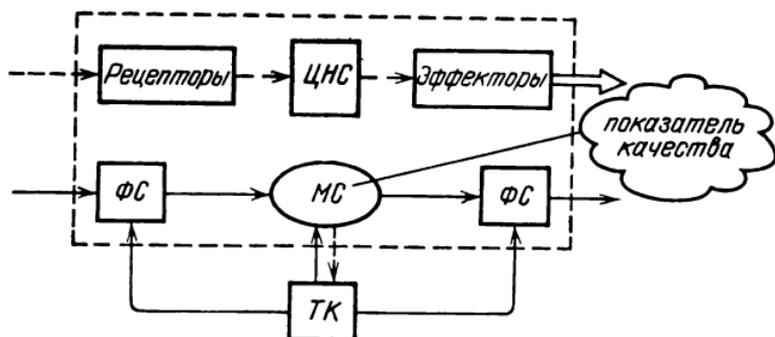


Рис. 53. Инженерно-физиологическая система для коррекции метаболических функций организма.

Техническая компонента, получая информацию о состоянии метаболической системы, корректирует потоки веществ, поступающих в организм или покидающих его. Результат совместных действий организма и машины оценивается по тому, насколько хорошо восстанавливаются функции организма. Обозначения те же, что и на предыдущих рисунках

также используется в двух вариантах — с обратной связью или без нее. Она характерна, например, для работы искусственных внутренних органов — искусственного сердца, кровообращения, систем дыхания, искусственной почки, сорбционных и фильтрационных аппаратов очистки крови, искусственных аналогов поджелудочной железы. По этой же схеме осуществляются процессы искусственного жизнеобеспечения с помощью средств индивидуальной защиты (например, тепловой). В таких случаях технические средства используются для создания

искусственных источников или стоков различных веществ и энергии, поступающих в организм или отводящихся от него, а также и для управления естественными потоками.

Таким образом, инженерно-физиологические системы, представляющие собой специфический тип биотехнических систем, призваны обеспечить восстановление или расширение физиологических функций организма, включенного в состав таких систем. Характеристики таких систем и комплексов поэтому оказываются тесно связанными с поведением физиологических систем в необычных для классической физиологии ситуациях, когда сама физиологическая система тесно взаимодействует с техническими системами — работает в инженерно организованной среде.

5.4. Инженерная физиология

Для создания эффективных инженерно-физиологических систем нужна интеграция знаний как в области физиологии и биохимии, так и в специфических областях теории управления. Одним из направлений, в которых такая интеграция происходит, и является инженерная физиология. Интересы инженерной физиологии связаны с изучением ситуаций, когда жизнь организма протекает не в естественных, а в искусственных условиях, которые, кроме того, специально предназначены для облегчения жизни, поддержания функционирования систем организма и обеспечения условий для производственной или другой деятельности человека.

В настоящее время инженерная физиология переживает ранний период своего развития — этап обобщения опыта работы отдельных групп специалистов, становление единых методов исследования, формирования задач и выделения собственного круга идей.

Можно выделить два аспекта инженерной физиологии — биологический (физиологический) и технический (инженерный). В биологическом плане инженерная физиология представляет собой естественное и логичное расширение классических физиологических представлений на новую область функционирования систем организма. Эта область определяется тем, что окружающая среда все чаще оказывается в той или иной мере технизированной, а введение механизмов управления в эту среду делает ее уже не пассивным окружением организма, а активным

«участником игры», реагирующим на состояние и действия организма.

Примерами функционирования систем организма в технически организованной среде является рабочая деятельность организма человека в сложных природных или производственных условиях (освоение арктических регионов, континентального шельфа и подводных пространств, работа в открытом космосе, современные химические производства и т. п.), спасательные службы (пожарные, специальные аварийные и ремонтные бригады), повседневное использование технических устройств жизнеобеспечения и поддержки (имплантируемые и носимые искусственные органы, сердечные стимуляторы — пейсмейкеры, дозаторы инсулина).

Специфика получения физиологических знаний в этих условиях требует существенно большего инженерного вклада в эксперимент, который касается не только планирования и автоматизации исследований, но и привлечения формализованных модельных представлений о процессах в физиологических системах и об их взаимодействии с техническими средствами жизнеобеспечения. Особую сферу физиологического эксперимента, требующего сложных технических средств обеспечения, представляют собой системы живущих изолированно от организма органов (сердца, печени, желез и др.).

Пожалуй, сегодня в инженерной физиологии преобладают не физиологические, а технические аспекты. В смешанных коллективах, которые ведут во многих научных центрах нашей страны работы в этой области, текущие задачи порой формируются не специалистами-физиологами и медиками, а инженерами и специалистами «системщиками». Целью исследований является прежде всего разработка технических средств для адекватного взаимодействия с физиологическими системами организма и для искусственного обеспечения условий их нормального функционирования. Физиологическая наука часто выступает здесь скорее как заказчик и потребитель технических конструкций.

Поэтому основное направление развития методов инженерной физиологии сегодня связано с описанием специфических функций физиологических систем на языке, свойственном технике, с желанием глубже понять и формально описать собственные цели физиологической регуляции в организме, разработать методы согласования технических средств и физиологических механизмов ре-

гулядии в организме и оценить, до какой степени и в какой мере утраченные или нарушенные физиологические функции могут быть заменены встроенными в организм техническими аналогами.

Последняя из упомянутых задач — оценка того, как меняются возможности организма, если он находится в технически организованной среде (ясно, что даже расположенные внутри организма технические устройства в какой-то мере остаются элементами внешней для организма среды), представляет сегодня, пожалуй, самое важное направление исследований в этой области. Работы здесь ведутся очень широко — даже краткий обзор биотехнических систем, данный в предыдущем разделе, достаточно говорит об этом. Растет объем критических наблюдений, позволяющих оценить возможности искусственных внутренних органов и систем жизнеобеспечения больного, развиваются автоматизированные средства обеспечения лечебного процесса. Возрастает опыт использования защитного снаряжения в открытом космосе и при освоении глубоководных пространств. Не последнюю роль играют здесь и усилия групп добровольцев-энтузиастов, подобной группе Д. Шпаро, совершающих под контролем специалистов высокоширотные экспедиции, переходы через пустыни и океаны. Вызов природе, который бросают участники таких экспедиций, также способствует расширению наших знаний о поведении организма в экстремальных ситуациях, суровых природных условиях.

Все большую роль в обобщении этих многогранных данных начинают играть формализованные методы — математическое моделирование и вычислительные эксперименты на ЭВМ. Основой их является все та же аналогия между системами организма и техническими средствами — и модельные исследования позволяют «продолжить» результаты экспериментальных исследований за пределы тех реальных условий, которые еще допустимы для человека, исключить риск для испытателя новой техники.

Отметим здесь еще одну особенность вычислительных экспериментов по выяснению возможностей инженерно-физиологических систем. Если реальные эксперименты с техническими средствами поддержания жизни, клинические наблюдения врачей за лечением больных с помощью технических средств с определенной степенью надежности могут дать ответ на вопрос о том, какие функции, в какой мере, до каких пределов могут быть восстановлены, то на вопрос противоположного свойства —

чего не могут обеспечить искусственные аналоги естественных органов — ответ может дать только теория и вычислительный эксперимент.

В определенном смысле искусственные аналоги естественных органов могут по своим характеристикам их превосходить. Дело здесь в следующем. Во-первых, биологически оправданная структура исполнительской части естественных регуляторных систем обычно очень экономна. Вспомним хотя бы концепцию адекватного конструирования биологических систем Н. Рашевского (с-р. 146). А «экономность» структуры с необходимостью означает ограниченность ее ресурсов. Так, возможности сердечно-сосудистой системы человеческого организма «рассчитаны» на нормальные физические нагрузки — сосудов в тканях ровно столько, сколько надо, чтобы при нормальном содержании кислорода в атмосфере обеспечить кислородное снабжение работающих органов (при физической нагрузке — прежде всего мышц). Сердце может выдать максимальный объем крови около 20—25 л/мин. Для технических аналогов сердца и сосудов таких пределов, очевидно, нет — конструктор в случае необходимости может запрограммировать сердечный выброс и 50 л/мин, была бы лишь в этом потребность.

Во-вторых, в организме работа регуляторных механизмов ограничена и возможными расходами энергии. Так, в обычных условиях организм человека продуцирует примерно 50 ккал/(ч·м²), что уравнивает теплотери, и температура тела поддерживается на нормальном уровне. При понижении температуры окружающей среды, когда человек начинает мерзнуть, теплопродукция увеличивается, но как бы ни была велика погрешность в тепле, теплопродукция не может увеличиться более чем до 150—200 ккал/(ч·м²). Этого может не хватить, если человек работает в условиях сильно охлаждающей среды: при работе водолаза, например, теплотери могут составить и 300 ккал/(ч·м²). Технические системы подогрева, используемые для поддержания теплового режима работающего на больших глубинах водолаза, имеют мощность, в десятки раз превышающие потребность организма в тепле.

Возникает вопрос: как распорядиться возможностями, которые дает техника, для расширения круга задач, решаемых естественными механизмами управления в организме человека? Каковы наилучшие характеристики системы «организм + искусственные системы поддержки»?

К чему надо стремиться, включая такие средства в системы обеспечения жизни в условиях клиники или при работе человека в неблагоприятных условиях среды?

Ответов на эти вопросы пока нет, но накопленный опыт уже сегодня позволяет сделать определенные выводы.

Среди физиологов, специализирующихся в области экстремальной физиологии, и среди медиков, работающих с искусственными внутренними органами и автоматизированными системами, часто можно встретить с такой точкой зрения, что включение искусственных систем в сферу организма должно способствовать восстановлению тех характеристик, которые имел организм в нормальных условиях. Тем самым конструктор и специалист-«системщик», проектирующие искусственные органы, средства поддержания жизни, защитное снаряжение, ориентируются на копирование образцов, данных природой организму.

Эта точка зрения сегодня вполне оправдывает себя по двум следующим причинам: во-первых, по интуитивным представлениям о том, что структуры систем и алгоритмы их управления в организме в каком-то смысле оптимальны и превзойти их нельзя, и, во-вторых, из-за отсутствия достаточного опыта, достаточных экспериментально обоснованных или теоретически доказанных альтернативных решений, позволивших бы усомниться в обоснованности этой позиции.

И, кроме того, такая позиция наилучшим образом соответствует основной заповеди врачей — «не вреди», так как дает определенную уверенность в том, что технические средства помощи организму больного будут работать так же, как его естественные прообразы, и ничего непредвиденного произойти не может.

Итак, с одной стороны, появляется надежда, что технические средства в чем-то могут и превзойти свои биологические прототипы, а с другой стороны выясняется, что в некоторых ситуациях принципиально нельзя восстановить положение, существовавшее до того, как потребовалось использование технических средств коррекции.

Сначала — о том, что эффективность технических средств может превышать соответствующие возможности естественных механизмов.

Известный специалист-орнитолог Н. Тинберген в книге «Мир серебристой чайки» приводит результаты своих исследований по моделированию реакций птенцов, выпрашивающих пищу у родителей. Родителей они узнают по сочетанию некоторых признаков

«ключевого раздражителя» — птенцы клюют красное пятно на кончике клюва родителей. В экспериментах Тинберген использовал раскрашенную гипсовую голову, которая по эффективности не уступала настоящей. А искусственная система, заменившая такую модель, — длинный, похожий на гвоздь стержень красного цвета с тремя белыми полосками на конце — вызывал реакцию птенцов даже чаще, чем прямая модель естественного аналога.

Другой пример — уже из области физиологии организма. В разд. 3.7 мы подробно рассмотрели процессы удовлетворения потребностей организма в энергии и, в частности, систему регуляции глюкозы крови (стр. 85). Если в организме недостаточно инсулина, то характер ответной реакции меняется — выброс уровня глюкозы увеличивается, снижение его затягивается, стационарное значение этого уровня становится выше нормы. В частности, такая ситуация возникает при заболевании сахарным диабетом.

Для лечения сахарного диабета применяются автоматические средства введения инсулина в организм, в наиболее сложных конструкциях для организации процесса введения используется датчик уровня глюкозы крови, на показаниях которого основаны специальные алгоритмы введения инсулина. Например, в приборе типа «Биостатор» использованы алгоритмы, дающие реакцию глюкозы крови в ответ на поступление пищи такую же, что и в здоровом организме.

Эксперименты, проводимые на ЭВМ, показывают, однако, что если увеличить «усиление» в канале обратной связи, то можно не только привести к норме, но и как угодно снизить пик выброса, в пределе — даже до нуля, так что глюкоза крови после приема пищи вообще не будет повышаться (рис. 54).

На каком варианте остановиться? С одной стороны, очевидно, надо устранить диабетический характер реакции. Но почему надо останавливаться на «нормальном» типе кривой? Нужен ли организму период повышенного уровня сахара крови для каких-то особых фаз метаболических процессов или это следствие несовершенства эволюционно сложившихся механизмов регуляции углеводного обмена? Достаточного ответа на этот вопрос пока нет, и специалисты-техники, разрабатывающие подобные приборы, ориентируются на нормальный тип кривой. Правда, наиболее распространенный сегодня алгоритм, используемый в «Биостаторах», — алгоритм Майлса — дает все-таки несколько меньший выброс уровня глюкозы по сравнению с нормой.

Возможности расширения сферы жизненной активности человека особенно хорошо можно проследить на примере системы терморегуляции, как естественной, так и при использовании технических средств защиты. Известно, что именно температурные ограничения долго служили

основным препятствием в освоении арктических и антарктических регионов. Правда, охлаждающее действие среды зависит не только от окружающей температуры, но и от силы ветра или — если человек находится под водой — от скорости перемешивания. В космосе, где температура близка к абсолютному нулю, организм в защитном снаряжении приходится защищать не от охлаждения, а от

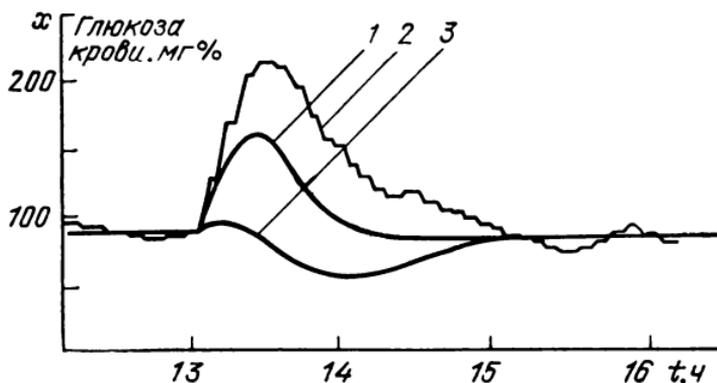


Рис. 54. Различные типы ответных реакций организма на поступление глюкозы.

У здорового человека повышение уровня сахара крови составляет около 150 мг % и длится полчаса — час (кривая 1). У больного диабетом выброс кривой обычно выше, а переходный процесс длится дольше (кривая 2). С помощью приборов типа «Биостатор» можно добиться у больного «нормальной» реакции (1), но если изменить алгоритм управления в приборе, можно устранить реакцию вообще (кривая 3). Сегодня не ясно, какое решение наиболее приемлемо с точки зрения организма

перегрева из-за мощного солнечного излучения. Мы ограничимся пока рассмотрением именно температурной шкалы как фактора, лимитирующего возможности жизни и работы человека.

Такая температурная шкала показана на рис. 55, где в качестве необходимых пределов жизнедеятельности выбраны значения температур от -100 до $+100$ °С.

Естественные механизмы терморегуляции обнаженного человека позволяют ему нормально функционировать в довольно ограниченном диапазоне температур, примерно от $+18$ до $+40$ °С, кратковременно же человек может переносить температуры в сухом помещении и до 120 °С. Поведенческие реакции (принятие на холоде защитной позы, согревание за счет физической работы, иногда использование тени на жаре) позволяют несколько расширить допустимый диапазон температур. Дальнейшее расширение условий нормальной жизни связано с простейшими средствами тепловой защиты — одеждой, обувью,

огнем, жилищем — в холоде, опашалами и вентиляторами — на жаре. Но полное освоение нужного диапазона возможно только при использовании мощных защитных средств, сочетающих пассивную защиту (теплоизоляцию от среды) — космический скафандр, снаряжение акванавта — с активными системами охлаждения или подогрева воздушного или водяного типа.

Беда, однако, состоит в том, что как бы ни были мощны технические средства, во многих случаях принципиально нельзя восстановить той ситуации, которая существовала

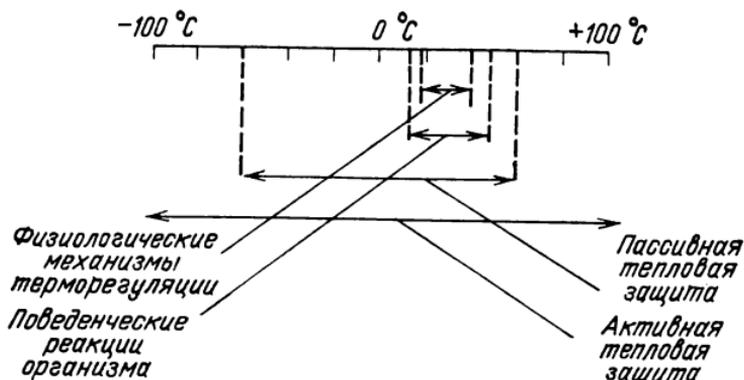


Рис. 55. Расширение терморегуляторных возможностей организма с помощью технических средств

в нормальных условиях. В той же системе поддержания теплового режима организма техника упирается в следующий факт. В норме основным источником тепла в организме является его «ядро» и мышцы, расположенные сравнительно глубоко в организме, так что складывается естественный перепад температур: самое теплое ядро — внутренние органы — затем подкожные ткани «оболочки», и самая прохладная кожа. При использовании искусственных средств согревания — в виде потоков теплой воды, других жидкостей или воздуха — основной теплоприток поступает через кожу, и естественный баланс нарушается, температура кожи поднимается «непривычно высоко» для организма. В результате может получиться так, что организм реагирует на попытку поддержать его тепловое состояние, спасти от переохлаждения, как на перегрев.

Такие ситуации наблюдались, в частности, в эксперименте, когда проводились испытания тепловых костюмов с водяным подогревом в условиях холода (рис. 56).

Значит, возможны ситуации, когда применение «очевидных» способов восстановления нужных режимов в организме с помощью технических средств не приводит к цели ни при каких режимах работы этих средств. Этот факт можно проиллюстрировать изящным математическим примером.

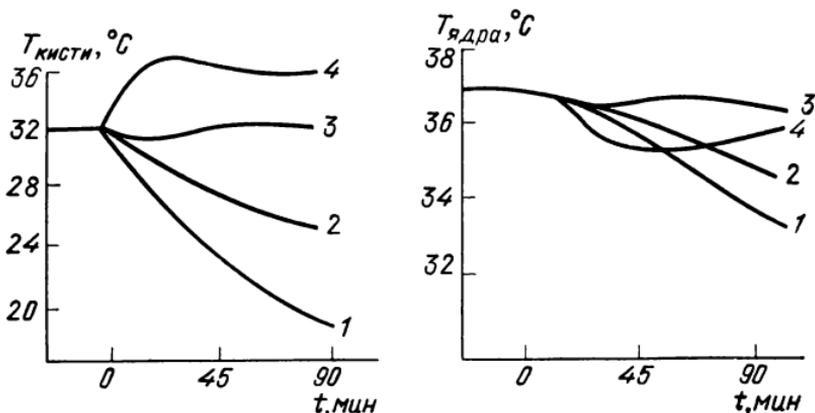


Рис. 56. Изменение температуры тела при различных режимах согревания.

Человек в теплозащитном костюме с водяным подогревом находится в камере при температуре воздуха — 25 °С. Цифрами обозначены следующие кривые: подогрев отсутствует (1), вода имеет температуру 33°, 38° и 43°С (соответственно 2, 3 и 4). Довольно неожиданный результат: при высоких температурах воды ядро тела не согревается, а охлаждается

Пусть рассматриваемая система организма описывается уравнением (2.7), рассмотренным на стр. 45:

$$\dot{x} = Ax + Bv + Pw, \quad (5.1)$$

где x — вектор состояния системы (набор переменных, определяющих состояние внутренней среды организма), v — вектор, описывающий внешние условия, w — вектор ведущих темпов, задающий текущую метаболическую активность организма. Матрицы имеют следующий смысл: A — внутренние взаимодействия между переменными состояния, B — влияние внешних факторов на внутренние переменные, P — распределение работающих органов организма, в которых происходит «сток» веществ или появление их в процессах метаболизма.

Пусть нормальное состояние организма достигается при $v = v_0$, $w = w_0$. Тогда стационарные значения вектора x определяются (при условии $\det A \neq 0$) соотношением

$$x^0 = -A^{-1}Bv_0 - A^{-1}Pw_0. \quad (5.2)$$

Рассмотрим ситуацию, когда при том же $w = w_0$ организм попадает в новые условия среды $v = v_1$, а для сохранения желаемого состояния организма используются технические средства защиты. Применение таких средств меняет величину элементов матрицы B ,

которая становится равной B_1 , так что новое состояние организма в стационарном равновесии становится равным

$$x^1 = -A^{-1}B_1v_1 - A^{-1}Pw_0. \quad (5.3)$$

Чтобы сохранить исходное состояние в изменившихся условиях, надо обеспечить выполнение соотношения $B_1v_1 = Bv_0$, что возможно только в том случае, если вектор B_1v_1 принадлежит пространству столбцов матрицы B :

$$B_1v_1 \in R(B). \quad (5.4)$$

При невыполнении соотношения (5.4) восстановление состояния, существовавшего в нормальных условиях, с помощью искусственных средств защиты в принципе невозможно.

Приведенный пример показывает, что (в математической постановке задачи) за счет адекватного выбора средств защиты можно полностью восстановить функции организма, нарушенные действием экстремальных факторов среды (при возвращении значений x к исходным). Но и в этом случае ответ на вопрос о том, надо ли стремиться к такому восстановлению, и если надо, то какой ценой, остается без ответа. Опыт свидетельствует и о том, что в определенных ситуациях вместо сложных, но адекватных условиям существования организма систем управления можно воспользоваться простыми способами управления функциями, если не обращать внимания на энергетические расходы, надежность систем и тому подобные факторы.

Интересным примером такого «упрощенного» подхода является эксперимент на животных с искусственным сердцем. Естественное сердце работает под контролем одной из самых сложных систем управления, имеющих в организме, что позволяет ему при незначительных (по сравнению с техническими системами такой же производительности) энергозатратах постоянно «следить» за текущими потребностями организма и поддерживать нужный кровоток. В технических устройствах искусственного кровообращения пока не удается реализовать такие тонкие алгоритмы, и идет интенсивный поиск возможных решений задачи управления искусственным сердцем, обеспечивающих нормальную жизнь животного.

В эксперименте хорошо отлажен такой вариант искусственного сердца, когда в организм животного помещается только насосное устройство, а остальные элементы конструкции — энергетический блок, блок управления и т. д. — помещаются вне организма. Таким образом, энергетические требования к сердцу снимаются, и конструктор может не экономить расходуемой энергии. Именно в таких условиях был опробован простейший алгоритм управления искусственным сердцем — работа с постоянной скоростью подачи крови, превышающей максимальную потребность организма.

Оказалось, что этот способ управления — фактически, его отсутствие — вполне пригоден для теленка, живущего и растущего в специальном «стойле», где он может ходить, лежать, есть и т. д. Теленок в течение многих недель сохраняет нормальную жизне-

деятельность, хотя, по всей видимости, какие-то его другие системы (в частности, сосудистая) принимают на себя возникающие перегрузки из-за постоянного превышения кровотоком потребного организму уровня.

Подведем итог рассмотренным примерам из разных областей работы инженерно-физиологических систем. Опыт, накопленный при их эксплуатации, говорит о том, что мы скорее учимся ставить вопросы о конструировании систем поддержания жизни и об алгоритмах управления ими, чем получаем на них ответы. И уж конечно, мы не имеем сегодня каких-то рецептов универсального характера.

Примеры из области управления углеводным обменом организма, применения искусственного сердца в эксперименте на животных, разработки индивидуальных средств тепловой защиты говорят не только о широком внедрении инженерно-физиологических средств и методов в разные сферы жизни и производственной деятельности современного человека, но и о глубоких проблемах, с неизбежностью встающих при работе над все более совершенными типами и образцами таких систем.

5.5. Искусственные внутренние органы

Одной из наиболее важных областей, в которых используется непосредственный контакт физиологических систем организма с техническими системами поддержки, является создание искусственных внутренних органов человека.

Во многих случаях чужеродные элементы искусственного происхождения, вводимые в организм человека для восстановления его нарушенных функций, лишь механически взаимодействуют с естественными тканями или органами. Очки и контактные линзы, протезы кровеносных сосудов и пищевода, соединительные штифты при переломах костей и простейшие протезы двигательных органов, конечно же, требуют согласования с естественными органами организма. Однако, будучи один раз подобранными, в дальнейшем они не нуждаются в специальном управлении.

Другое дело — замена сложных организменных систем, таких как сердце (частичная замена одного из желудочков или полная замена сердца), почки, поджелудочная железа, или помощь таким системам, как система дыхания или система поддержания теплового режима организ-

ма. В организме эти системы работают в рамках сложных систем управления; они и при замене должны получить регуляторные способности. Возникает задача управления искусственными аналогами внутренних органов.

Для организации управления техническими средствами в соответствии с потребностями организма такие средства включаются в систему механизмов естественной регуляции. Это относится как к устройствам, восстанавливающим информационно-кибернетические функции организма (протезы двигательных функций), так и к аппаратам, поддерживающим функции внутренних органов.

Если воспользоваться привычным для нас представлением организма в виде совокупности источников, потоков, компартментов и стоков (разд. 2.4), то нарушение функционирования внутренних органов означает либо невозможность для естественных механизмов управления поддерживать нужные темпы потоков в структуре организма (и как следствие этого — гомеостаз организма), либо нарушение этой структуры за счет выхода из строя каких-то источников или стоков.

Восстановить нарушенные функции можно поэтому двумя путями. Во-первых, корректировкой темпов потоков вещества и энергии в существующей системе источников и стоков без изменения ее структуры. Примером таких технических средств может служить пейсмейкер, который стимулирует пораженное сердце и обеспечивает его сокращения в нужном темпе. Во-вторых, возможно изменение самой структуры системы потоков веществ в организме за счет введения искусственных источников или стоков. В той же системе кровообращения примером искусственного источника может служить, например, имплантированный насос, заменяющий один из желудочков сердца. В системе углеводного обмена можно назвать автоматические дозаторы инсулина, включаемые в систему естественной регуляции такого обмена в случае заболеваний сахарным диабетом. Наконец, примером искусственного стока может служить аппарат «искусственная почка», выводящий из организма конечные продукты метаболизма.

Для устройств второго типа, заменяющих функции каких-то органов организма, часто используется обобщающий термин «искусственные внутренние органы». С точки зрения инженерной физиологии искусственные внутренние органы представляют собой ведомые источники и стоки в метаболической системе организма, управляемые

Таблица 7

Технические средства коррекции метаболических функций

Функция	Вещества	Технические средства
1. Доставка из среды веществ	<p>Субстраты: белки, липиды, углеводы, витамины, незаменимые аминокислоты</p> <p>Топливо: углеводы</p> <p>Окислитель: кислород</p> <p>Все вещества внутри организма</p>	<p>Технические средства искусственного питания</p> <p>То же</p> <p>Вспомогательные средства дыхания: аппараты искусственного дыхания (респираторы), оксигенаторы в аппаратах АИК</p> <p>Вспомогательные средства кровообращения: пейсмейкеры, массажеры, стимуляторы, автоматические дозаторы лекарств (антиаритмики), поддерживающие средства), системы вспомогательного кровообращения (сердечные шунты, аппараты внутриортогонального баллонирования, АИК), системы искусственного кровообращения (искусственные желудочки, полное искусственное сердце)</p>
2. Производство энергии	АТФ Прочие вещества	<p>Нет *)</p> <p>Автоматические дозаторы активных веществ, дозаторы инсулина («искусственная поджелудочная железа»)</p> <p>Автоматические дозаторы</p>
3. Обмен веществ		
4. Выведение конечных продуктов	Вода, углекислота Азот, креатинин, мочевины	<p>Аппараты искусственного дыхания (респираторы)</p> <p>Устройства очистки плазмы: гемосорбционные устройства (активированный уголь и другие сорбенты),</p>

*) Имплантируемые в организм или транскожные источники не могут обеспечить работу естественных органов организма; их энергия потребляется только искусственными внутренними органами.

Функция	Вещества	Технические средства
		аппараты гемодиализа и гемофильтрации (искусственная почка), приборы перитонеального диализа, приборы для плазмофереза

совместно физиологическими механизмами регуляции и специальными техническими средствами в соответствии с потребностями организма.

Само название искусственных внутренних органов не очень точно отражает существо дела: обычно технические устройства могут заменить какую-то одну функцию органа в организме, хотя, возможно, и самую характерную для него. Искусственное сердце, пожалуй, призвано заменить наибольший объем обязанностей своего естественного аналога. Искусственная почка, выводя из организма продукты обмена веществ, избыток солей и воды, чужеродные и токсические соединения подобно естественной почке, все же не участвует в регуляции состава крови. Когда автоматический дозатор инсулина называют искусственной поджелудочной железой, делают очень большую натяжку: кроме инсулина естественная поджелудочная железа выделяет в организм еще и поджелудочный (панкреатический) сок, другие гормоны — глюкагон, соматостатин и другие вещества.

Поэтому вместо красивого термина «искусственные внутренние органы» можно говорить и просто о технических средствах коррекции метаболических и транспортных функций организма. Эти функции в свое время были представлены в виде табл. 3 на стр. 21. Теперь можно продолжить эту таблицу, указав в ней технические аппараты и системы, используемые для помощи соответствующим естественным органам человеческого организма (табл. 7).

Начнем с главной транспортной функции физиологического комплекса организма — доставки из окружающей среды в организм нужных ему веществ. Доставка белков, углеводов, липидов, витаминов идет в организм через желудочно-кишечный тракт. Технические средства введения

питательных веществ, заменяющие естественный путь, применяются при сужении пищевода, после некоторых операций и т. д. Эти технические средства устроены достаточно просто, поскольку поступление пищи в организм происходит в нормальных условиях всего несколько раз в сутки. Раньше использовались зонды, а в последнее время получили распространение автоматизированные системы подкожного и внутривенного вливания (автоматические капельницы).

Норвежский мальчик Оле Фольдвик появился на свет с врожденным пороком — у него полностью отсутствовал пищевод. До трех с половиной лет мальчик не сделал ни одного глотка жидкости и не проглотил ни кусочка пищи. Питание он получал через специальную трубку, вживленную в стенку желудка. Впоследствии ему хирургическим путем создали замену пищевода из тканей его собственного кишечника.

Раньше дети с таким уродством — а их рождается не так уж мало, примерно один на 2000 рождений — в принципе не могли выжить. Технические средства поддержания жизни дают им такой шанс.

Для доставки в организм кислорода (искусственное дыхание) специальные аппараты применяются уже несколько десятилетий. Возможны два варианта технического решения такой задачи — принудительное введение воздуха или других смесей в легкие (при слабости или отказе дыхательной мускулатуры) и непосредственное обогащение крови кислородом. В первом случае используются аппараты искусственной вентиляции легких (рис. 57), во втором — оксигенаторы крови, пленочного или пузырькового типа, входящие в состав аппаратуры для искусственного или вспомогательного кровообращения.

Попав в организм, все вещества транспортируются дальше с помощью системы кровообращения — с потоком крови. Система кровообращения является сегодня, пожалуй, наиболее важным узлом внедрения технических средств во внутреннюю сферу организма. Широко применяются различного рода стимуляторы сердечной деятельности, прежде всего — пейсмейкеры, вживляемые электростимуляторы сердечных сокращений. Число вживленных пейсмейкеров в мире перевалило за миллион уже к началу 1980-х годов.

Применяются также автоматические дозаторы антиаритмических препаратов, питательных веществ — сердечных гликозидов и других лекарств, не говоря уж о замене отдельных механических элементов системы (сосудов, клапанов сердца) и самой крови ее искусственными

аналогами. Отдельно надо упомянуть неинвазивные (бескровные) методы поддержки кровообращения, такие как массажеры, применяющиеся не только в клинике, но и амбулаторно, а также для поддержания кровообращения у космонавтов в ходе реадаптации к условиям земного тяготения после космических полетов.

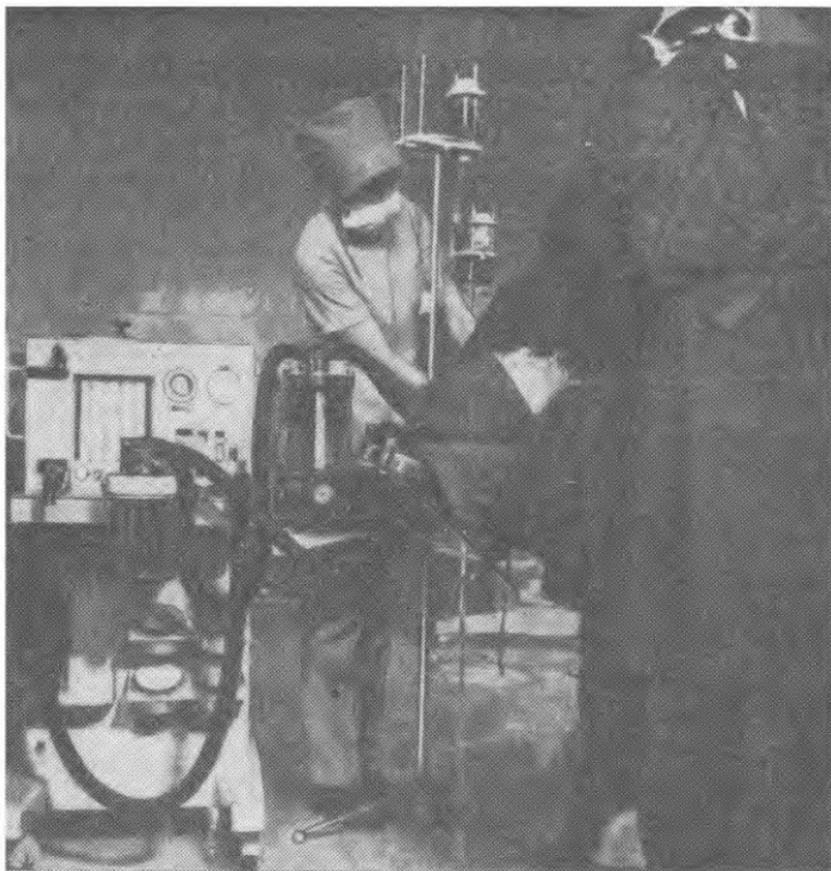


Рис. 57. Аппарат искусственной вентиляции легких во время операции

Очень распространенным средством временной замены работы сердца и легких являются аппараты искусственного кровообращения (АИК), используемые в хирургической практике при операциях на сердце. Такие устройства все же не оправдали больших надежд, возлагавшихся на них в свое время. Они позволяют полноценно заменять сердце всего лишь на несколько часов. Причины этого — в принципиальной «нефизиологичности» соединения АИК с естественной сосудистой системой (кровь

из АИКа поступает в организм обычно через бедренную артерию, в противоположном по сравнению с естественным кровотоком направлении движения крови в аорте и крупных сосудах). Существенным побочным эффектом является и ухудшение качества крови из-за механических воздействий на форменные элементы крови. Один из аппаратов для помощи больному сердцу показан на рис. 58.

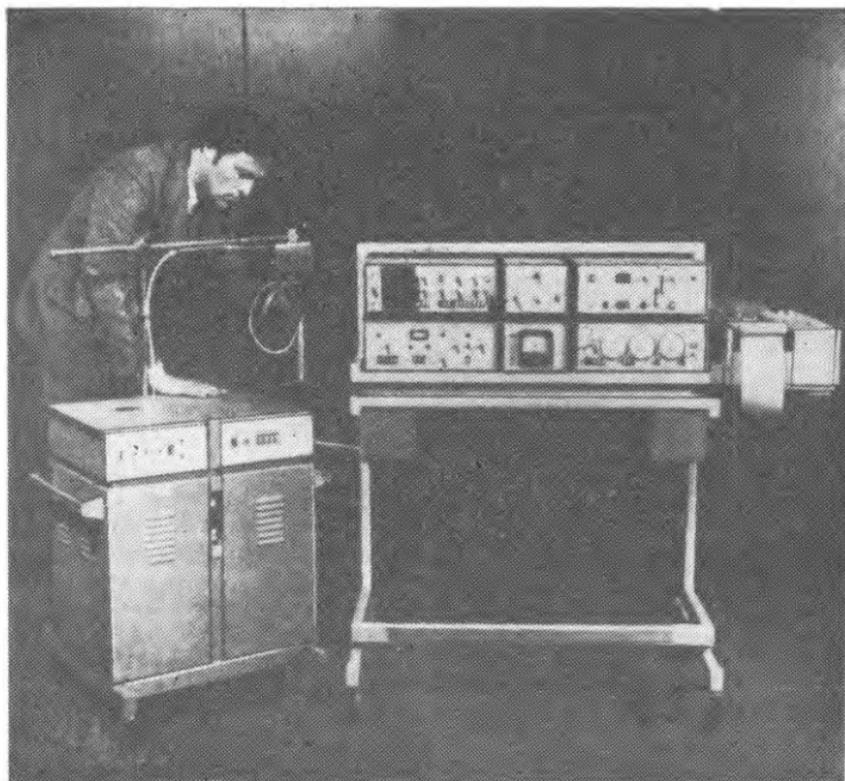


Рис. 58. Аппарат искусственного кровообращения.

Действие показанного на рисунке аппарата «Биопульс-4» (разных типов аппаратов искусственного кровообращения существует очень много) состоит в следующем. В аорту больного вводится заполненный газом упругий баллончик, который «пульсирует» в противофазе с работой сердца. Сейчас баллончик в руках у инженера. Расход энергии больного сердца при таком режиме работы может быть существенно снижен

Большие надежды возлагаются сегодня на искусственное сердце, которое в принципе может заменить естественное сердце человека — целиком или частично. Свободное от недостатков АИКа, искусственное сердце продемонстрировало свою эффективность в экспериментах на животных (теленка с таким сердцем может жить едва ли не неограниченное время). Но опыт пересадок та-

кого сердца человеку в США все еще не сулит близкого успеха, не говоря уже о фантастических затратах на проведение каждой подобной операции.

В августе 1986 г. после 620 дней жизни с искусственным сердцем скончался «бионический Билл» — пятый в истории человечества пациент с искусственным сердцем, Уильям Шрейдер. Он снискал себе симпатии всех американцев неумной жадой жизни и тогда, когда шел на рыбалку, неся в одной руке удочки, а в другой — переносный компрессор для питания своего сердца, и тогда, когда удача отвернулась от него. Один за другим три инсульта, необъяснимые приступы с судорогами и высокой температурой...

Искусственное сердце «Джарвик-7», установленное в теле Шрейдера американским хирургом Уильямом де Врисом, пережило своего хозяина. Проблемы сопряжения технического устройства с организмом, снабжения энергией, адекватного управления так до конца и не были решены.

В СССР эксперименты по созданию искусственного сердца продолжают с использованием животных (рис. 59).

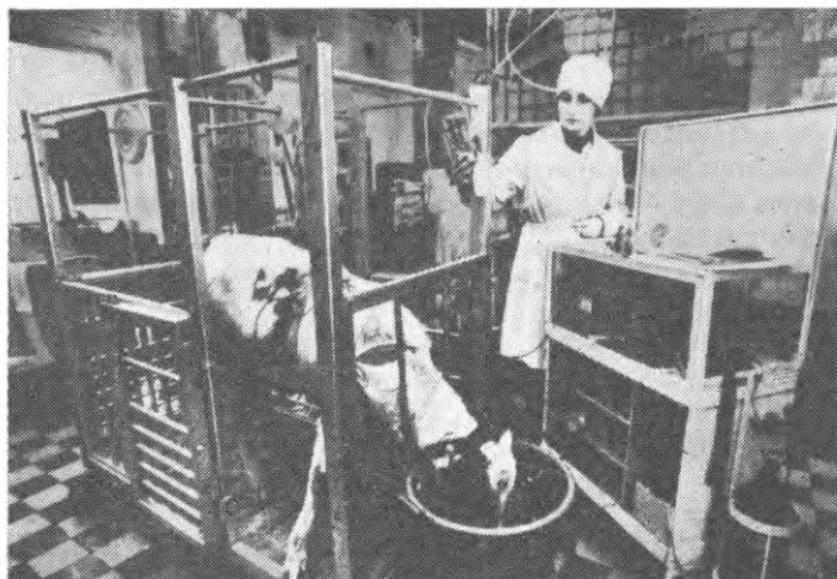


Рис. 59. Искусственное сердце.

В институте трансплантологии и искусственных органов идет эксперимент. Теленку по имени Рыжик вживлено искусственное механическое сердце «Поиск-10-М»

Перейдем к следующим основным метаболическим функциям организма — производству энергии и реализации обменных процессов (функции 2 и 3 в табл. 3 и 7). В принципе нет ничего невозможного в том, чтобы при не-

хватке любого из веществ или энергии (в виде молекул АТФ) вводить их извне с помощью автоматических дозаторов. Дело за малым: надо разобраться в патологии биохимических процессов, чтобы знать, когда, куда, какие вещества и в каком количестве надо вводить, и, во-вторых, научиться получать необходимую для принятия таких решений информацию непосредственно от больного организма в нужный момент времени. Пока ни к одной из этих двух задач подходов не видно, несмотря на поистине впечатляющие успехи биохимии, биофизики и инженерной мысли, создающей аппараты для экспресс-анализа химического состава крови по нескольким сотням показателей.

В то же время в последние годы наметился существенный прогресс в разработке автоматических дозаторов для введения различных лекарственных веществ — например, инсулина при лечении диабетических больных. После того как появились датчики глюкозы крови (к сожалению, очень дорогие и неудобные в обращении, требующие постоянного тока крови через соответствующие технические системы), задача управления скоростью подачи инсулина насосом была решена практически так же, как это делается в системах промышленной автоматики, по принципу отрицательной обратной связи. Аппараты типа «Биостатор» получили широкое распространение во всех странах мира, но из-за их громоздкости и дороговизны используются они лишь в ведущих клиниках и в единичных экземплярах.

Параллельно идут поиски более дешевых и удобных конструкций дозаторов-насосов инсулина, работающих без обратной связи (рис. 60), а также других способов программированного введения инсулина в организм больного.

Рассмотрим теперь последнюю из метаболических функций физиологического комплекса организма — выведение конечных продуктов обмена из его внутренней среды (функция 4 в табл. 3 и 7). Что касается углекислоты и водяных паров, то они покидают организм тем же путем, которым поступает кислород, а дублером этого пути является аппаратура искусственного дыхания.

Основная часть продуктов обмена, в естественных условиях покидающих организм через почки, в условиях искусственно организованного выведения шлаков уходит через приборы гемодиализа. При гемодиализе кровь из сосудов забирается специальным насосом, который на-

правляет ее в особую камеру, где кровь течет по системе каналов из полупроницаемой пленки. Каналы снаружи омываются диализатом — жидкостью, в которой растворены вещества в концентрациях, близких к физиологическому составу крови здорового человека. Путем диффузии шлаки переходят в диализат, а для удаления воды используется разность гидростатических давлений между кровью и диализатом.

В клинике гемодиализ применяется для лечения почечной недостаточности 2—3 раза в неделю, каждый сеанс обычно длится несколько часов. В современных аппаратах

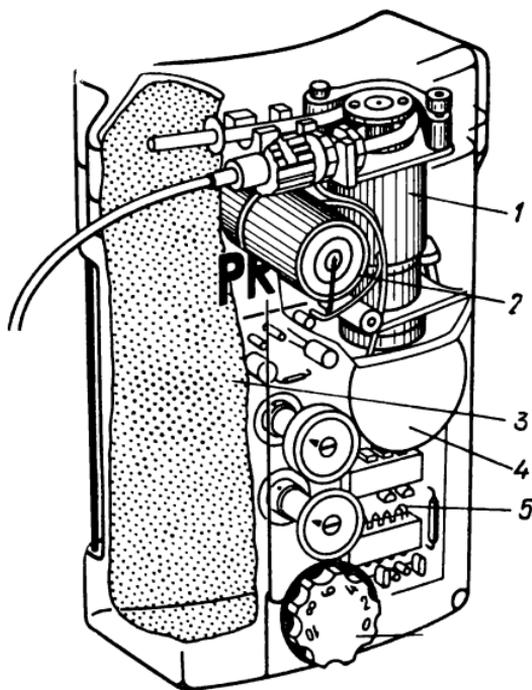


Рис. 60. Автоматический дозатор инсулина (в разрезе).

Такой прибор можно носить на поясе или на руке, так что в организм больного подкожно или внутривенно будет непрерывно подаваться необходимое количество инсулина. Подача производится по программе, разрабатываемой врачом индивидуально для каждого пациента. 1 — роликовый насос, 2 — батарейка, 3 — баллончик с инсулином, 4 — акустический сигнализатор, 5 — электронные схемы управления насосом, 6 — переключатель режимов работы

для гемодиализа — «искусственных почках» — используются разные конструкции. На рис. 61 приведен общий вид аппарата «искусственная почка».

Прогресс в системах очистки крови связан с разработкой лучших полупроницаемых пленок, через которые происходит удаление продуктов обмена. В частности, использование пленок с большей пропускной способностью при-

водит к тому, что диффузия переходит в гемофльтрацию, когда через пленку проходит большинство веществ плазмы крови и сама вода. Пациент в этом случае вместе с кровью, возвращающейся из устройства в организм, должен получать и воду.

Появление все лучших пленок, дающих возможность избирательно отфильтровывать различные вещества, позволяет тонко регулировать состав крови. Это открывает



Рис. 61. «Искусственная почка».

Аппарат, разработанный во ВНИИ медицинского приборостроения, конструктивно выполнен в виде кресла

перспективы лечения многих заболеваний (в том числе, как считают специалисты, и аутоиммунных).

Что касается методов сорбции, то использование различного рода сорбентов оказалось эффективным средством удаления из крови токсических веществ и ядов. Но эти методы не могут пока обеспечить удаление из крови полного спектра веществ (активированный уголь, например,

не способен поглощать мочевины, а другие сорбенты оказываются малопродуктивными в отношении тех или иных шлаков организма).

И еще один интересный способ внепочечной очистки крови — перитонеальный диализ. Идея его чрезвычайно проста: если физиологическим раствором наполнить пространство над брюшной полостью человека, то через брюшину шлаки будут диффундировать в него. Тогда можно очищать организм от конечных продуктов обмена, периодически заполняя и опорожняя это пространство (перитонеальную полость).

В Швеции, в небольшом рыбацьем поселке вдали от города живет немолодая женщина, жена капитана рыболовного траулера. Оставшись без обеих почек, она уже восемь лет живет на перитонеальном диализе, ведя полноценную жизнь домашней хозяйки и следя за домашним скотом, усадьбой. К врачу она обращается всего несколько раз в году.

Наполнение перитонеальной полости и слив жидкости у таких больных происходит через специальный клапан, вживленный в стенку живота, под действием силы тяжести (за счет разности высоты полиэтиленового сосуда с раствором и живота).

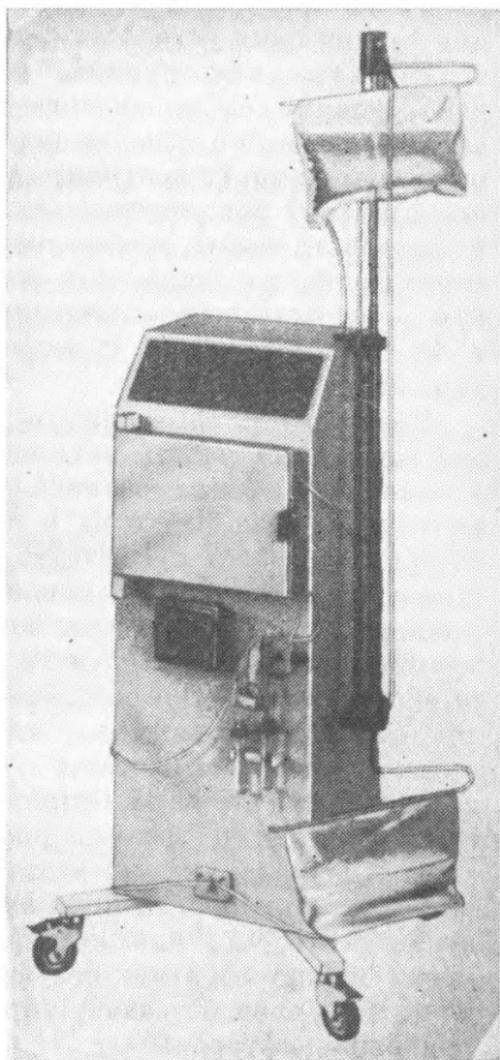


Рис. 62. Аппарат для перитонеального диализа

На рис. 62 показан первый в мире прибор для автоматизации перитонеального диализа, разработанный фирмой Лабомед (ФРГ), который позволяет контролировать процессы введения и выведения жидкости, включая подогрев, введение противовоспалительных препаратов, взве-

шивание полиэтиленового мешка, а при необходимости и химический анализ диализата.

В целом искусственные внутренние органы оказываются весьма эффективным средством восстановления нарушенных или полностью утраченных функций человеческого организма. Но проблема адекватного сопряжения технических устройств с системами организма, выбор оптимальных конструкций, разработка количественных рекомендаций по управлению искусственными органами все еще находится в стадии решения. Наряду с традиционными методами инженерного расчета и физиологических исследований при решении задач сопряжения технических и физиологических механизмов управления все большее место начинают занимать и методы инженерной физиологии — математическое моделирование систем организма в их взаимодействии с техническими средствами поддержки.

Возможности этих методов можно оценить на примере моделирования работы технических устройств коррекции углеводного обмена организма, применяемых при автоматизированных подходах к лечению сахарного диабета.

На этом пути существует несколько принципиально разных подходов. При одном из них разрабатываются приборы типа «Биостатор», содержащие по крайней мере три подсистемы — глюкозный анализатор, микроЭВМ для вычисления скорости введения инсулина и его антагонистов (глюкозы, декстрозы, глюкагона), исполнительный орган — насос. «Биостаторы» показывают хорошие результаты при лечении больных, но еще ценнее опыт их использования в задачах разработки массовых средств автоматизированных методов лечения диабета. Важным выводом, полученным при эксплуатации «Биостаторов», является то, что для поддержания постоянства сахара крови можно обойтись без введения антагонистов инсулина, что упрощает задачу управления и конструирования приборов-дозаторов.

Другой путь состоит в создании миниатюрных насосов-дозаторов, носимых или имплантируемых. Эти приборы работают без датчиков глюкозы и вводят инсулин в организм больного по заранее заданной программе.

Поскольку и для носимых, и для имплантируемых дозаторов остро стоит вопрос надежности, в последнее время вновь возрос интерес врачей к инъекционному способу введения инсулина. Медицинская промышленность многих стран выпускает специальные одноразовые пен-

шприцы, синтезированы различные типы инсулина с временем действия в организме пациента от 4 до 36 ч (*актрапид, семиленте, ленте*). Их комбинацией при двух-трех инъекциях в сутки можно добиться удовлетворительной компенсации гликемии — постоянства сахара крови в интервалах между приемами пищи и небольшого, лежащего вблизи «физиологической нормы», подъема после еды.

Весь этот круг вопросов может формулироваться на языке математических моделей и по ним могут быть получены различного рода рекомендации в ходе имитационных экспериментов на ЭВМ. Использование математических моделей позволяет, в частности, восполнить неполноту информации об объекте управления — организме больного, так как в клинических условиях из величин, характеризующих углеводный обмен, для измерений доступна только одна — сахар крови.

Удобным аппаратом исследования перечисленных проблем является так называемая «интегрированная» (интегральная, глобальная) модель углеводного обмена. Она представляет собой математическую запись тех зависимостей и механизмов управления в системе углеводного обмена, о которых мы подробно говорили в разд. 3.4. Обычно в таких моделях — а они разрабатываются сейчас во многих странах — используется представление системы в виде компартментальной структуры. Отличие между решением вопроса разными авторами заключается при этом не в принципах модели, а скорее в математических пристрастиях исследователей. Группа итальянских ученых во главе с К. Кобелли предпочитает для описания нелинейных регуляционных зависимостей использовать гиперболические тангенсы, а в модели, разработанной в Институте проблем управления в Москве, применяется кусочно-линейная аппроксимация.

Кроме этой (конечно же, самой важной) части в модель должно входить описание метода и средств доставки инсулина в организм. Так, если инсулин вводится подкожно, то в подкожной ткани образуется «депо» инсулина, из которого он уже диффундирует в кровь. Тогда можно записать:

$$\dot{x}_d = -y_d - kx_d + u(t), \quad (5.5)$$

где x_d — количество инсулина в депо, y_d — скорость перехода инсулина из депо в кровь, $u(t)$ — скорость введения инсулина техническими средствами. Коэффициент k характеризует скорость деградации инсулина в депо.

Уравнение (5.5) будет отсутствовать, если инсулин вводится внутривенно. В этом случае скорость поступления инсулина в кровь определяется непосредственно алгоритмом работы технических устройств. Так, при использовании «Биостатора» скорость поступления инсулина вычисляется в самом аппарате с помощью микро-ЭВМ. Обычно применяется алгоритм Майлса, описываемый

соотношением

$$u(t) = R \left(\frac{\Delta}{Q} + 1 \right)^2 + \frac{K}{10} \cdot m \cdot \Delta \cdot \frac{R}{100}, \quad (5.6)$$

где $\Delta = x_s - B$ — отклонение уровня сахара крови от желаемого значения B , причем величина x_s — усредненное значение уровня сахара крови по пяти предшествующим ежеминутным измерениям. Величина m — вычисляемая скорость изменения уровня сахара крови, вводимая в алгоритм для предотвращения колебательного характера переходных процессов, R , Q и K — коэффициенты, выбираемые врачом. Введение инсулина происходит только в случае $\Delta > 0$; если x_s падает ниже «нормы» B , идет введение глюкозы в соответствии с другими алгоритмами.

Если уравнения, описывающие углеводный обмен организма, вместе с уравнениями, описывающими технические средства доставки и управление ими, ввести в ЭВМ, то решение даст полную картину изменения уровня всех веществ, входящих в математическое описание процесса управления (сахар крови, скорость введения инсулина, уровень инсулина в крови и т. д.).

На рис. 63 приведены графики, полученные ЭВМ, на которые выведено изменение во времени перечисленных величин для диабетического больного М. при лечении его с помощью «Биостатора». Использован алгоритм Майлса (5.6).

При высоком начальном уровне сахара крови (320 мг% натощак) алгоритм после подключения в 11.20 аппарата нормализует сахар уже к 13.00. Принятие пищи в 15.00 и 19.30 дает «физиологический» подъем уровня сахара крови.

На рисунке видно, как меняется скорость введения инсулина (а) и сахар крови (б). На каждом из графиков приведены две кривые. Одна (с бóльшим числом флуктуаций) — реальная запись, сделанная в клинике; другая (более гладкая) — результат модельного эксперимента на ЭВМ, воспроизводящего ход лечения больного М. с помощью «Биостатора». Графики построены ЭВМ.

Приведем еще один пример использования математической модели «организм — технические средства» для анализа ситуаций, возникающих при использовании различных способов введения инсулина в организм больного.

В ряде американских клиник используется довольно простой алгоритм эвристического планирования подкожных инъекций, который рекомендуется в случае отсутствия более полной исходной информации о состоянии диабетического больного. Алгоритм состоит в следующем.

Вес больного (точнее, его масса в кг) умножается на 0,8; полученное число означает количество единиц инсулина, которое должно быть введено больному в течение суток. Весь инсулин делится на 4 инъекции, три из которых делаются за полчаса до каждой еды, в 8.00, 13.00 и 18.00, причем используется обычный инсулин (*актрапид*). Четвертая доза вводится на ночь, в 22.00 (инсулин полупролонгированного действия — *семиленте*). Практика подтвердила эффективность такого алгоритма.

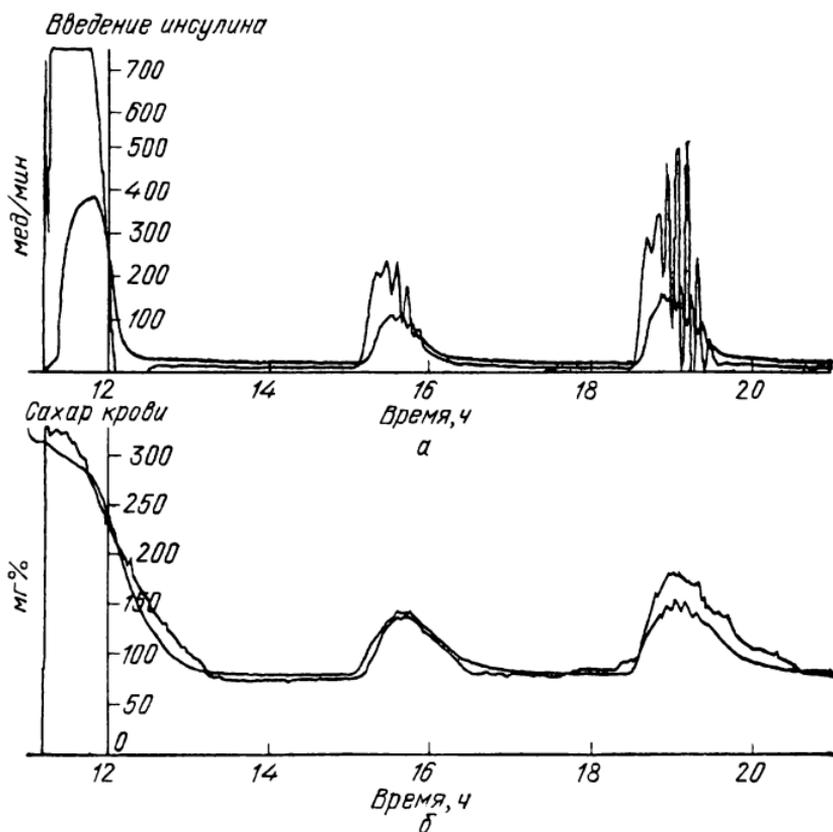


Рис. 63. Моделирование на ЭВМ процесса нормализации сахара крови.

Так происходит нормализация сахара при подключении к организму больного аппарата типа «Биостатор» с автоматическим введением нужных доз инсулина. Кривая с большими флуктуациями — клиническое наблюдение; гладкая кривая — модель

На рис. 64 приведены кривые, также полученные на ЭВМ, показывающие ход суточного профиля сахара крови и инсулина при лечении больного с помощью «Биостатора» (а) и инъекций (б). Сахар натощак равен 400 мг%. Видно, что сахар крови нормализуется в обоих случаях достаточно хорошо (инъекционная терапия при правильном подборе доз лишь незначительно уступает совершенным приборам и алгоритмам «Биостатора»).

Из рисунка видно, что в обоих случаях сахар крови (при начале введения инсулина в 8.00) нормализуется примерно к 11—12 часам дня. После приема пищи («пички» на нижних графиках)

происходит подъем уровня сахара крови. Инсулин во втором случае вводится подкожно в следующих дозах: в 8.00 — 50 ед.; в 13.00 — 20 ед. плюс 20 ед. инсулина пролонгированного действия; в 18.00 — 16 ед. плюс 20 ед. пролонгированного. Нижний график — уровень сахара крови, верхний — скорость поступления инсулина в кровь из подкожного «депо», образующегося при каждой инъекции.

Модельные исследования и вычислительный эксперимент могут оказать эффективную помощь при оценке алгоритмов введения

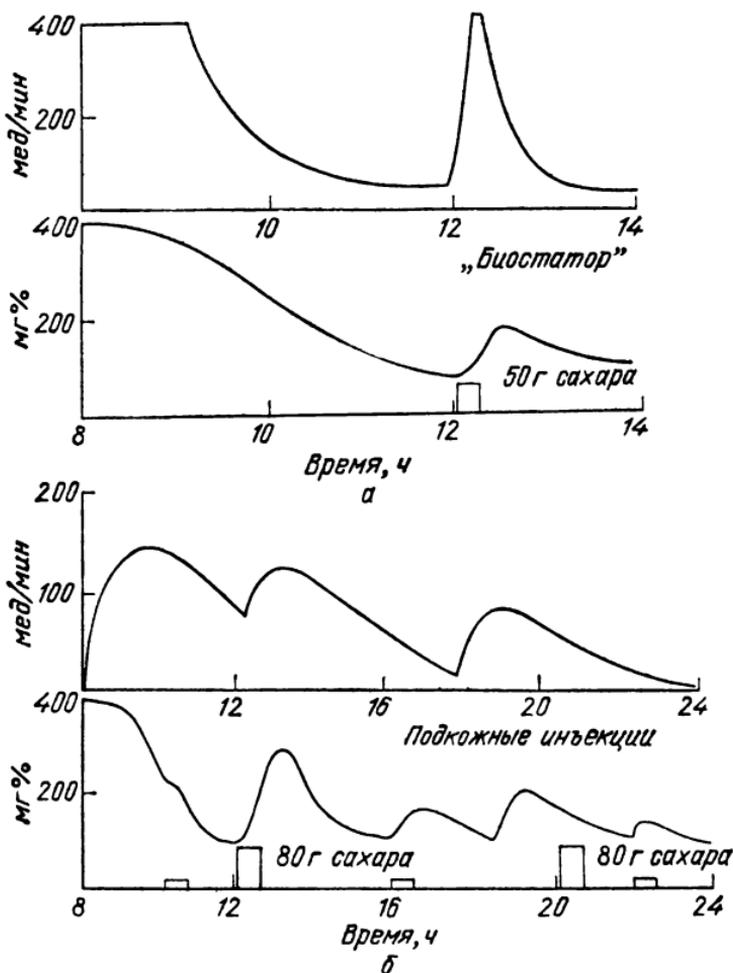


Рис. 64. Нормализация уровня сахара крови при подкожном введении инсулина.

Показаны результаты моделирования на ЭВМ процесса введения инсулина и последующего снижения сахара крови: а) автоматическое введение инсулина аппаратом «Биостатор», б) подкожные инъекции

инсулина — подкожных, внутривенных, выполняемых вручную или с помощью технических систем. Что касается упомянутого выше алгоритма, то вычислительный эксперимент подтверждает его эффективность при довольно широких пределах изменения степени тяжести диабета.

5.6. Индивидуальное защитное снаряжение

В последнее время человек все более активно осваивает новые регионы обитания — арктические и антарктические области, космос, подводное пространство, континентальный шельф. Он не только проникает туда и постоянно живет там, но и работает в столь необычных условиях. Производственные потребности толкают его на морское дно для добычи нефти, и он идет за ней все глубже и глубже. Уже в ближайшие годы космос будет использоваться как естественный цех для промышленного производства особо чистых химических соединений, точной и надежной аппаратуры. Работа под водой и в космосе требует специального оборудования. Поэтому машинный мир, обрисованный в разделе 5.2, сегодня дополняется новыми типами систем и аппаратурой для работы в непривычных, нетрадиционных сферах. Монтаж, эксплуатация и ремонт такого оборудования требуют постоянного присутствия под водой человека, чья экипировка должна отвечать условиям, которые еще несколько лет назад казались фантастическими. По данным доктора геолого-минералогических наук В. П. Гаврилова, в начале 1980-х гг. более 20 % нефти и 15 % газа в мире добывалось со дна шельфов моря, в одном лишь Северном море было открыто более 100 месторождений.

Необходимость работы в сложных и опасных условиях возникает и на «обычном» производстве — в горячих цехах, при ремонте доменного оборудования, на некоторых химических производствах, на атомных энергостанциях и т. д. Во всех этих случаях на помощь приходят специальные технические средства, защищающие человека от действия сверхсильных (экстремальных) факторов *).

Мало того, довольно часто возникает и такое положение, что даже нормальная деятельность человека, связанная с эксплуатацией тех или иных механических устройств — транспортных, производственных и т. п., внезапно прерывается аварийными ситуациями. Тогда жизнь человека может быть спасена только за счет быстрого использования спасательных средств.

*) Об этой интересной сфере человеческой деятельности можно прочесть в книгах М. Н. Александрова «Безопасность человека на море» (Л.: Судостроение, 1983), В. А. Вишнякова и И. В. Меренова «Глубоководная водолазная техника» (Л.: Судостроение, 1982) и С. П. Уманского «Снаряжение космонавта» (М.: Машиностроение, 1982), откуда и взято большинство иллюстраций для этого раздела.

Аварийные ситуации представляют собой довольно существенный источник риска для человека. На рис. 65 представлена диаграмма, составленная норвежским бюро «Веритас» по данным за 1974 г. Эта организация, как известно, занимается вопросами обеспечения безопасности человека в промышленности, на сухопутном транспорте и судоходстве, а также защитой окружающей среды от загрязнений. Данные таблицы составлены по статистике Норвегии; вероятно, именно поэтому в ней отсутствует

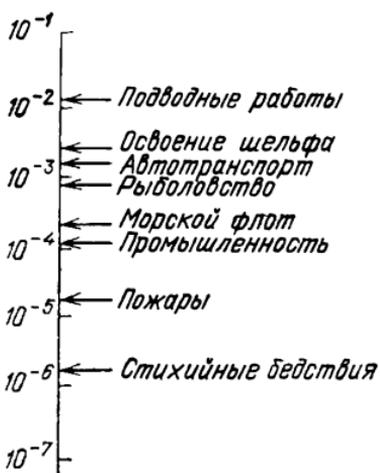


Рис. 65. Вероятность возникновения аварийных ситуаций при различных видах деятельности человека

графа об освоении космоса. Читатель сам может мысленно дополнить таблицу, зная примерно общее число удачных космических полетов и количество неудач. Итак, космос и подводная среда. Ниже именно этим двум важнейшим направлениям создания защитных технических средств мы и будем уделять основное внимание.

Из всех разнообразных аспектов обеспечения безопасности человека в таких условиях нас интересует сейчас только защитное снаряжение, позволяющее сохранить деятельность физиологических систем организма по поддержанию энергетического баланса и балан-

са веществ. Вне зависимости от того, как попадает человек в экстремальные условия среды — по заранее запланированной программе или в результате аварии, защитные средства должны обеспечить относительно долгосрочное его пребывание там.

Чтобы охватить единым взглядом те сферы функциональной активности физиологических систем организма, где применяются защитные средства, нет необходимости строить таблицы, подобные табл. 7, которую мы привели для анализа работы систем искусственных внутренних органов. Дело в том, что защитные средства всегда работают «на границах» организма. А граничных областей в организме мало: кожный покров, поверхность альвеол, всасывающая поверхность желудочно-кишечного тракта и поверхность почечного обмена, причем две последние практически не подвержены действию внешних факторов.

Поэтому нас интересует защита только двух физиологических функций — дыхания и теплового баланса в экстремальных условиях. Защитные устройства для системы дыхания должны сохранить ее структуру (например, не допускать обмораживания при сверхнизких температурах) и дать организму возможность получения нужного количества кислорода и выведения углекислоты, задерживая при необходимости другие, возможно, вредоносные газообразные вещества и пары жидкостей. Эта цель достигается использованием промышленных респираторов-противогазов, защитных масок, кислородных приборов (альпинистами, летчиками, пожарными), специальных дыхательных аппаратов (водолазами и акванавтами). В последнем случае возникает еще и задача подбора таких газовых смесей для дыхания, которые дали бы возможность нормального дыхания на больших глубинах, что достигается применением различного рода двух- и трехкомпонентных смесей типа кислород-гелий-азот.

Одним из наиболее важных направлений в искусственном обеспечении жизненных функций с помощью технических средств является обеспечение теплового баланса. Во многих случаях для этой цели достаточно оказывается пассивных средств тепловой защиты — от обычной утепленной одежды до экзотических скафандров, ткань которых представляет собой «пирог» из слоев самых различных материалов. Так, на флоте, в авиации и космонавтике для сохранения от переохлаждения человека, попавшего в холодную воду, применяются теплозащитные спасательные костюмы. На рис. 66 показан такой костюм фирмы «Бьюфорт» (Канада). Он позволяет человеку находиться в холодной воде довольно долго — порядка суток и более, поскольку снижение температуры тела не превышает 2 °С при шестичасовом пребывании в ледяной воде. Исследовать эффективность таких костюмов достаточно трудно — нужны длительные испытания, очень неприятные, а иногда и опасные для испытателей.

В более сложных ситуациях кроме пассивных средств тепловой защиты приходится использовать и активные методы (создание искусственных потоков тепла, направленных в зависимости от конкретной ситуации к телу человека или от него). Это в равной степени относится к открытому космосу, морским и подводным видам деятельности человека. Отвод тепла (в космосе) или согревание (под водой) в принципе обеспечивается одними и теми же методами — подачей к поверхности тела соот-

ветствующего количества воздуха, воды или другого теплоносителя с нужной температурой. Конструктивно это может быть или непосредственное обтекание тела водой либо воздухом (для воды это соответствует так называемым костюмам мокрого типа), или перенос тепла носителем в специальной системе трубок. Вентилируемый костюм космонавта (рис. 67) относится к первому типу решения, костюм жидкостного обогрева водолаза (рис. 68) — ко второму.

Задача управления техническими средствами обогрева фактически сводится к выбору двух параметров — текущего расхода теплоносителя и его температуры.



Рис. 66. Теплозащитный спасательный костюм для моряков и летчиков.

На фотографии показано испытание костюма в Северном море

А задача конструирования состоит, кроме того, в выборе наилучшего распределения обязанностей между системами пассивной и активной защиты и в оптимальном расположении теплозащитного слоя по поверхности тела.

При поиске наилучших решений и анализе эффективности существующих систем наряду с традиционными методами физиологического и медико-технического эксперимента начинают применять и кибернетические методы — математическое моделирование и вычислительные эксперименты на ЭВМ. Эти методы позволяют получить такие широкие представления о характере поведения организма в защитном снаряжении, которые в традиционном эксперименте получить попросту невозможно. По крайней мере,

это относится к «особым» штатным режимам работы снаряжения и к различного рода прогностическим оценкам ситуаций, возникающих при поломках и неисправностях систем защиты. Правда, модельные картины, полученные на ЭВМ, всегда носят в той или иной мере ориентировочный, неокончательный характер, но они тем ближе к реальности, чем на большем экспериментальном материале базируется математическая модель.

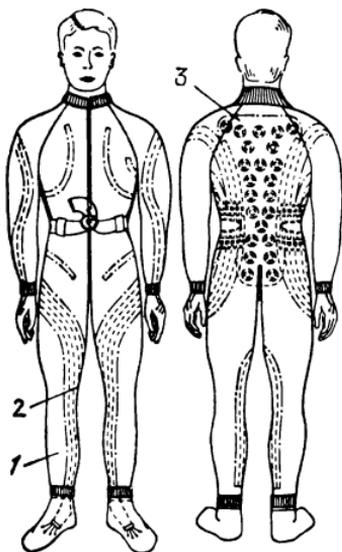


Рис. 67. Костюм воздушного охлаждения для космонавта: 1 — комбинезон, 2 — трубки вентиляционной системы, 3 — панель с отверстиями для выхода воздуха

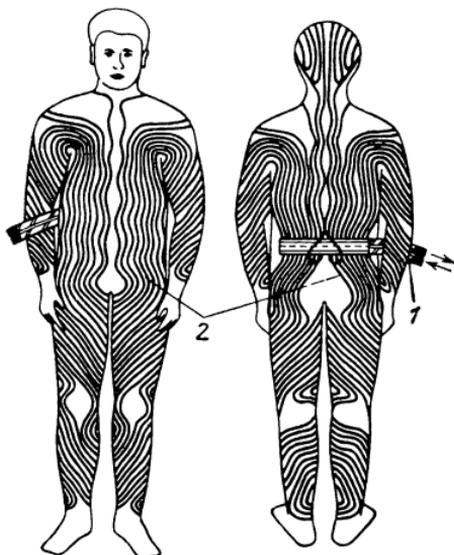


Рис. 68. Система циркуляции воды, используемая для согревания водолаза.

Система трубок размещается под комбинезоном; 1 — подвод и отвод воды, 2 — система согревающих трубок

Если обратиться к математической модели «организм — защитное тепловое снаряжение», то она состоит из двух компонент: модели соответствующей части организма (подобной тем, которые рассматривались нами в разд. 2.4) и модели защитного (активного и пассивного) снаряжения, включая и механизмы действия внешних факторов. Рассмотрим процесс моделирования теплового баланса человека в защитном снаряжении *).

*) Подробнее с задачами моделирования таких систем можно познакомиться по статьям в сборниках «Медико-технические проблемы индивидуальной защиты человека» (см., например, выпуск 21. — М.: Изд. Минздрава СССР, 1980).

Тепловые потоки в организме человека можно представить в виде системы источников, компарментов и стоков тепла, например, как показано на рис. 69. Число компарментов в модели определяется тем, насколько подробно исследователь хочет проанализировать ситуацию, и тем, как велик доступный объем информации о работе защитного снаряжения. Обычно в тепловых экспериментах измеряется стандартный набор температур (7 или 11 точек на теле и ректальная температура) и общая теплопродукция организма.

Поэтому число компарментов в модели заведомо не должно превышать 7 или 11. На рис. 69 таких компарментов 4: ядро x_1 , оболочка тела x_2 , лицо x_3 и конечности x_4 . Такой набор компарментов определяется еще и ожидаемым выбором тепловой защиты для различных частей тела (лицо, как правило, должно быть «открытым»).

Напомним кратко основные характеристики тепловой регуляции организма, нужные для описания модели. Тепловой баланс и тепловой гомеостаз в естественных условиях поддерживаются в организме двумя системами управляющих механизмов: химическая система (в модели — u_1) следит за постоянством температуры тела посредством изменения темпов теплопродукции w_i в различных частях

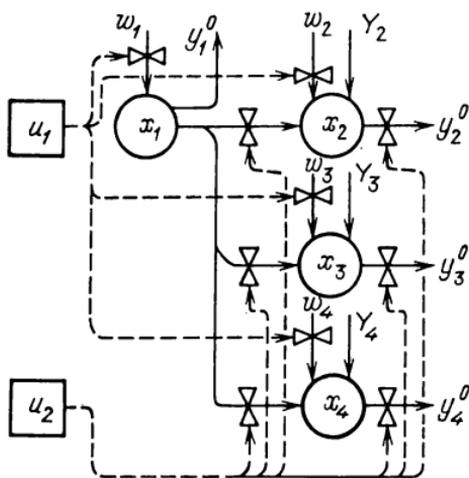


Рис. 69. Структура тепловых потоков в организме при использовании технических средств для согревания

организма; физическая (в модели — u_2) поддерживает нужный баланс путем изменения темпов теплоотдачи y_i^0 в среду и темпов потоков тепла y_i^1 от ядра к периферическим компартаментам.

Уравнения теплового баланса для каждого из компарментов имеют вид

$$\dot{x}_i = (w_i + y_i^1 - y_i^0) / c_i \rho_i V_i, \quad (5.7)$$

$i = 1, 2, 3, 4$; w_i — теплопродукция i -го компартамента, y_i^1 — поток тепла от ядра (компартамент 1) к i -му компартамента, причем $y_1^1 = 0$; y_i^0 — поток тепла от i -го компартамента в окружающую среду. Техническая система описывается потоками тепла Y_i к i -му компартамента и тепловой защитой пассивного типа, изменяющей потоки теплоотдачи в среду. Коэффициенты c_i , ρ_i и V_i — удельная теплоемкость, плотность и объем i -го компартамента.

Обычно считается, что механизмы физической терморегуляции можно описать с помощью формул вида

$$y_i^0 = k_i^0 S_i (x_i - v), \quad (5.8)$$

где v — температура окружающей среды, $k_i^0 = 1/(R_i + R_c)$, R_i — тепловое сопротивление тканей и кожного покрова, которое и зависит от управляющих сигналов системы физической терморегуляции u_2 , R_c — тепловое сопротивление пограничного слоя на границе кожи со средой, S_i — площадь поверхности компартмента.

Заметим кстати, что коэффициенты k_i^0 формируют при линеаризации уравнений (5.7) и (5.8) элементы матрицы B_1 в примере, рассмотренном на стр. 194, уравнение (5.3).

О характере работы механизмов u_1 и u_2 в моделях делаются разные математические допущения, поэтому здесь мы не будем останавливаться на них детально. Суть механизмов физической терморегуляции состоит в том, что при понижении температуры тела (величин x_i) теплоизоляция тканей тела возрастает, т. е. коэффициенты k_i^0 уменьшаются.

Аналогичным образом моделируется и работа химических механизмов: величины w_i становятся зависимыми от управляющих сигналов u_1 , так что $w_i = f(u_1)$.

Еще два слова о моделировании пассивной теплоизоляции. Введение тепловой защиты изменяет k_i^0 в (5.8). Теперь

$$k_i^0 = 1/(R_i + R_c + R_{ki}), \quad (5.9)$$

где R_{ki} — тепловое сопротивление оболочки защитного костюма для i -го компартмента. Для ядра, очевидно, тепловая изоляция костюмом не имеет места, поскольку тепло здесь уходит лишь на согревание вдыхаемого воздуха и на испарение жидкости с поверхности альвеол.

Активная защита — приток тепла Y_i ($i = 2, 3, 4$) к поверхности кожи от источника дополнительного тепла.

Задача имитационного моделирования — т. е. проведения вычислительных экспериментов с моделью на ЭВМ — обычно состоит в следующем. Сначала на основании имеющихся экспериментальных данных надо верифицировать модель (5.7)—(5.9), т. е. выбором параметров этих уравнений добиться того, чтобы процессы в модели и в экспериментальных «прогонках» оборудования совпадали. Тогда вычислительный эксперимент можно организовать так, чтобы проиграть в нем все интересные ситуации. В ходе таких экспериментов получают графики изменения во времени всех интересующих исследователя переменных для любых заданных условий — как в штатных режимах, так и в аварийных ситуациях. Обрабатывая эти данные точно так же, как и в обычных медико-биологических экспериментах, можно получить рекомендации по оптимальному размещению пассивной защиты по компартментам, определить необходимую степень защиты для создания комфортных, допустимых или

предельных условий пребывания человека, выяснить наилучшее распределение «обязанностей» между пассивной и активной защитой, оценить резервы организма и технических средств в случае отказа тех или иных компонент системы и т. д.

В качестве примера приведем два графика, полученных с помощью описанной выше модели в ходе вычислительных экспериментов: это зависимость допустимого времени пребывания человека в охлаждающей среде на воздухе и в воде при разном характере защиты (рис. 70). По принятым сегодня физиологическим критериям допустимым

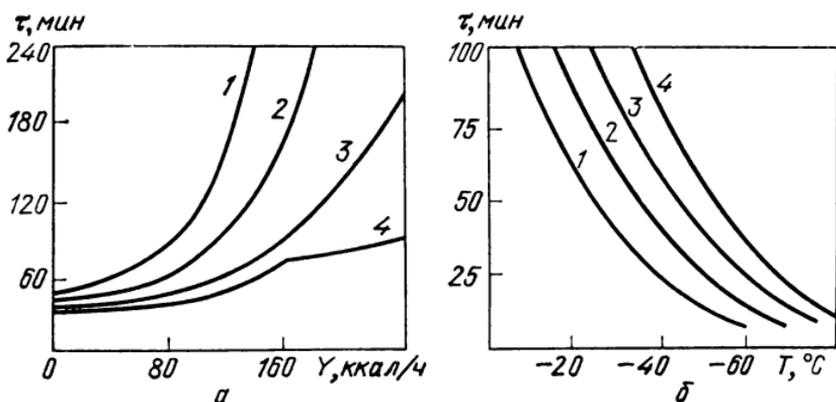


Рис. 70. Результаты расчетов эффективности защитного снаряжения на ЭВМ:

а) допустимое время пребывания водолаза в холодной воде при использовании активного подогрева Y и пассивной тепловой защиты (6, 4, 3 и 2 кло — кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно), б) допустимое время пребывания человека на холоде при использовании пассивной тепловой частицы (2, 3, 4 и 6 кло — кривые 1, 2, 3, 4 соответственно)

считается снижение температуры ядра тела до $36,2^{\circ}\text{C}$, средневзвешенной температуры тела до $30,0^{\circ}\text{C}$, температуры кистей рук — не ниже $30,0^{\circ}\text{C}$. Излом на графике возникает тогда, когда критическая температура одного из органов тела начинает ограничивать область допустимых режимов и происходит переход с одной ограничивающей кривой (например, по ядру) на другую (по температуре кистей).

В заключение раздела отметим, что средства индивидуальной защиты организма применяются и при воздействии таких факторов, для которых границы организма не являются преградой (невесомость, электромагнитные излучения и т. п.). Например, в условиях отсутствия силы тяжести у человека, адаптированного к земным условиям, в той или иной мере могут возникнуть нарушения функ-

ции системы кровообращения. Специальные защитные костюмы позволяют в таких ситуациях компенсировать действие неблагоприятного фактора, создав на нижней части человека разрежение. На наших станциях «Салют» для этой цели применялись, например, профилактические вакуумные костюмы «Чибис» (рис. 71). При реадaptации к условиям земного тяготения система кровообращения испытывает действие противоположно направленных факторов. Чтобы скомпенсировать их, используют специальные послеполетные защитные костюмы (ПЗК). На рис. 72



Рис. 71. Вакуумный костюм «Чибис»:

1 — гофрированная оболочка,
2 — устройства управления

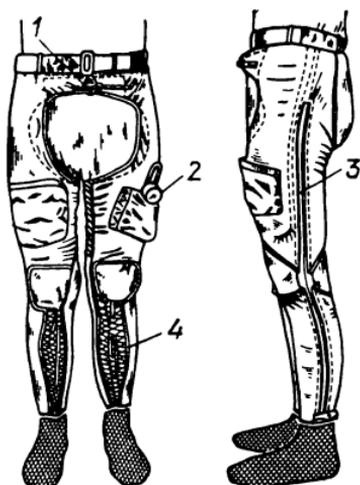


Рис. 72. Послеполетный защитный костюм:

1 — трубка для подачи воздуха,
2 — устройство для наполнения камер костюма, 3 — застежка-молния,
4 — шнуровка

показан ПЗК, в котором создается избыточное давление на нижних конечностях человека, что препятствует скоплению крови в сосудах и тем самым способствует кровоснабжению головного мозга и других жизненно важных органов.

В этом разделе, пожалуй, следует упомянуть, что кроме индивидуальных средств защиты при спасении человека в аварийных ситуациях используются и коллективные средства спасения, частью имеющие те же задачи, что и индивидуальные средства защиты,— сохранение воз-

возможности дыхания (например, защита от дыма и газов при пожарах) и поддержание теплового режима группы спасаемых людей. На рис. 73 воспроизводится картина аварии плавучей буровой установки «Дип Си Дриллер» у берегов Норвегии. На первом плане виден надувной

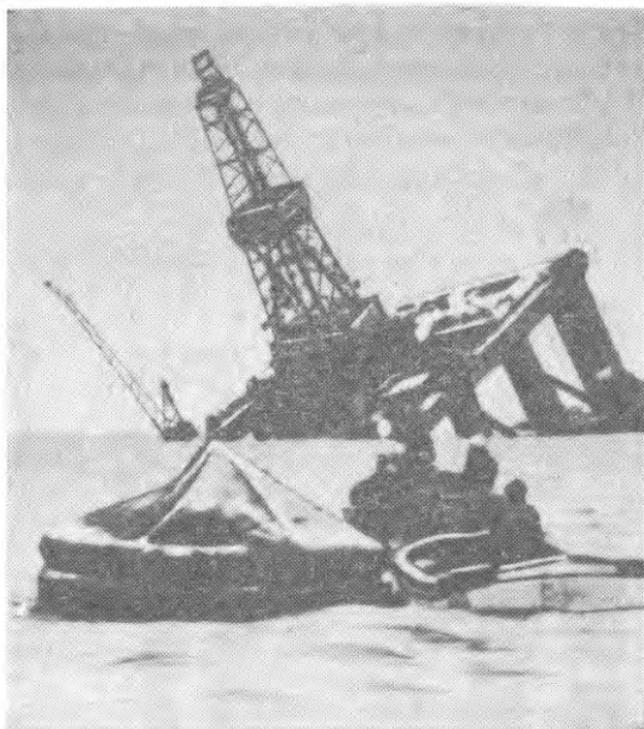


Рис. 73. Надувной спасательный плотик, используемый при авариях на море

спасательный плот, занимающий очень мало места при хранении и вполне эффективно выполняющий свои функции при возникновении самых разнообразных аварийных ситуаций на воде.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Жизнь в техносфере...

С того времени, когда В. И. Вернадский впервые смог взглянуть на биосферные процессы как на объект планетарной деятельности человечества, роль антропогенных факторов в формировании среды обитания человека стала очевидной. Природа уже не автономна в своем развитии — лежащие перед ней пути контролируются человеком, машинный мир приходит в мир природы. Биосфера сливается с ноосферой, превращаясь в сферу господства человеческого разума.

Одно из очевидных следствий такого превращения — создание условий для удовлетворения все более возрастающих потребностей человека, а это, прежде всего, рассмотренные нами биологические (метаболические) потребности в веществах и энергии. Прослеживая на страницах этой книги путь клетка — клеточные организмы — человек — человеко-машинные системы, мы видели, как повышение «плотности жизни» на единицу пространства и времени увеличивает потребности, усложняет пути и способы их удовлетворения. Современный город с его огромной «концентрацией биомассы» — десятками тысяч жителей на каждый квадратный километр — возможен только при условии совершенной технической организации жизненной среды. Огромная питающая город площадь, занятая под сельскохозяйственное производство, развитая сеть запасаения, переработки, транспортировки питательных веществ, водопровод, канализация — все это кончается мириадами ячеек индивидуального пользования: пчелиными сотами городских квартир, освещаемых, отапливаемых, водоснабжаемых, приближенных к сети торговли и общественного питания и т. д. и т. п.

Транспортные магистрали с их многоэтажными развязками, ухоженные поля, леса и рощи (резервуары

чистого воздуха), оросительные каналы соседствуют с колоссальными цехами из стекла и бетона, где люди часто работают в кондиционированном воздухе. Все это наводит на мысль о техносфере как о естественной среде обитания и работы человека (такой же естественной для него, как и первозданная природа), о полном владычестве человека над своим жизненным пространством.

Но это далеко не так. Обратимся снова к великолепной книге С. Лема «Сумма технологий»: «Гомеостаз — так ученые называют стремление к равновесию, то есть к существованию вопреки изменениям, — создал известковые и хитиновые скелеты, противодействующие силе тяжести, обеспечил подвижность посредством ног, крыльев и плавников, облегчил пожирание с помощью клыков, рогов, челюстей и пищеварительных систем и в то же время защитил от пожирания панцирями и камуфляжами и дошел на этом пути освобождения от внешней среды до регуляции, обеспечивающей постоянную температуру тела...

Но биологическая эволюция этим не ограничивается. Из организмов, из различных типов, классов и видов животных и растений она строит в свою очередь еще более сложное целое — уже не «острова», а целые «континенты» гомеостаза, формируя поверхность и атмосферу всей планеты...

Гомеостатическая деятельность человека... сделала его хозяином Земли, могущественным, увы, лишь в глазах апологета, коим он сам и является. А перед лицом климатических катаклизмов, землетрясений... человек, по существу, столь же беспомощен, как и в последний ледниковый период. Некоторые из бедствий он умеет, хотя и неточно, предвидеть. Однако до гомеостаза в масштабах планеты ему еще далеко».

Техносфера как жизненное вместилище человечества видится сегодня скорее как фантастика, чем как реальная перспектива ближайшего будущего.

И все же небольшие группы людей — космонавты, акванавты, а чаще отдельные люди — не только исследователи, но и пионеры машинной жизни, несущие в своих руках источник питания для собственного сердца, уже сегодня обязаны своей жизнью техносфере.

Сорок лет покоился на морском дне английский крейсер «Эдинбург», унесший на глубину 260 м золотой запас из нескольких сотен слитков. Современная технология позволила извлечь их. Эту работу выполнили глубоководные водолазы в специальном подводном снаряжении.

Но как спустить водолаза на такую глубину, где давление составляет 26 атмосфер? Сколько же часов — а может быть, и суток — продолжается подъем водолаза с такой глубины на поверхность, чтобы избежать кессонной болезни из-за огромных перепадов давления?

Подъемы и спуски проходят сегодня без всякой задержки — просто потому, что уже на корабле подводник живет в таких же условиях, которые он должен встретить на глубине (рис. 74). Специальные барокамеры на борту, спускаемый колокол, в который водолаз переходит из жилого отсека для спуска на рабочую глубину — во всех

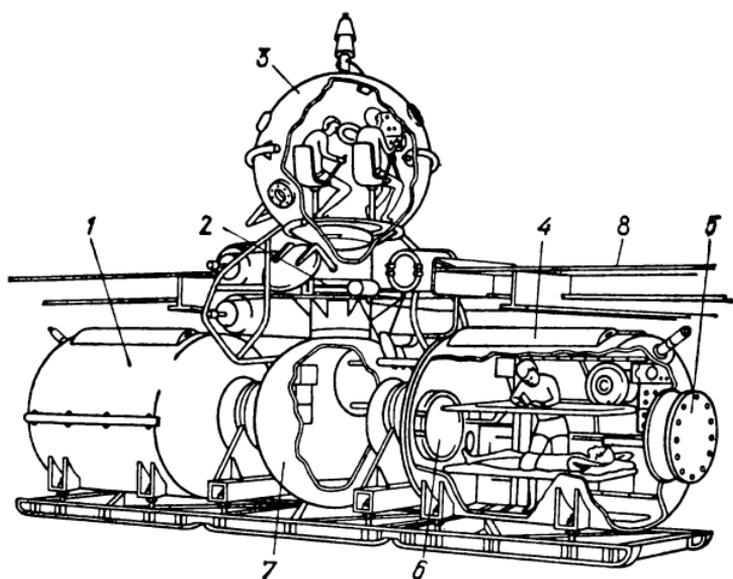


Рис. 74. Судовой водолазный комплекс:

1 и 4 — жилые камеры, 2 — стыковочный узел, 3 — водолазный колокол, 5 — аварийный люк, 6 — переходный люк, 7 — переходный отсек, 8 — палуба судна

этих помещениях поддерживаются необходимые для работы на глубине условия — давление (в нашем примере — 26 атмосфер), состав вдыхаемого воздуха с малым содержанием кислорода, комфортная температура. А адаптацию к условиям техносферной жизни и реадаптацию к нормальным условиям водолазы проходят постепенно, пока корабль идет от базы к месту работы и обратно.

А человек с искусственными внутренними органами? Здесь техносфера, в которой этот человек живет постоянно, проникла в его внутреннюю среду! Современные кардиостимуляторы вместе с источником питания вживлены

в сердечную мышцу человека. Но один из перспективных способов снабжения их энергией — подзарядка высокочастотными токами через ткани тела и кожу. Человек с искусственными органами может сохранить свою жизнь исключительно в техносфере — инженерно организованной среде, которая должна создать условия для «уравновешивания» того же плана, что и уравнивание нормального организма с естественной средой.

Что толку от вживленного стимулятора, если он своевременно не будет подзаряжен? Какой прок от искусственной почки, которая вовремя не получит диализата, производимого специальными заводами? Барокамера на борту судна поддержки может обеспечить жизнь акванавта только в том случае, когда технически обеспечен полный комплекс жизненных функций организма, находящегося в условиях техносферы. Этот комплекс мы рассматривали в гл. I, он был представлен в табл. 2 и 3. Для дальнейшего они нам понадобятся, так что напомним их вкратце.

Жизненные функции организма определяют его информационно-кибернетическую и метаболическую активность. Кибернетических функций, грубо говоря, всего три: получение информации, ее переработка с принятием решений, их реализация с помощью системы эффекторов. Метаболических функций, можно сказать, четыре. Сначала — доставка в организм нужных веществ, затем — получение из них энергии, использование веществ и энергии для получения нужных для жизнедеятельности соединений и, наконец, выведение из организма шлаков.

Техносферная жизнь должна будет обеспечить выполнение всех этих функций. Это сложная задача и с технической точки зрения, и с точки зрения физиологии и психологии. Жизнь в техносфере ставит перед человеком целый круг таких проблем, с которыми раньше ему сталкиваться не приходилось. Это и этические, и правовые, и чисто медицинские проблемы. Искусственный орган — насколько его считать частью человека? Кто «истинная» мать ребенка, если он получен искусственным соединением генов одной женщины (генетической матери), а выношен другой женщиной (биологической матерью)? Подобные вопросы часто поднимаются на страницах печати, и мы касаться их совсем не будем, с нас хватит и своих, специфических проблем.

Вот, например, проблема целостности организма. Целостность биологического организма означает, что сово-

купность составляющих его органов (элементов, систем) необходима и достаточна для поддержания стационарного неравновесного состояния — уравнивания со средой. Как целостный объект он рождается, развивается, проживает жизнь и умирает. Присоединение каких-либо дополнительных элементов (биологических, технических) качественно свойств его не изменяет. Организм по-прежнему целостен, хотя целостность он теперь способен сохранить и в более широком диапазоне условий среды и жизни. Так, использование одежды и обуви, конструирование специального защитного снаряжения позволяет человеку находиться и работать там, где раньше это было невозможно.

Точно так же и ослабление каких-то функций организма не лишает его целостности — жизнеспособности, хотя сужает круг доступных ситуаций и действий.

А вот полное исключение хотя бы одной из жизненно важных функций (неважно, кибернетических или метаболических) делает организм нежизнеспособным в естественных условиях среды. Если в социальной среде потеря слуха человеком не ведет его к гибели, то только потому, что среда эта, реагируя на поведение такого организма соответствующими действиями, восполняет недостаток естественной рецепции какими-то социогенными (в частности, техногенными) средствами. В живой природе, конечно, дело обстоит совсем не так. Лишение нормальной рецепции в животном мире сразу же ставит жизнь организма под угрозу — при первой же встрече с потенциальным врагом ущербный организм беззащитен. Омар, например, достаточно защищен против хищных рыб панцирем с острыми отростками, которыми он поворачивается к врагу. Чтобы полакомиться мясом, хищница норovit откусить омару глаза, расположенные, как у всех ракообразных, на длинных отростках. Слепленное животное становится легкой добычей.

Точно так же потеря любой из метаболических функций приводит к потере свойства целостности — организм нежизнеспособен, и в самых обычных условиях среды он умирает. Смерть — это гибель всех органов и систем, хотя причина смерти — отказ одного из них.

И здесь мы воочию убеждаемся в отличии внутренней биогенной среды организма от внешней среды, технической по своей природе, даже в том случае, когда она «вторглась» во внутреннюю сферу организма для помощи ему. Техническая среда, заменяющая какие-то функции орга-

низма, ...бессмертна. В живущем организме техническая компонента, заменяющая какой-то орган или систему, вполне аналогична своему живому прототипу. Конечно, речь может идти только о соответствии функций, выполняемых этими двумя «устройствами», живым и неживым. Но в отличие от своего биологического прототипа при потере целостности организма, когда все биологические компоненты гибнут, элемент техносферы — искусственный орган, безжизненный и ранее, сохраняется, «переживая» своего хозяина.

Здесь-то и возникают совершенно новые проблемы методологического, а может быть, и более широкого плана. Технический прогресс, возможность жизни в техносфере заставляют по-новому смотреть на, казалось бы, установившиеся и вполне классические представления о жизни вообще.

Вспомним слова В. И. Вернадского, который говорил, что «приходится различать проявление живого организма в двух аспектах — в проявлении совокупности живых организмов, как это имеет место в биогеохимии, и, во-вторых, в проявлении отдельных особей...». Действительно, жизнь — целостное системное явление, включающее множество живых элементов во всем богатстве их взаимосвязей. Но, с другой стороны, жизнь — это и конкретное бытие каждого такого элемента, прежде всего — отдельно взятого организма.

Как глобальное явление, охватывающее всю эволюционно меняющуюся биосферу, жизнь безгранична во времени и пространстве. Как бытие отдельного организма жизнь ограничена в пространстве и во времени, начиная от рождения конкретного носителя жизни и кончая его смертью.

Посмотрим теперь на основные атрибуты жизни, как они представлены в современной биологии. К основным трем характеристикам жизни объекта относят обычно неравновесный характер протекающих в нем процессов, способность к самоуправлению и, наконец, к самовоспроизведению. Мы имели в этой книге дело в основном с двумя первыми характеристиками живого — обменом веществ со средой (открытость системы в ее метаболической части) и управлением (информационно-кибернетическая компонента организма).

Технический прогресс в области жизнеобеспечения и искусственных внутренних органов приводит к тому, что едва ли не все три атрибута жизни, перечисленных

выше, в той или иной мере, в тех или иных ситуациях становятся зависимыми от технических элементов, устройств, систем. Говоря о жизни в техносфере, мы выяснили, что этот прогресс коснулся в большей мере индивидуального носителя жизни и в меньшей — жизни как глобального явления. Вероятно, эта тенденция сохранится и в ближайшем будущем — связь жизни с техническим окружением будет становиться все глубже, размежевание двух сторон жизненных явлений — индивидуальной жизни и жизни как глобального явления — будет проявляться все сильнее.

Впрочем, некоторые стороны такого размежевания можно было видеть и ранее. Взять, например, способность к самовоспроизведению. Мы уже говорили, что способность к воспроизведению (оставлению потомства) не является необходимым признаком жизни. Ведь организм вне репродуктивного периода остается по-прежнему живым, многие жизнеспособные гибриды в природе вообще не способны к репродукции. Другое дело — жизнь как глобальное явление. Хотя бы часть особей, составляющих популяцию, должна обладать способностью к продолжению рода. Для сохранения жизни как таковой, как глобального явления, самовоспроизведение является атрибутом абсолютно необходимым.

Что касается открытого характера живых систем и их способности к саморегуляции, управлению собственным поведением и собственной судьбой, то эти две черты в совокупности определяют возможность целостного существования каждого отдельного носителя жизни — организма. Если, как мы условились выше, под целостностью понимать способность организма поддерживать постоянство своей структуры и функции в определенных условиях окружения, то встает проблема переноса этой концепции на случай жизни в техносфере.

Организм, жизнь которого поддерживается искусственными органами, целостен в условиях адекватной ему техносферы — и только в них. В естественных условиях он нежизнеспособен — и, следовательно, не целостен. Логично, но как-то непривычно.

Другой аспект этой же проблемы — проблема границ внутренней среды в техносфере. В физиологии, как мы уже говорили в гл. I, считается, что граница, разделяющая внутреннюю и внешнюю среду, проходит по кожным покровам и внешним оболочкам органов. Если перенести эти принципы на искусственные органы, то придется при-

знать, что каждое техническое средство, аппарат, в котором происходят обменные процессы между организмом и внешней средой, сам делится на две части. Одна из них должна быть отнесена к внутренней среде организма, а другая — к его окружению. Так обстоит дело, например, с искусственной почкой. Опять логично, но как-то очень уж странно.

И последний аспект проблемы. Похоже, что самые интересные методологические вопросы возникнут при анализе информационного обмена организма со средой. Если в естественных средах потоки информации направлены только в одну сторону — от среды к организму, то в технически организованной среде обмен информацией носит двунаправленный характер. Среда так же активно может реагировать на изменение состояния организма, как и организм на изменение состояния среды. Ситуация кардинально изменившаяся. Будущее покажет, насколько принципиальны проблемы, возникающие в биотехнических системах, — системах, само возникновение которых заставляет по-новому смотреть на проблему жизни.

МИР ТЕХНИКИ И СОЦИАЛЬНАЯ СФЕРА (замечания при корректуре)

Эта книга была закончена летом 1986 года, а два последующих года стали временем знаменательного изменения наших взглядов и мироощущений, пробуждения активного интереса к жизни общества, механизмам его деятельности и его истории, «человеческому фактору» и самому человеку. Происходят глубокие сдвиги и в понимании того места и социальной роли, которую в современном мире играет человек.

Как же соотносятся идеи прочитанной книги с тем бурным социальным морем, в который погружен скромный круг рассмотренных нами вопросов?

Основная идея книги — развитие жизненных процессов от клетки до организма за счет накопления (наслоения) все новых и новых связей регуляторного типа. Клетка — одноклеточный организм — все более сложные многоклеточные организмы — организм человека — экзоэволюционные механизмы окружающего мира. Наслаивающиеся друг на друга управленческие механизмы — биохимические, физиологические, психические, биотехнические — имеют своей конечной целью сохранение жизни. Сельское хозяйство, промышленность, весь сложный мир машин, кажется, продолжает служить человеку точно так же, как служил Робинзону патриархальный мир его необитаемого острова.

Казалось бы, и социальные механизмы защиты, наслаиваясь на биологические слои регуляций, будут преследовать ту же цель — сохранение жизни каждого индивида и тем самым — продолжение рода человеческого. Но как биосоциальное явление человек перестает укладываться в рамки тех биологических и технических концепций, которыми мы оперировали на страницах книги.

Биологические механизмы защиты человека часто оказываются слишком хрупкими перед лицом довлеющих над ними социальных факторов, порожденных научно-техническим прогрессом. Скелетный каркас и нервно-мышечный аппарат человека — недостаточная защита при авариях современного транспорта с его скоростями и высотами. Кожа человека не спасает его от вируса СПИДа, занесенного неаккуратной медсестрой во время инъекции нестерильным шприцем. Системы биохимической защиты метаболической системы человека бессильны против отравляющего действия промышленных химических веществ при авариях на предприятиях. Просчеты воспитания сказываются в расширении алкоголизма, наркомании и токсикомании. Не потеряет ли таблица вероятностей возникновения непредвиденных катастроф, приведенная на стр. 214, своего «успокаивающего вида»?

Чем масштабнее, сложнее социальные механизмы жизнеобеспечения, тем более вероятно их отчуждение от человека, тем больше ощущается необходимость в новых подходах, новых комплексных программах изучения феномена человека. Проблемы «человек и техника», «человек в техносфере», которых мы касались в книге — только первые среди наиболее важных в наш век научно-технической революции.

Сегодня мы во многом осознали «остаточный принцип», многие десятилетия тяготевший над гуманитарной сферой, как в удовлетворении потребностей человека в жилище, досуге и при решении так называемой «продовольственной программы», так и в области моральных и социальных норм, создания правового государства и механизмов действенной социальной защиты человека. Остаточный принцип в решении социальных проблем отлично уживался с остаточным принципом в изучении человеческой проблематики в теории. Засилье атомной энергетики, ведущая роль физики в 1950—60-х годах и электроники в 70-х и 80-х, биология в роли Золушки — только некоторые штрихи возникшей ситуации. Говоря об этом периоде, некоторые ученые употребляют термин «технизм», подчеркивая тем самым приоритет «ведомственных» интересов, когда деятельность человека приобретает антигуманистическую направленность, а сам человек уже не может распорядиться результатом своих действий.

Человек в современном мире является элементом многочисленных социальных, социально-экономических и

прочих связей, поочередно выступая в них то в роли производителя (источника), то в роли потребителя (стока) материальных и духовных благ, в ролях рецептора, управляющего элемента или эффектора сложных кибернетических систем. Насколько известно автору, современная наука не создала сколько-нибудь полных описаний человека, его модели, позволяющей хоть с минимальной полнотой судить об этих аспектах деятельности человека. Как обеспечить потребности человека за пределами того узкого круга, о котором говорилось на страницах книги? Как стимулировать деятельность человека? Как человек реагирует на различного рода управленческие решения? Целостного представления о человеке нет даже в форме объединения знаний различных дисциплин, направленных на общие проблемы человека*).

Лет десять назад отдел юмора и сатиры стенгазеты Института проблем управления, в котором работал и работает автор, обсуждал вопрос о публикации в стенной печати озорного проспекта энциклопедии «Жизнь и деятельность А. С. Пушкина». Идея показалась слишком рискованной и осуществлена не была. А энциклопедия должна была якобы состоять из шести толстых томов:

Том 1. Биофизика.

Том 2. Биохимия.

Том 3. Физиология.

Том 4. Психология.

Том 5. Жизнеописание.

Том 6. Творческое наследие.

Вспоминая эту историю, автор ни в коей мере не хочет ополчить образ великого поэта, да он здесь и не причем. Просто пример этот всплыл в памяти как юмористический вариант комплексного подхода к феномену человека. Никакая привычная модель сегодня не может дать полного описания индивидуальности, морального и социального лица, нравственных и творческих принципов и мировоззрения человека.

Последние десятилетия добавили к проблеме человека новые пласты вопросов. С одной стороны, это глобальная устойчивость в экологической, политической и военной областях, с другой — сохранение нравственной природы человека, экологии истории и культуры. Все отчетливее мы начинаем понимать, что в центре всех этих проблем стоит — должен стоять — человек. Экономические и политические интересы партий и государств слишком долго стояли выше человеческих интересов. Наш «домашний»

*) Проблема комплексного исследования феномена человека становится сейчас настолько острой, что в начале 1988 года журнал «Вопросы философии» посвятил ей ряд обзоров и статей, многие идеи которых созвучны настоящему комментарию.

ведомственный подход — не самый яркий тому пример. Отношения человека с социальной и природной средой неоднозначны, а существующие противоречия во многом объективны и неизбежны. Само существование человека порождает потребности в веществах и энергии. В книге мы говорили об этих процессах как о первичных, ведущих. Удовлетворение потребностей человечества постепенно расширяло круг втягиваемых в «культурный оборот» природных явлений. Испещренная следами деятельности человека, пронизанная мириадами невидимых и явных техно- и социогенных связей, природа постепенно теряет свою автономность. Идеи В. И. Вернадского о ноосфере слишком хорошо известны, чтобы возвращаться к ним на последних страницах книги. Ноосфера Вернадского — итог деятельности человека, направленной на материальное обеспечение своего существования. Она — в заводах, шахтах, полях, изменивших геологическое лицо планеты.

Но говоря о ноосфере, хочется напомнить и о другой линии в ее трактовке, восходящей к Тейяру де Шардену: ноосфера — чисто духовное явление, «мыслящий пласт», который разворачивается над миром растений и животных — вне биосферы и над ней. Эта ноосфера — в мозгу человека, в книгах, библиотеках и музеях, в памяти людей (а теперь — и ЭВМ). Если она и соприкасается с материальной биосферой, то как топонимы на географических картах, исторические названия городов и череда заброшенных храмов по берегам Оки.

Для человека обе линии ноосферного развития равно важны. Богатство человека — не только в материальной и не только в интеллектуальной сфере. Эмоциональное богатство — такое же достояние человечества. Переориентация современной науки от установок «познай мир» к возвращающейся на историческую сцену максиме «познай самого себя» — одна из симптоматических черт дня. Шкала «добро — зло» так же ценна при оценках человеческой деятельности, как шкала «истина — ложь».

Дегуманизация — трудноизживаемая беда не только технических или естественных наук. Когда говорят, что «история человечества — это история развития его производительных сил, история освоения естественных производительных сил биосферы»*), то видят только одну сторону исторического процесса. Когда

*) Кузнецов М. А. Учение В. И. Вернадского о ноосфере: перспективы развития человечества // «Вопросы философии», — 1988. — № 3.

в центр истории с последовательным упорством ставился вопрос о процентном соотношении крестьян и ремесленников, исторических формациях и закономерностях, то сама история подвергалась таким же репрессивным мерам, как и человек в истории. «Прислушиваясь к торжественной и мощной поступи миллионов, не различали шагов простого человека, рядового гражданина» *).

Таковы некоторые тенденции развития наук о человеке в ближайшем будущем. Наша проблематика входит как малая частица в огромный круг общих интересов сферы «Человек в современном мире». Дальнейший прогресс в области «Организм в мире техники» самым непосредственным образом зависит от продвижения во всей этой сфере. Это касается и развития теоретических взглядов и концепций, и — в еще большей мере — внедрения в жизнь нашего поколения разнообразных технических и кибернетических средств помощи живому человеку.

К непосредственному кругу вопросов, рассмотренному на страницах этой книги, добавилось не так много. Из научных результатов, оставшихся за рамками рассмотрения, хочется отметить исследования физических полей человека, проведенные под руководством Ю. В. Гуляева и Э. Э. Годика в Москве (Институт радиотехники и электроники АН СССР). Многообещающие результаты получены в области исследования электромагнитных свойств человеческого организма коллективом «Отклик» в Киеве под руководством С. П. Ситько. Будем надеяться, что авторы этих работ сами расскажут о них специалистам и широкому кругу читателей.

Было организовано несколько интересных научных конференций, на которых обсуждались проблемы, рассмотренные на страницах книги. Так, в апреле 1988 г. в г. Красноярске Институт биофизики СО АН СССР и Институт проблем управления провели школу на тему «Гомеостаз на разных уровнях организации биосистем», где был представлен целый ряд интересных лекций и докладов. По материалам школы в 1990 г. издательство «Наука» планирует издать коллективную монографию под этим же названием.

Несколько передач, непосредственно связанных с тематикой книги, показало Центральное телевидение. Широкий резонанс, в частности, получил телерепортаж о враче Анатолии Кашперовском, который на глазах теле-

*) Г у р е в и ч А. Я. Историческая наука и историческая антропология // «Вопросы философии», — 1988, — № 1.

зрителей провел гипнотический сеанс обезболивания без наркоза при хирургической операции на обеих ногах. Сенсационность репортажа состояла в том, что сам сеанс проводился ... по телевизору, когда больная и врач находились в разных городах (17 июня 1988 г., программа «Взгляд»). Результат этот намного более впечатляющий, чем классический пример, приведенный на стр. 156 книги.

Психика — а возможность такого сеанса основана как раз на таинственных сегодня свойствах психики человека — остается единственной в мире областью, к изучению которой нет очевидных подходов. Граница между информационными полями мозга (кибернетический уровень) и «получателем» этой информации (психический уровень) для современной науки по-прежнему непроницаем. Соотношение между реальной жизнью, которую ведет организм, и ее отражением в информационных средах мозга («текстах» мозга) — одна из горячих точек, привлекающих специалистов в рамках самого широкого подхода к феномену человека. Читателям, интересующимся тем, что сейчас пишут об отношении реальной жизни к ее записям в текстовых структурах, хочется рекомендовать две статьи В. Руднева в рижском журнале «Родник» (№№ 3—4 за 1988 г.) под названием «Введение в XX век: направление времени в культуре».

Но это уже вопросы, далеко выходящие за горизонты нашего рассмотрения.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Адаптация 129
— кажущаяся 130
— неполная 130
— полная 130
Адаптированность 130
Аденозинтрифосфат (АТФ) 13, 14, 22, 26
Алгоритм Майлса 209
Анаболизм 18
Анализ компартментальный 34
Аналогия 167
Ангиостомия 26
Антиген 18
Антитело 18
Аппарат Гольджи (АГ) 11, 12, 14
Ауторегуляция 21, 47
- Баланс тепловой 215
Биокибернетика 10
Биополимер 9
«Биостатор» 86
Биофизика 7, 9
Биохимия 7, 10
- Вектор внешней среды 34
— потребностей 29
Вероятность возникновения аварийных ситуаций 214
- Гармоничность 148
Гемодиализ 204
Гипервентиляция 32
Гипноз 156, 230
Гипокапния 32
Глюкагон 70
Гольджи аппарат (АГ) 11, 12, 14
Гомеостаз 77, 82, 110
Гомойотермность 24
Гормон адренокортикостероидный (АКТГ) 127
Градиент концентрации 15
- Датчик 59
Диализ перитонеальный 207
Диффузия 15
ДНК 12
Дозатор автоматический 204
Дыхание искусственное 200
- Железа поджелудочная 199
- Задача управления в технике 91, 144
- Игра компьютерная 158
Иерархичность целей управления 135
Иерархия 133
Импринтинг 143
Инстанция управляющая 96
Инсулин 14, 69
Интерфейс 97
— человеческого организма 105
Интуиция 164
Информация наследственная 7
Источник 36
— ведомый 42
— ведущий 42
- Катаболизм 18
Кислота дезоксирибонуклеиновая (ДНК) 12
Клетка 9
—, ее функции 11, 13
Компартмент 34
Комплекс биотехнический 176
— водолазный судовой 225
— физиологический 10
Костюм вакуумный 221
— воздушного охлаждения для космонавта 217
— послеполетный защитный (ПЗК) 221
Котел метаболический 18
Коэффициент дыхательный 38
— усиления 57, 124
— эффективности активного управления 122
Кривая гликемическая 85
— гомеостатическая 114, 121
Критерий качества 91
Кровообращение искусственное 201
- Ле Шателье принцип 57
Лизис 18
Липосома 11, 12
Липемия абсорбтивная 111
Лицо, принимающее решение (ЛПР) 92, 96, 158
Ложноножка 55
- Майлса алгоритм 209

- Мембрана плазматическая 11, 14
 Метод пространства состояний 36
 Механизм транспорта 15
 Митохондрия 11, 12, 14
 Молекула-переносчик 16
 Молекула-посредник 12
 Моллюск 98
- Ноосфера 230
 Нужда 152
- Область адекватных реакций 122
 Обмен веществ 12
 — углеводный 68, 85
 Образование морфологическое 9
 Объект управления 52
 Окружение техническое 161
 Оптимальность в технике и биологии 143
 — конструкции организмов 146
 — управления 144
 Оптимизация решения 91
 Орган 9
 — внутренний искусственный 196
 Организм 9
 — , его функции 9, 16
 Отбросы 14
 Оценка интегральная 137
 — количественная 135
 — локальная 137
- Пессимум 146
 Планирование инъекций эвристическое 210
 Плато гомеостатическое 115
 Поведение 17, 97
 — целенаправленное 151
 Поддержание жизни 24
 Пойкилотермия 118
 Показатель ауторегуляции 138
 — качества 144
 — эвристический 140
 Поток 36
 Потребность организма 153
 — метаболическая 82
 Приборостроение медицинское 176
 Принцип адекватной конструкции организмов 146
 — Ле Шателье 57
 — максимальной простоты 146
 — оптимальной конструкции 146
 Программа поведения 17
 Процесс анаэробный 27
 — аэробный 27
 — метаболический 14
 Психика 104, 154, 230
 Психология 7
 — инженерная 165
- Раздражитель ключевой 191
 Реакция организма на поступление сахара 85
 — ферментативная 48
 Регулирование темпов 77
 — уровней 77
 Регулировка уровня автоматическая (АРУ) 64
 Регулятор 52
 Регуляция углеводного обмена 68
 — физиологическая 52
 Резистентность 127
- Ресурс гомеостаза 142
 Рецептор 19, 59
- Сборка молекул 10
 Свойства сохранительные 141
 Связь обратная 49, 58, 62
 — биологическая 184
 — отрицательная 66
 — параметрическая 64
 — положительная 66
 — по рассогласованию 62
 — проприоцептивная 181
 — прямая 50, 58
 Сердце искусственное 202
 Сеть эндоплазматическая 11, 12, 14
 Символ.ка Форрестера 41, 48
 Синтез 23
 — молекул 10
 Система биотехническая 166, 174
 — эргатического типа 181
 — инженерно физиологическая 183
 — метаболическая 10, 20, 24, 41
 — мониторинга наблюдения 177
 — нервная центральная (ЦНС) 19
 — оптимальная 144
 — организма 9
 — кибернетическая 52
 — энергетическая 27, 43
 — органный 9
 — ретикулоэндотелиальная 33
 — сенсорная 17
 — следящая 63
 — стабилизации 63
 — управляющая (УС) 19
 — эргатическая 179
 Снаряжение защитное индивидуальное 213
 Состояние стационарное 114
 Способность гомеостатическая интегральная 138, 140
 Среда жидкостная 11
 — окружающая 151
 — организма 30
 Средство коррекции метаболических функций 198
 — поддержания жизни техническое 161
 Сток 36, 42
 Стресс 126
 Строение живой клетки 11
 Структура организма 9
 — обобщенная 9
 Субъект управления 96
- Темп 30, 78
 —, управление им 78
 Теория систем 133
 Тепло 23, 24, 26
 Тест глюкозотолерантный (ГТТ) 85
 Ткань 9
 Транспорт активный 15
 — ионов 16
 — облегченный 15
 — пассивный 15
 Тревога 127
 Тромбообразование 183
- Улитка виноградная
 Управление 14
 — активное 71
 — внешнее 55
 — внутреннее 55

Управление в организме 52
— встроенное 55
— пассивное 71
— поведением 97
— организма 90
Уровень вещества 35, 81
—, управление им 79
— управления высший 89
Условия экстремальные 115
Уставка 63, 80
Устройство защитное для системы дыхания 215
Утомление 129

Фагоцитоз 33
Фермент 12
Физиология 7, 10
— инженерная 166, 186
Фонд энергетический 168
Форрестера символика 41, 48
Фосфорилирование 26
Функция организма кибернетическая 20
— метаболическая 21

Характеристика гомеостатическая системы ауторегуляции 140

Хемотаксис 33

Целеполагание 92
Целостность организма 226
Цитоплазма 11

Человек-оператор 7, 96

Эволюция 150
— экзосоматическая 89
Экзоцитоз 16
Экзоэволюция 172
Эксперимент вычислительный 46
Эндоцитоз 16
Энергия 14, 22
Энерготраты 25
Эргономика 164
Эстетика техническая 164
Эффектор 17, 19, 59

Ядро клетки 11, 12, 14
Язык 160

β-клетка 14

ORGANISM IN THE ENGINEERING WORLD: CYBERNETICAL ASPECTS

by V. N. Novoseltsev

This book dealing with the wide — range of problems in cybernetical analysis of organismic systems and of interrelations between these systems and the world of engineering is the first Soviet publication in the field and possibly one of the first at the international level.

Architecturally the book is very simple: it starts with «organismic components»— living cells, organs, physiological systems, then it passes to the body as a whole, then to organism as a part of bioengineering and biomedical systems and at last the line comes to the organism as the nucleus of the world of engineering.

The author relies on a unified cybernetic-based approach to describe life processes at all organismic levels from cells to psychics. For the first time, cybernetics of life support systems is made available to the wide nonexpert readership. These systems involve two major classes, viz artificial internal organs and individual protective garment for space and underwater activities. The author has succeeded in unifying these two fields of life support within the framework of engineering physiology, a new frontier in life sciences and engineering.

In this country the book is classified as oriented «to experts and wide readership». It is intended for students, engineers, biologists, physicians and for anybody interested in cybernetics of the organism. This means that all the cybernetic ideas and models are clearly presented, the mathematical and technical jargon is pertinent and down-to-earth.

The book contains over 70 figures, graphs and drawings illustrating structure and processes in living cells, physiological and psychical regulatory processes in the organism, engineering ways and means of life support.

References are scarcely given as footnotes but the reader will find there both names of classics of the world life science — Claude Bernard, Arthur Guyton, P. and J. Medawars as well as a running list of Soviet life scientists.

85 коп.

