

А. А. Акатов, Ю. С. Коряковский

**ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА РОССИИ:
ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ,
БУДУЩЕЕ**

МОСКВА
2009

При реализации проекта используются средства государственной поддержки, выделенные в качестве гранта в соответствии с распоряжением Президента РФ 192-рп от 14 апреля 2008 года



ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА РОССИИ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

Энергия, вырабатываемая на современных АЭС – самая экологически чистая, самая «зеленая» среди всех значимых источников электроэнергии.

В XXI веке в развитых западных и бурно развивающихся восточных государствах – США, Франции, Англии, Японии, Китае, Индии – не стоит вопрос о том, нужно или нет развивать ядерную энергетику. Необходимость и незаменимость ядерной энергии и в странах Запада, и в восточных государствах уже понятна всем.

Наша страна в этом смысле не является исключением: за ближайший период – до 2030 года – планируется увеличить долю ядерной энергии с нынешних 16 % до 25 %.

Постараемся рассказать о том, что представляет собой отечественная ядерная энергетика, о ее прошлом, настоящем и будущем.

Исходным импульсом для развития отечественной ядерной отрасли стала необходимость создания собственного ядерного оружия – как ответ нависшей угрозе со стороны Запада. Промедление и бездействие могло привести к тому, что советские города разделили бы участь Хиросимы и Нагасаки. Ученые блестяще справились со своей задачей – первая советская атомная бомба была испытана в 1949 году, – всего четыре года спустя после ядерной бомбардировки Японии. «Папой» нашей атомной бомбы стал академик Игорь Васильевич Курчатov.

Однако атомная бомба – не ручная граната и не пушечный снаряд. Она содержит не привычное взрывчатое вещество, а один из изото-



Академик Курчатov



Первая советская атомная бомба РДС-1

пов плутония – ^{239}Pu . Трудность ее изготовления заключается в том, что в природе не существует плутония! Получить его можно только из изотопа урана – ^{238}U , – посредством ядерной реакции. Следовательно, чтобы наработать достаточное количество плутония, не обойтись без ядерных реакторов.

И такие реакторы-наработчики плутония были построены. Они назывались **промышленными уран-графитовыми реакторами (ПУГР)**. Что означает «уран-графитовые»? Это значит, что топливом для них служил **обогащенный уран**, а замедлителем и отражателем нейтронов – **графит**. Под действием нейтронного потока в активной зоне происходит превращение неделящегося изотопа урана – ^{238}U – в ^{239}Pu , который и стал начинкой первой атомной бомбы. Приставка «промышленный» означает, что целью, смыслом жизни ПУГР было получение оружейного плутония.

Уже в сороковые годы XX века у советских ученых зародилась мысль: а разве энергию деления ядра можно использовать только для военных целей? Разве нельзя заставить эту колоссальную энергию служить людям другим образом, превращая ее в тепло



Обнинская АЭС – первая в мире!

и в электрический ток? И «отец» атомной бомбы Курчатов, наряду с военными проектами, возглавил работу по строительству первой атомной электростанции, за что его с полным правом можно также назвать отцом отечественной ядерной энергетики. И не только отечественной: ведь атомная электростанция, которая была запущена **27 июня 1954 года** в городе Обнинск, стала **Первой в мире АЭС!** Это было великое достижение нашей страны, сумевшей добиться такого успеха, невзирая на тяжелое послевоенное время.

Мы не случайно упомянули об уран-графитовых реакторах – ПУГР. Дело в том, что в первой АЭС был использован схожий по конструкции уран-графитовый реактор **АМ-1**.

АМ-1 стал первым в мире **энергетическим реактором** – то есть реактором, главной целью которого является выработка электроэнергии. В качестве топлива для него также использовался уран, а точнее, диоксид урана UO_2 , обогащенный по изотопу ^{235}U . Замедлителем, как и в ПУГР, стал графит.

В нашей стране было принято решение и дальше развивать реакторы такого типа. В результате на Белоярской АЭС были запущены энергоблоки с реакторами АМБ-100 и АМБ-200 – в 1964 и 1967 гг., соответственно. Но и эти установки стали лишь промежуточным этапом.



Первый реактор РБМК-1000 был запущен на Ленинградской АЭС

В 1973 году на Ленинградской АЭС был пущен первый энергоблок с реактором **РБМК-1000**. РБМК означает «**Реактор Большой Мощности Канальный**», а 1000 – его электрическая мощность, измеряемая в мегаваттах. РБМК-1000 стал первым крупномасштабным энергетическим реактором: он вырабатывает в 10 раз больше электроэнергии, чем реактор АМБ-100, и в 200 (!) раз больше, чем первый в мире энергетический реактор АМ-1 (мощность которого составляла всего 5 мегаватт). 1000 мегаватт – это много или мало? Чтобы это понять, представим себе: работая на полной мощности, РБМК-1000 может снабжать энергией 20 миллионов привычных для нас лампочек на 50 Вт, горящих в каждом доме. Четыре энергоблока РБМК-1000 на 50% обеспечивают электричеством такой крупный город, как Санкт-Петербург.

Особо отметим, что принципиальное устройство РБМК осталось таким же, как у первых промышленных реакторов – ПУГР, таким же, как у установок АМБ.

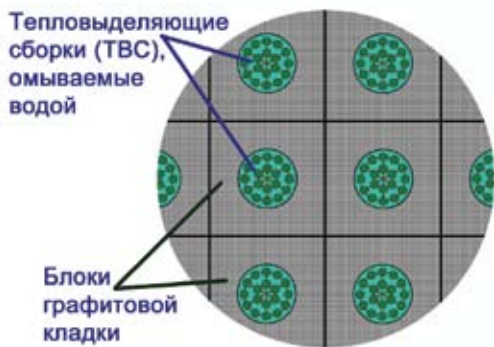
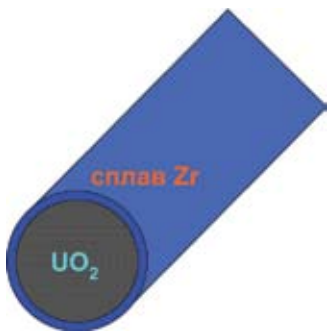


Схема размещения тепловыделяющих сборок в графитовой кладке РБМК

РБМК, также как и ПУГР, является уран-графитовым реактором. Топливом в нем служит диоксид урана UO_2 , обогащенный по делящемуся изотопу – ^{235}U . Замедлителем и отражателем нейтронов является графит. Реактор, как из кирпичей, сложен из графитовых блоков размером **250×250×600** мм, их

общая масса – около 2000 тонн. Конечно, для реактора используется не такой же графит, как в карандашах. Здесь необходим исключительно чистый материал – **графит ядерной чистоты**, практически не содержащий поглощающих нейтронов примесей. При возведении реактора из этих графитовых блоков требовалась исключительная аккуратность: ведь приходилось списывать в отходы «кирпичи» с малейшим сколом на ребре.

В каждом блоке есть отверстие, в которое вставляется технологический канал. А в технологический канал, в свою очередь, вставляется тепловыделяющая кассета, начиненная урановым топливом.



ТВЭЛ - тепловыделяющий элемент. Из ТВЭЛов формируются тепловыделяющие сборки (ТВС)

Получается, что реактор типа РБМК устроен достаточно просто (и в этом одно из его основных достоинств); он состоит из набора одинаковых элементов: участок кладки из графитовых кирпичей и пропущенный через них технологический канал.

Расскажем несколько подробнее, как происходит процесс преобразования энергии ядерной реакции в электроэнергию в реакторе РБМК.

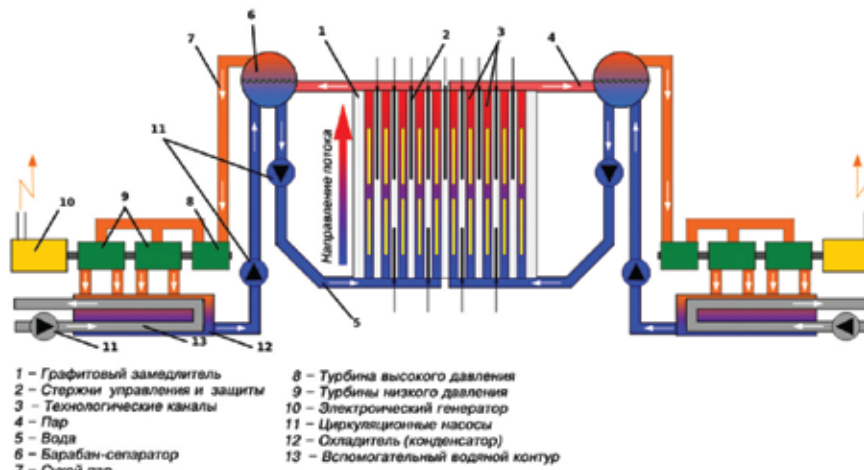


Схема РБМК

Начнем с понятия **активной зоны**. Активная зона – это самая главная часть любого реактора, в которой находится ядерное топливо и протекает ядерная реакция. В результате этой реакции выделяется колоссальное количество энергии. Но эта энергия – **тепловая**, а не **электрическая**; ее нельзя напрямую превратить в текущий по проводам ток.

Поэтому в активной зоне происходит передача тепловой энергии **воде**. Вода подается в активную зону, нагревается и превращается

в пар. Но не вся вода становится паром – из активной зоны выходит **смесь пара с водой**.

Чтобы отделить пар от воды, эту смесь запускают в специальный аппарат – **барабан-сепаратор**.

Почему нужно разделять пар и воду? Потому, что пар идет на **паровую турбину**: попадая внутрь



Паровая турбина



Турбинный зал РБМК-1000

турбины через входные сопла, пар бьет по лопаткам турбины, заставляя их вращаться. Все лопатки закреплены на валу турбины. Вал турбины сцеплен с валом **электрогенератора**: значит, когда вращается вал турбины, одновременно вращается и вал электрогенератора.

При этом в его обмотках возникает электромагнитное поле, и зарождается электрический ток – тот самый ток, который идет на промышленные предприятия, на освещение улиц, и, конечно, в наши дома. Что происходит с паром дальше? Когда он отработает свое на турбине, его охлаждают, при этом пар конденсируется – то есть превращается обратно в воду. Эта вода (питательная вода) очищается и направляется в барабан-сепаратор, смешиваясь с отсепарированной (отделенной от пара) водой, поступающей туда из активной зоны. Затем вода мощным насосом вновь подается в реактор, и цикл повторяется.

Отметим, что технологическая схема АЭС с РБМК представляет собой замкнутый контур, устроенный таким образом, чтобы радиоактивный пар и радиоактивная вода из реактора не могли попасть наружу и стать, таким образом, источником радиационной опасности.

В РБМК-1000 вода закипает и превращается в пар непосредственно



Подводная лодка К-3 «Ленинский комсомолец»

в реакторе, и пар, полученный из нее, сразу идет на турбину. Поэтому установку с РБМК называют **одноконтурной** – запомним это.

Реактор типа РБМК – один из основных реакторов, эксплуатируемых в нашей стране. Всего у нас работает 31 ядерный энергоблок, и одиннадцать из них – это блоки с РБМК-1000, которые вырабатыва-

ют 47% всей «ядерной» российской электроэнергии.

Реактор РБМК-1000 – хороший вариант, но не единственно возможный. Когда США в 1954 году спустили на воду первую в мире атомную подводную лодку, в нашей стране уже шли полным ходом работы по созданию собственной ядерной субмарины (Проект 627). Главным конструктором первой атомной подлодки был назначен В.Н. Перегудов, а работы по созданию энергетической установки проводились в организации НИИ-8,



Н.А. Доллежалъ

которую возглавлял Н.А. Доллежалъ – ученый, участвовавший вместе с Курчатовым в разработке первых реакторов для получения оружейного плутония.

Конечно же, для того чтобы поместить реактор в весьма ограниченное пространство подводного корабля, потребовались совсем другие подходы, другие технические решения. Во-первых, в качестве замедлителя нейтронов решили вместо графита использовать теплоноситель, то есть – воду! Поэтому такие реакторы называют **водо-водяными** – так как вода является одновременно и замедлителем, и теплоносителем. Во-вторых, из соображений радиационной безопасности, активную зону заключили в толстостенный стальной корпус (из-за чего эти реакторы называют **корпусными**). В-третьих, взяли ядерное топливо



с более высокой степенью обогащения по ^{235}U . И в-четвертых, вновь из соображений безопасности, установку сделали **двухконтурной**.

Что это значит – узнаем чуть позже.

А пока скажем, что лодочная ядерная энергетическая установка – также, как и наземная, – производит пар, который идет на турбину и вращает ее вал. Вал турбины сцеплен с **главным турбозубчатым агрегатом** (ГТЗА). Это устройство является аналогом коробки передач в автомобиле: только в данном случае вращаются не колеса, а гребной винт.

Установка на подлодке ядерного реактора позволяет преодолевать под водой без дозаправки десятки тысяч морских миль, что раньше было возможным только в научно-фантастических романах. И не случайно первая американская подлодка получила название «Наутилус» – ведь так воплотилась в жизнь идея, высказанная в романе Жюль Верна «20000 лье под водой».

Советская атомная подлодка К-3, названная в духе времени «Ленинский комсомол», была спущена на воду в 1957 году – спустя всего 3 года после спуска «Наутилуса».



Атомный ледокол «Ленин».

К-3 прошла ходовые испытания в 1958 году. **4 июля 1958 года** – запомним эту дату, ведь в этот день **впервые в истории отечественного флота для приведения корабля в движение была использована энергия ядерной реакции.**

«Сердцем» К-3 были два водо-водяных корпусных реактора типа ВМ-А.

Однако здесь, как и в случае с атомной бомбой, советские ученые думали не только о военном применении ядерной энергии. Поэтому наряду с проектом 627 разрабатывался другой, чисто мирный проект – речь идет о первом в мире надводном корабле на «атомной тяге», ледоколе «Ленин». Ядерная энергетическая установка этого судна проектировалась в ЦКБ-15 под руководством И.И. Африкантова. Судно было спущено на воду в том же году, что и подлодка «Ленинский Комсомол», а ходовые испытания прошло лишь годом позже. Изначально

ледокол работал на трех водо-водяных корпусных реакторах типа ОК-150, потом они были заменены на два гораздо более мощных ОК-900. Ядерные установки ледокола вырабатывали пар для турбогенераторов, которые питали постоянным током электродвигатели – а те, в свою очередь, приводили в движение три гребных винта.



Атомные ледоколы «Вайгач» и «Таймыр».

Только за первые 6 лет эксплуатации «Ленин» провел через полярные льды около 400 судов, а всего он проработал 30 лет. В целом в нашей стране было построено девять атомных ледоколов, в настоящий момент «на ходу» – шесть судов.

Расскажем еще об одном интересном варианте применения технологических принципов, использованных при конструировании судов с ядерным реактором.

Представим себе поселок или промышленное предприятие, расположенное в малоосвоенном регионе страны – например, на Чукотке или в Якутии. Обеспечение тепло- и энергоснабжения является давней проблемой в тех областях, ведь доставить туда привычное углеводородное топливо (уголь или газ) – непросто и недешево. Допустим также, что этот поселок расположен не очень далеко от морского побережья или судоходной реки. Тогда одним из лучших решений становится **ПАТЭС – Плавучая Атомная ТеплоЭлектроСтанция.**



ПАТЭС - экологически безопасный источник энергии

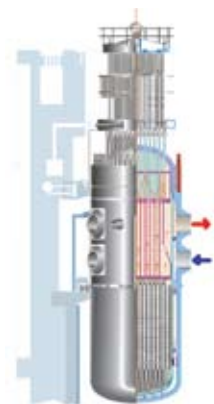
В случае с ПАТЭС энер-

глобок с ледокольным реактором устанавливается на плавучую платформу, которая водным путем транспортируется на свое «рабочее место»; остается наладить линию электропередач – и проблема решена!



Схема установки с реактором типа ВВЭР

Задача с топливоснабжением решается гораздо легче – ведь ПАТЭС сжигает в **сотни тысяч** раз меньше горючего, чем станции на угле или газе. Вдобавок, плавучая атомная станция не потребует отчуждения территории – для нее не надо вырубать лес, готовить площадку, прокладывать дороги, – значит, природа останется нетронутой. А по истечении срока службы ПАТЭС просто отбуксируют на утилизацию.



Реактор типа ВВЭР-1000

Итак, оказалось, что каналный уран-графитовый реактор оказался непригоден для использования на подводных и надводных кораблях. А что же с водо-водяным реактором? С ним ситуация прямо противоположная: будучи изначально созданным для судов, он неплохо устроился на суше, где и теперь отлично себя чувствует.

Конечно, он изменился – стал больше и мощнее,

но принцип работы остался таким же. За ним закрепилось название «ВВЭР» – **водо-водяной энергетический реактор**. Разработчик ВВЭР – Опытное конструкторское бюро «Гидропресс». Первая наземная установка с реактором ВВЭР-210 была пущена в 1964 году на Нововоронежской АЭС. Число «210», как и для РБМК-1000, отражает его электрическую мощность в мегаваттах. Установки с ВВЭР были признаны перспективными – и вскоре на той же Нововоронежской АЭС заработал реактор ВВЭР-365, а потом – и ВВЭР-440.

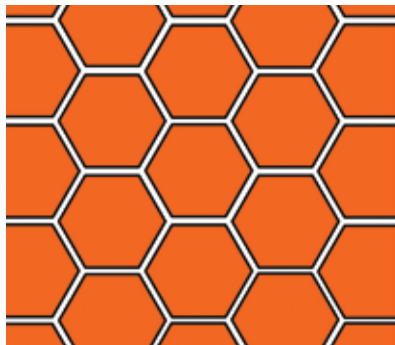


Схема размещения тепловыделяющих сборок в активной зоне ВВЭР

Но 440 мегаватт тоже не стали пределом мощности. 30 мая 1980 года был пущен первый реактор **ВВЭР-1000**.

ВВЭР-1000 стал, наряду с РБМК-1000, одним из флагманов советской, а потом и российской ядерной энергетики, этот проект определил нынешний статус нашей ядерной отрасли и ее перспективы.

Расскажем более подробно, как работает энергоблок с ВВЭР. Как мы уже знаем, главная часть реактора ВВЭР – активная зона – заключена, по аналогии с корабельными реакторами, в толстостенный стальной корпус. Тепловыделяющие кассеты с ядерным топливом здесь не вставляются в отдельные каналы, как в реакторе РБМК, а стоят вплотную друг к другу, наподобие шестиугольных сот в пчелином улье. Вода поступает в корпус реактора, проходит через активную зону, нагревается, но **не вскипает**, как в РБМК. Нагретая вода из реактора поступает в парогенератор. Проходя по трубам, эта вода (вода перво-



Внешний вид энергоблока с реактором ВВЭР-1200



Тепло-
деляющая
сборка (ТВС)
ВВЭР-1200

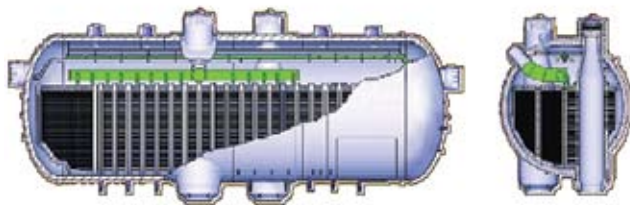
го контура) отдает тепло **воде второго контура**, после чего вновь закачивается в реактор.

А что происходит с водой второго контура? Она превращается в пар, который идет на паровую турбину. Как идет дальнейший процесс, нам уже известно: пар вращает вал турбины, вал турбины вращает ротор электрогенератора, и происходит выработка электрического тока. Пар, отходящий с турбины, охлаждают, он снова превращается в воду. Эта вода проходит через ряд вспомогательного оборудования и подается в парогенератор, чтобы вновь превратиться в пар, – так замыкается второй контур.

Может возникнуть вопрос: почему воде в первом контуре ВВЭР не позволяют кипеть, как в РБМК? Это сделано из соображений радиационной безопасности: ведь вода первого контура – радиоактивная. А во втором контуре у нас течет обычная вода (с химическими добавками), из которой образуется обычный пар. В этом и заключается идея – двухконтурная схема позволяет пустить на турбину обычный, **нерадиоактивный пар**.

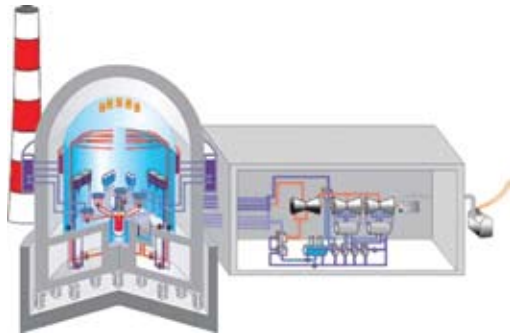
Для того чтобы не дать вскипеть воде первого контура, в нем поддерживают давление порядка 160 атмосфер (аналогичное давление оказывает столб воды высотой 1600 метров).

Планы развития отечественной ядерной энергетики на ближайший период опираются именно на реакторы ВВЭР. Новые установки ВВЭР-1200 будут иметь еще большую мощность, – так как планируется еще больше повысить температуру воды первого контура, что позволит повысить температуру и давление пара, идущего на турбину.



Парогенератор ВВЭР-1200

Одна из важнейших задач при проектировании ядерных энергетических установок – соответствие весьма жестким современным требованиям безопасности. Что сделано для этого в проекте ВВЭР-1200? Безопасность новых энергоблоков предполагается обеспечивать, основываясь на принципе **глубоко эшелонированной защиты**. Это означает, что на возможных путях распространения радиации в окружающую среду воздвигается ряд надежных барьеров. К таковым барьерам относятся топливная матрица, оболочка тепловыделяющих элементов, система охлаждения реактора, помещения, в которых размещено оборудование первого контура, и биологическая защита.



Энергоблок с реактором ВВЭР-640

Можно с уверенностью сказать, что комплекс систем безопасности ВВЭР-1200 в полной мере соответствует мировым подходам к созданию таковых систем для атомных электростанций, и российский реактор не менее надёжен, чем современный немецкий или японский.

Большинство АЭС – как в России, так и за рубежом – работают на водных реакторах, в которых тепловая энергия ядерной реакции деления передается воде. В других странах есть также ядерные энергоблоки, где теплоносителем служит тяжелая вода (D_2O) или углекислый газ. Но именно в нашей стране реализована технология, которая может стать фундаментом для **ядерной энергетики будущего**. Речь идет о реакторах **на быстрых нейтронах**. В них нельзя использовать воду, так как вода является замедлителем. Вариант, который выбрали отечественные ученые – запустить в контур в качестве теплоносителя не воду, не газ, а... расплавленный натрий!

Натрий, щелочной металл, очень активный элемент – он энергично взаимодействует с водой (даже с ее парами в воздухе), воспламеняется даже при небольшом нагреве. И тем не менее, было принято решение использовать его в реакторе. Рискованно? Возможно. Но

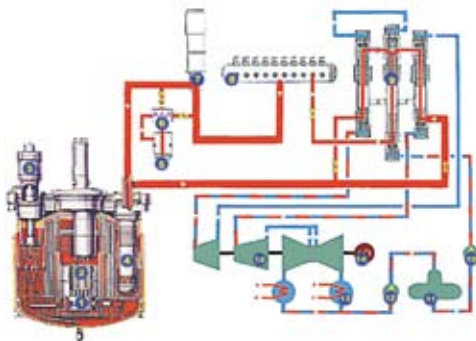


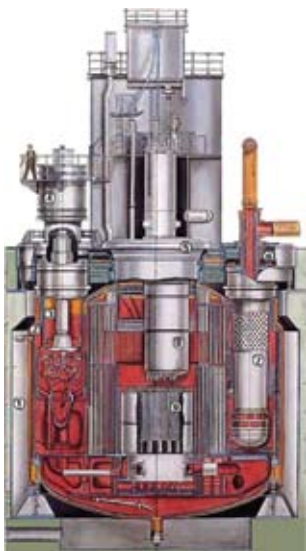
Схема установки с БН-600

надо задать себе вопрос: чем оправдан этот риск? Вспомним, что в ядерных реакторах в качестве топлива выступает ^{235}U . Его содержание в природном уране – всего 0.7%. Основным же изотопом в природной смеси является ^{238}U (его содержание более 99%). Но его нельзя применять в тепловых реакторах (каких в мире большинство) в качестве топлива, потому что он, к сожалению, не делится на тепловых нейтронах. А в реакторе на быстрых нейтронах ^{238}U можно использовать. Но главное преимущество реактора на быстрых нейтронах в том, что в них можно получить **больше ядерного топлива, чем сгорает**. Мы уже говорили, что при взаимодействии с нейтронами из ^{238}U нарабатывается изотоп плутония – ^{239}Pu . Так вот, этот плутоний можно использовать не только для ядерной бомбы, но и **в качестве горючего для «быстрого»**

реактора! Получается, что мы сжигаем 100 кг делящегося изотопа, и получаем при этом 120-140 кг свежего ядерного топлива – больше, чем израсходовали! Из-за этой особенности реакторы на быстрых нейтронах называют **бридерами** (от англ. breeder), что означает «размножитель».

Бридеры позволяют уйти от необходимости извлекать уран (запасы которого ограничены) из земных недр, перерабатывать и обогащать. С этими реакторами мы получаем практически неисчерпаемый источник ядерного горючего.

БР-5 – первый быстрый реактор с натриевым теплоносителем – был пущен в 1959 году. В 1968 году запустили БОР-60,



Реактор БН-600

а в 1973 году – БН-350. В 1980 году заработал (и работает вплоть до сегодняшнего дня) энергоблок с реактором **БН-600** (электрической мощностью 600 МВт) – первая в мире крупная ядерная установка с реактором-размножителем. Другие государства пытались перенять у нас опыт, но ни один из зарубежных проектов быстрого реактора не увенчался успехом. Поэтому наш БН-600 до сих пор остается единственной в мире крупномасштабной установкой с реактором на быстрых нейтронах. В недалёком будущем должен быть запущен его преемник – БН-800.

www.osatom.ru

ПОЛЕЗНЫЕ ССЫЛКИ

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» www.rosatom.ru

Общественный совет Госкорпорации «Росатом» www.osatom.ru

«Атомэнергпром», компания, консолидирующая гражданские активы атомной отрасли, ОАО www.atomenergoprom.ru

«Концерн Энергоатом», эксплуатирующая организация российских АЭС, ОАО www.rosenergoatom.ru

Радиационная обстановка на объектах «Росатома» www.russianatom.ru

Ростехнадзор, лицензирующий орган государственной власти (в т.ч. в области атомной энергетики) www.gosnadzor.ru

Московский «Атомэнергпроект» www.aep.ru

Нижегородский «Атомэнергпроект» www.niaep.ru

Санкт-Петербургский «Атомэнергпроект» www.spbaep.ru

ОКБ «Гидропресс», генеральный проектировщик реакторной установки ВВЭР-1200, ФГУП www.grpress.podolsk.ru



Публикации, выходящие в серии
«Библиотечка Общественного совета Росатома»,
призваны расширить знания читателей о радиации
и радиационной безопасности,
безопасном использовании атомной энергии
и перспективах развития атомной энергетики
в России и в мире



www.osatom.ru

Отпечатано в ОАО «Дом печати – ВЯТКА»
Заказ 3914. Тираж 10 000.