

Е. М. Балабанов

ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ



НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА

Е. М. БАЛАБАНОВ
ДОКТОР ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ



ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
Москва — 1957

○ ○ ○

ВВЕДЕНИЕ

Ядерный реактор — это по существу единственный пока аппарат, который позволяет человеку овладеть атомной энергией для энергетических целей. Как бы мы ни хотели использовать атомную энергию: на электростанции, морском судне, локомотиве и самолете, основным звеном для превращения энергии ядра в тепловую, механическую и электрическую энергию является ядерный реактор. Он дает нам возможность получать в огромных количествах радиоактивные вещества, играющие теперь такую большую роль в технике, науке и медицине. Поэтому вполне оправдан тот огромный интерес со стороны читателей различных кругов и профессий к этому новому аппарату, которому и посвящена эта книга.

Но понять принципы работы и устройство ядерного реактора нельзя без общего знакомства с существом ядерных процессов. Поэтому автору пришлось уделить достаточно большое место в книге, чтобы рассказать неподготовленному читателю об атоме, ядре, элементарных частицах и ядерных реакциях.

Все приведенные в книге данные о ядерных реакторах, об атомных электростанциях и о двигателях опубликованы в советской и иностранной печати.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЯДЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Атомы. Ученые давно знают, что окружающие нас вещества построены из атомов различных «сортов», которых насчитывается сейчас сто два. В большинстве случаев атомы группируются в молекулы, образуя разные химические соединения. Лишь иногда, когда вещество содержит атомы одного сорта, мы имеем дело с так называемым химическим элементом.

Химики умеют сравнительно легко соединять и разъединять по своему желанию атомы различных сортов, превращать молекулы одних веществ в молекулы других. Но никогда, ни в каких химических реакциях не удается превратить атомы одного сорта, одного химического элемента в атомы другого.

Поэтому вплоть до конца XIX века атомы считались неделимыми частицами — «кирпичиками», из которых состоит весь окружающий нас мир. Никакие доступные в то время способы — ни нагревание до высоких температур, ни высокое давление — не могли изменить свойств атомов. Но само разнообразие атомов наводило на мысль, что их различные свойства должны быть обусловлены неодинаковым внутренним строением, то есть, что атомы делимы и состоят из других, более простых частиц.

В конце XIX и начале XX века многие ученые пытались разгадать тайну атомов, изучить их строение. Но усилия физиков заглянуть внутрь атома долгое время оставались тщетными.

Открытие радиоактивности. В 1896 году французский физик Беккерель открыл явление, положившее начало успешному изучению внутреннего строения атома. Бывает так, что к великому открытию приходят почти случайно. То, что открыл Беккерель, совсем не соответствовало его ожиданиям.

Многие вещества после облучения их солнечным светом обладают способностью люминесцировать, то есть светиться еще долгое время после облучения. Примеры такого свечения давно известны: светится морская пена, некоторые рыбы, светятся и различные химические вещества.

Вызывали свечение в некоторых веществах и открытые

за год до опытов Беккереля рентгеновские лучи. Заметив сходство всех типов люминесценции, Беккерель решил исследовать, не испускают ли светящиеся люминесцирующие вещества рентгеновские лучи, проникающие через непрозрачные перегородки. Для этого он обернул фотографическую пластинку черной бумагой и положил сверху люминесцирующее вещество, содержащее уран. Лучи солнца в течение всего дня вызывали сильную люминесценцию вещества, но не могли проникнуть сквозь черную бумагу и засветить пластинку.

Опыты как будто бы подтвердили предположение Беккереля. На проявленной пластинке были видны очертания люминесцирующего предмета. Беккерель решил повторить эксперимент, но пасмурная погода помешала ему довести опыт до конца, и пластинка в черном конверте вместе с лежащим на ней люминесцирующим веществом несколько дней пробыла в темном шкафу. И вот, к удивлению Беккереля, после проявления оказалось, что эта пластинка почернела гораздо больше, чем в первом опыте.

Люминесцирующим веществом в этом опыте была сернокислая соль урана.

Беккерель исследовал большое количество различных химических соединений и обнаружил, что только вещества, содержащие уран, способны испускать лучи, проникающие через черную бумагу, покрывающую фотопластинку, причем большинство этих веществ не обладает способностью люминесцировать. Так была открыта радиоактивность.

Это явление было затем подробно изучено Марией Склодовской-Кюри и ее мужем Пьером Кюри. Они нашли, что многие элементы, преимущественно наиболее тяжелые, радиоактивны, а такие, как, например, радий и полоний, испускают невидимые лучи во много раз интенсивнее, чем уран.

Лучи, испускаемые радиоактивными веществами, по своим свойствам могут быть разделены на три вида: альфа-, бета- и гамма-лучи.

Тщательные исследования поведения радиоактивных излучений в магнитном поле и их проникающей способности дали возможность физикам определить заряд, массу и скорость частиц, составляющих альфа- и бета-лучи, и характер гамма-лучей.

Исследования показали, что альфа-лучи представляют собой поток довольно тяжелых частиц, движущихся со скоростью 15—17 тысяч километров в секунду. Каждая из этих частиц обладает двумя положительными элементарными зарядами электричества и имеет массу, приблизительно равную массе атома гелия. Бета-лучи состоят из очень легких отрицательно заряженных частиц — электронов, скорость которых достигает 300 тысяч километров в секунду. Гамма-лучи сходны по своей природе и свойствам с глубоко проникающими рентгеновскими лучами.

Очень скоро было обнаружено, что альфа-частица — это ядро атома гелия. Было установлено также, что, испуская альфа-частицы или бета-частицы, атомы одних элементов превращаются в атомы других. Например, атом радия, испуская альфа-частицу, превращается в атом благородного газа радона.

Модель атома Резерфорда. Мы уже говорили, что никакие химические реакции не могут превратить один элемент в другой. В процессе же радиоактивного излучения это превращение происходит самопроизвольно.

А раз природа сама допускает самопроизвольные превращения, то можно найти способ искусственно получать из одних элементов другие и осуществить мечты средневековых алхимиков, пытавшихся превратить свинец или ртуть в золото.

Представлению об атомах, как о неделимых кирпичиках мироздания, был нанесен сокрушительный удар.

Но радиоактивные излучения не только сигнализируют нам о превращениях атомов, о их сложном строении, они дают возможность изучить внутреннюю структуру атома. Но как проникнуть в атом?

С открытием радиоактивности у исследователей появились частицы, скорость которых достигала 17 тысяч километров в секунду. И вот известный английский физик Резерфорд решил использовать эти частицы как снаряды для исследования строения атома.

Изучая прохождение альфа-частиц через тонкие металлические листки, Резерфорд нашел, что большинство частиц проходит через листок, не изменяя заметно направления своего движения.

Отсюда можно сделать заключение, что атом — это не сплошь заполненный каким-либо тяжелым веществом

объем. Лишь малая часть объема атома препятствует прохождению альфа-частицы и вызывает ее отклонение от прямолинейного пути. Этот малый объем и есть ядро атома.

На первый взгляд, исследования Резерфорда кажутся весьма неточными. Так, слепой, ощупывая палкой камень, может приблизительно определить его форму и размеры, а также, учитывая усилия, которые нужно приложить к камню, чтобы сдвинуть его с места, оценить его вес (массу).

Физик-экспериментатор, бомбардируя атомы, также не видит их, но его методы исследования точнее палки слепого. В своих опытах Резерфорд бомбардировал атомы огромным количеством альфа-частиц. Он подсчитал число частиц, испытавших большое отклонение и, зная количество атомов в тонком листке, смог определить размеры атомного ядра и доказать, что в этом малом объеме сосредоточена почти вся масса атома.

Так возникла модель атома Резерфорда.

По этой модели атом представляется в виде маленькой планетной системы. В центре находится очень малая, но весьма тяжелая частица — атомное ядро, имеющее положительный электрический заряд. В ядре сосредоточена почти вся масса атома, а размеры его значительно меньше самого атома. Так, объем, занимаемый атомными ядрами в окружающих нас телах, составляет примерно только одну тысячемиллиардную часть всего видимого нами объема тела.

Вокруг ядра на сравнительно больших расстояниях движутся легкие частицы — электроны. В целом атом нейтрален, то есть не имеет электрического заряда. Поэтому число электронов в атомах равно количеству положительных элементарных зарядов ядра. Заряд ядра численно равен номеру элемента в периодической системе Менделеева и определяет электрические силы, с которыми атом воздействует на другие атомы, то есть его химические свойства.

Легче всего представить себе схемы строения наиболее простых атомов (рис. 1). Атом самого легкого элемента — водорода состоит из двух частиц. Вокруг ядра водорода вращается один электрон. У гелия — второго элемента периодической системы — вокруг ядра враща-

ются два электрона, у кислорода — восемь электронов, в атоме урана — 92 электрона. Чем тяжелее атом, тем сложнее он устроен.

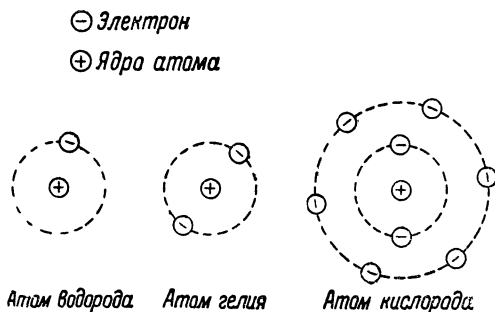


Рис. 1. Схема строения наиболее простых атомов

Атомное ядро. После того как было открыто сложное строение атома, все внимание физиков было перенесено на атомное ядро. Так же как и атомы, их ядра обладают разнообразными свойствами, которые могут быть объяснены только различной структурой ядер. Надо было найти те «кирпичики», или более простые частицы, из которых состоят ядра всех элементов.

Исследования радиоактивных превращений показали, что ядра некоторых элементов могут самопроизвольно распадаться, выбрасывая альфа-частицы и электроны.

Но физикам было ясно, что альфа-частица (ядро атома гелия) не может быть составной частью любого ядра. Ядро водорода, например, приблизительно в четыре раза легче альфа-частицы. Кроме того, большинство атомных ядер имеет массу, не кратную массе альфа-частицы.

При помощи весьма остроумных приборов — масс-спектрографов физики сумели очень точно измерить массы разных атомов и ядер. Оказалось, что атомные веса всех ядер измеряются числами, кратными весу ядра атома водорода. Поэтому ученые вначале предположили, что ядра всех элементов состоят из разного количества ядер водорода, или, как их принято называть, протонов. Но протон имеет положительный заряд, равный по вели-

чине отрицательному заряду электрона. Поэтому ядро с атомным весом A должно, очевидно, иметь A элементарных положительных зарядов. Для того же, чтобы атом был в целом нейтрален, его электронная оболочка должна, казалось бы, содержать A электронов. Но это не соответствует действительности: число наружных электронов в атоме значительно меньше. Пришлось сделать предположение, что остальные электроны находятся внутри ядра. Это как будто бы соответствует действительности. Бета-лучи, получающиеся при радиоактивном распаде ядер, есть не что иное, как поток очень быстрых электронов.

Однако эта гипотеза о протонно-электронной структуре ядра, как показали исследования, противоречит многим экспериментальным фактам. В 1932 году был открыт нейтрон — частица, не имеющая электрического заряда, масса которой близка к массе протона. Нейтроны были обнаружены в ядрах почти всех атомов, и на этом основании советским физиком Д. Д. Иваненко была высказана идея о том, что атомные ядра состоят из протонов и нейтронов. Эта теория была подтверждена всеми дальнейшими исследованиями и является в наше время общепринятой.

Схема строения самых простых ядер показана на рис. 2. Наиболее простым является ядро водорода. Оно состоит из одной частицы — протона, которая входит в состав всех остальных ядер. Ядро гелия уже значительно сложнее и состоит из четырех частиц: двух протонов и двух нейтронов. А ядро урана имеет весьма сложное строение: в нем 238 частиц, из которых 92 протона и 146 нейтронов.

Общее число протонов и нейтронов в ядре равно массовому числу M , которое представляет собой округленный до целого числа атомный вес A .

Количество протонов в ядре равно числу наружных электронов, то есть атомному номеру Z . Зная массовое

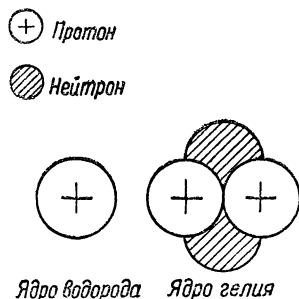


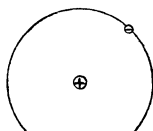
Рис. 2. Схема строения самых простых ядер

число (атомный вес) и номер химического элемента в периодической системе, очень легко определить количество нейтронов в атомном ядре. Оно равно: $N = M - Z$.

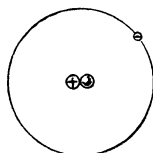
Заряд ядра определяется количеством протонов, и любое уменьшение или увеличение их числа вызывает изменение числа электронов в электронной оболочке атома.

Поэтому такое изменение числа протонов меняет химические свойства атома. Происходит превращение атома одного элемента в другой.

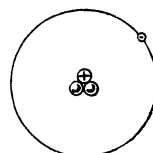
1 H
Водород



Легкий водород



Дейтерий



Тритий

⊕ Протон

● Нейтрон

Рис. 3. Схема строения изотопов водорода

Удаление или прибавление нейтронов в ядре не приводит к образованию нового химического элемента, так как заряд и, следовательно, номер элемента в периодической системе остаются прежними. Такие атомы отличаются друг от друга массами и, обладая одними и теми же химическими свойствами, являются разновидностями одного химического элемента. Эти разновидности называются изотопами, то есть веществами, находящимися в одной клетке периодической системы Менделеева. Каждый химический элемент, встречающийся в природе, представляет собой обычно смесь разновидностей этого элемента и является природной смесью изотопов.

У водорода, например, три изотопа, схемы атомов которых приведены на рис. 3. В ядре каждого изотопа водорода есть один протон, и поэтому во всех атомах существует по одному электрону, который уравнивает положительный заряд ядра. Дейтерий — устойчивый изотоп водорода с массовым числом 2 — содержится в природном водороде в количестве 0,02 процента. Ядро его атома

состоит из одного протона и нейтрона. Ядро сверхтяжелого радиоактивного водорода — трития состоит из трех частиц: одного протона и двух нейтронов. Трития в природной смеси водорода почти нет. Но сейчас он может быть получен в довольно больших количествах искусственно в ядерных реакторах.

Число устойчивых изотопов у отдельных химических элементов, например у олова, доходит до 10.

В настоящее время физикам известно около трехсот устойчивых и примерно восемьсот радиоактивных изотопов.

Ядерные силы. Теперь мы уже знаем, что изотопов значительно больше, чем элементов. Но почему ядра одних изотопов устойчивы (и они встречаются в природе часто), а других — легко распадаются и радиоактивны?

Что удерживает частицы в атомном ядре?

Между протонами, так же как и между другими одноименно заряженными частицами, действуют отталкивающие электростатические силы, которые при малых размерах ядра должны быть достаточно велики. Конечно, эти силы не могут осуществлять связь между частицами в ядре. Для того чтобы ядро оставалось очень прочным и компактным, необходимы очень большие силы, которые притягивали бы друг к другу ядерные частицы. О природе этих сил мы пока еще знаем очень немного. Знаем, что в то время как электростатические силы (притяжения и отталкивания) действуют на довольно больших расстояниях, ядерные силы имеют существенное значение только при сближении ядерных частиц. Если радиус атома определяется электростатическими силами притяжения, действующими между отрицательно заряженным электроном и положительным ядром, и равен примерно одной стомиллионной доле сантиметра (10^{-8} сантиметра), то радиус ядра определяется действием ядерных сил и приблизительно равен одной тысячемиллиардной доле сантиметра (10^{-12} сантиметра)¹.

Таким образом, как ни мал атом, на его диаметре можно уложить примерно 10 тысяч ядер.

¹ В физике принято большие и малые числа обозначать в виде положительной или отрицательной степени числа 10. Например, число молекул в одном кубическом сантиметре газа (число Лошмидта) равно 27 000 000 000 000 000 — двадцать семь миллиардов миллиардов. Такое число трудно выговорить и гораздо проще его записать так: $2,7 \cdot 10^{19}$ (два и семь десятых, умноженное на десять в девятнадцатой степени). Малые величины будут записываться как отрицательные степени числа 10. Так, в нашем случае радиус атома

равен $\frac{1}{100\,000\,000}$ сантиметра, то есть единице, деленной на единицу с восемью нулями: 10^{-8} (десять в степени минус восемь). В дальнейшем мы будем придерживаться этих обозначений.

Ядерные силы, по-видимому, могут быть объяснены взаимодействием протонов и нейтронов с какой-то третьей частицей. (В дальнейшем протоны и нейтроны мы иногда будем называть нуклонами.) Эта частица появляется при преобразовании протона в нейтрон или нейтрона в протон и является общей для двух взаимодействующих нуклонов. Таким образом, ядерные силы связаны с обменом частицами. Поэтому силы подобного типа называют обменными силами. Они весьма своеобразны и недостаточно наглядны в наших обычных представлениях. Для этих сил весьма характерно то, что их действие связано с обменом, с переменной ролей между двумя участвующими в этой связи нуклонами.

Протон и нейтрон непрерывно обмениваются друг с другом частицами, которые одновременно связаны с обоими нуклонами. По всей вероятности, такими частицами являются открытые в последние годы π -мезоны (пи-мезоны). Малый радиус действия ядерных сил объясняется тем, что π -мезоны — тяжелые частицы — не могут надолго покидать протоны и нейтроны. Вылетев, они либо возвратятся обратно, либо поглотятся другими ядерными

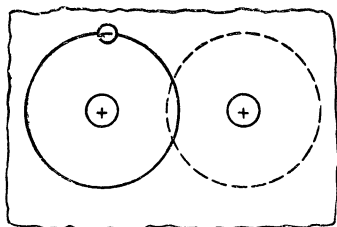


Рис. 4. Ион молекулы водорода. Два протона обмениваются одним электроном

частицами. Для последнего надо, чтобы нуклоны находились близко один от другого. Так осуществляется связь между ядерными частицами.

Ядерные силы имеют некоторое сходство с химическими силами, которые также являются обменными. В молекулах тоже происходит обмен частицами. Для примера можно взять ион молекулы водорода (рис. 4). Здесь имеются два протона вокруг которых вращается один электрон. Такой ион является вполне устойчивым образованием, и сила, которая определяет его устойчивость, связана с взаимодействием двух протонов с одним общим электроном. По-видимому, можно считать, что электрон вращается то вокруг одного, то вокруг другого протона. Здесь, так же как и в ядерных си-

стемах, сила связана с обменом частицей, с переходом электрона от одного протона к другому.

Прочность твердых тел, как известно, определяется электростатическими силами, действующими между атомами в веществе. Но ядерные силы в миллионы раз больше электростатических. Во столько же раз ядерное вещество прочнее самой крепкой стали. Если бы удалось изготовить из ядерного вещества ткань толщиной в одну десятую долю микрона (0,0001 миллиметра), то она была бы, безусловно, прочнее самой толстой брони. Правда, трудно представить себе военное судно, одетое такой броней, квадратный метр которой весит более 600 тысяч тонн.

Ядерное вещество обладает колоссальным удельным весом (плотностью). Мы привыкли до сих пор иметь дело с веществами, удельный вес которых не превышает 23 *, то есть один кубический сантиметр такого вещества весит не больше 23 граммов. Кубический же сантиметр ядерного вещества весит больше 100 миллионов тонн, то есть удельный вес его равен 10^{14} г/см³.

Эти огромные прочность и плотность объясняются ядерными силами, которые стягивают нуклоны в очень плотную и маленькую частицу — ядро.

Ядра обладают различной прочностью. Наиболее слабо связаны частицы в ядрах легких элементов, находящихся в начале таблицы Менделеева. Эта связь быстро растет с увеличением числа частиц в ядре, а следовательно, растет и прочность ядер. Как уже говорилось, ядерные силы являются короткодействующими, то есть каждая частица ядра связана только с соседними частицами. Между удаленными друг от друга частицами связи нет. Поэтому, начиная с некоторого элемента таблицы Менделеева, связь между частицами в ядрах атомов этих элементов не будет увеличиваться с увеличением числа частиц в ядре атома. Этим и объясняется то, что прочность ядер средних элементов (от кадмия до церия) приблизительно одинакова, то есть нужны примерно одинаковые силы для того, чтобы оторвать один нейтрон от любого из этих ядер. Ведь и прочность обычных веществ, например бумаги или воды, также не зависит от количе-

* Самым тяжелым веществом является редкий металл осмий. Его удельный вес равен 22,5.

ства вещества. Нужно затратить одинаковое усилие для того, чтобы зачерпнуть ложку воды из ведра или из стакана, оторвать полоску бумаги от целого рулона или от небольшого листа.

В ядрах атомов тяжелых элементов, стоящих в конце таблицы Менделеева, большое значение имеют электростатические силы. Если с увеличением числа протонов и нейтронов в ядре ядерные силы существенно не увеличивают прочности ядра, то электростатические силы отталкивания при этом увеличиваются. Они расталкивают все протоны ядра, даже наиболее отдаленные друг от друга. Электростатические силы как бы разрыхляют большие ядра, делают их менее плотными. Поэтому частицы в ядрах тяжелых атомов слабее связаны между собой, чем в средних.

Энергия атомного ядра. Для того чтобы разрушить атомное ядро, оторвать ядерные частицы друг от друга, надо совершить работу, затратить энергию. Но эта же энергия выделяется в ядерных реакциях, когда протоны и нейтроны соединяются в ядро под действием ядерных сил.

Из элементарной механики известно, что при движении какого-либо тела, происходящем под действием силы, всегда выделяется энергия. В гидроэлектростанциях, например, широко используется энергия воды, движущейся под действием сил земного тяготения.

Химическая энергия также получается в результате движения частиц под действием сил. Когда два атома водорода и один атом кислорода соединяются под действием электростатических сил в молекулу воды, выделяется значительная энергия и происходит взрыв гремучего газа.

Но как мы уже говорили, электростатические силы, связывающие атомы в различных химических соединениях, в миллионы раз меньше ядерных сил. Во столько же раз ядерная энергия больше химической.

Представим себе, что нам удалось каким-нибудь образом оторвать одну частицу и удалить ее на очень большое расстояние от ядра. Так как до этого частица прочно удерживалась ядерными силами, то для того, чтобы ее удалить, необходимо произвести работу, затратить энергию.

Один из основных законов природы — закон сохранения и превращения энергии — говорит о том, что энергия

не уничтожается и не возникает из ничего. Поэтому энергия, затраченная на удаление частицы, будет компенсирована энергией, которая выделится тогда, когда эта или другая частица вновь присоединится к ядру.

Таким образом, каждая частица в ядре связана с вполне определенной энергией, и значение этой энергии может быть вычислено, если каким-нибудь способом удастся измерить энергию ядра до и после удаления частицы. В этом случае мы определим энергию, которая называется энергией связи частицы в ядре. Полная энергия связи ядра — это энергия, которая необходима для разделения ядра на все составные частицы.

В разных областях науки ученые пользуются различными, наиболее удобными единицами измерения энергии. В атомной физике, где исследуется электронная оболочка атома и рассматривается сравнительно медленное движение электрона, в качестве единицы измерения энергии принята такая энергия, которую приобретает электрон при прохождении в электрическом поле разности потенциалов в один вольт. Эта единица называется электрон-вольт (эв).

Но энергия связи частиц в ядре в миллионы раз больше, нежели энергия связи электрона в атоме. Поэтому в ядерной физике пользуются единицей энергии, равной миллиону электронвольт (мегаэлектронвольт — Мэв). Конечно, эти единицы энергии, поскольку они относятся к ничтожно малым ядрам и ядерным частицам, очень малы. При подъеме шарика весом в один грамм на высоту одного сантиметра вы затрачиваете энергию, равную примерно 10^9 Мэв. Однако не следует забывать, что в одном грамме вещества находится огромное число атомов. Для того чтобы поднять один атом на эту же высоту, понадобилась бы энергия, равная всего 10^{-12} Мэв.

На рис. 5 приведена кривая зависимости энергии связи ядер от их массового числа. На оси ординат отложены средние значения энергии связи, приходящиеся на одну ядерную частицу, то есть $\frac{E}{M}$, где E — энергия связи ядра, а на оси абсцисс — массовое число M .

Так как мы условились, что энергия связи определяется затраченной на удаление частицы работой, она является по существу отрицательной величиной. Увеличение энергии связи ядра приводит к более устойчивому его

состоянию, то есть к уменьшению всей энергии ядра. Переход из менее устойчивого состояния в более устойчивое всегда сопровождается выделением энергии. Вспомните, какую работу совершает падающая с высоких гор вода или какое-нибудь нагретое тело при охлаждении.

При взгляде на кривую рисунка сразу бросается в глаза, что мы можем ожидать выделения энергии только в таких ядерных превращениях, в результате которых бу-

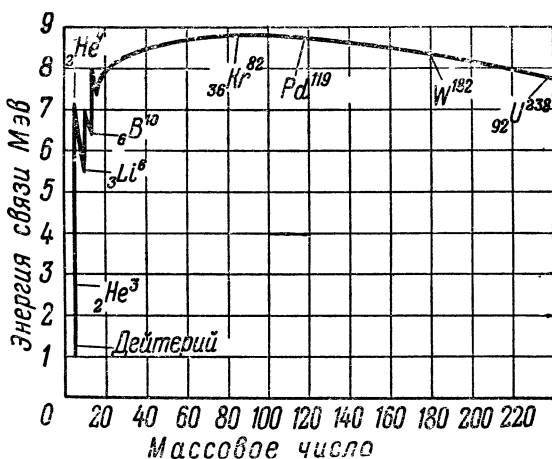


Рис. 5. Кривая зависимости энергии связи от массового числа ядер. Наиболее сильно связанными, то есть самыми устойчивыми, являются ядра, имеющие среднее массовое число

дуг образованы самые устойчивые ядра — ядра средней величины, то есть при соединении (синтезе) легких ядер или при делении тяжелых.

Если бы нам удалось узнать энергию системы до и после ядерного превращения, мы могли бы определить величину выделяющейся при этом энергии.

Около пятидесяти лет тому назад выдающийся физик А. Эйнштейн установил закон взаимосвязи массы и энергии, который играет настолько большую роль в изучении ядерной физики, что его наравне с законами сохранения энергии и массы считают одним из основных законов природы. Этот закон может быть выражен очень простой формулой $E = mc^2$, где m — масса вещества и c — ск-

рость света, равная 300 тысячам километров в секунду, или $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек.

Очевидно, из этого закона следует, что если какое-нибудь тело или частица приобретает или теряет энергию, то вместе с энергией приходит или уходит некоторое количество массы:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}.$$

Величина знаменателя в этой формуле $c^2 = 9 \cdot 10^{20}$ говорит о том, что нужно очень большое выделение энергии, чтобы мы могли заметить маленькое изменение массы, или, как его называют, дефект массы.

Например, в химической реакции образования воды выделяется довольно большая энергия, и можно утверждать, что масса молекулы воды меньше массы двух атомов водорода и одного атома кислорода. Но энергия, выделяющаяся в химических реакциях, все же недостаточно велика, чтобы мы даже очень точными приборами смогли обнаружить это различие в массах.

В ядерных же реакциях энергии выделяется в миллионы раз больше, чем в химических, и поэтому дефект массы, получающийся в различных ядерных реакциях, будет значительным. Если взвесить ядро какого-либо атома, то окажется, что его масса всегда меньше суммы масс протонов и нейтронов, составляющих это ядро.

Возьмем, например, ядро гелия. Оно состоит из двух протонов и двух нейтронов и весит 4,004 *. Сумма же массы всех четырех частиц будет 4,034. Таким образом, дефект массы при образовании ядра гелия будет 0,03. Пользуясь формулой взаимосвязи массы и энергии, можно определить, какой энергии соответствует это уменьшение массы. И оказывается, что при образовании одного килограмма гелия дефект массы составляет 80 граммов. При этом выделяется энергия, равная примерно $4,47 \cdot 10^{28}$ Мэв, или $1,7 \cdot 10^{11}$ больших калорий, что равноценно теплу, получающемуся при сгорании 20 тысяч тонн угля.

Наибольшая энергия должна, очевидно, выделяться при образовании средних ядер. При образовании из протонов и нейтронов одного килограмма хрома выделяется

* За единицу массы в атомной физике, так же как и в химии, обычно принимается $1/16$ массы атома кислорода.

энергия, равная $2,1 \cdot 10^{11}$ больших калорий. Для подсчета энергии, выделяющейся при различных ядерных реакциях, можно также воспользоваться кривой графика рис. 5, которая вычислена из известных масс различных ядер.

Энергия связи, приходящаяся на один нуклон для тяжелых ядер, примерно на 1 Мэв меньше, чем энергия связи средних.

Радиоактивный распад тяжелых элементов и определяется как раз тем обстоятельством, что ядра этих элементов менее устойчивы. Переход этих ядер в более устойчивое состояние всегда сопровождается выделением энергии. Так, при распаде одного грамма радия на ядра гелия и радона выделяется энергия, равная примерно $3,5 \cdot 10^6$ больших калорий. Но использовать эту энергию нельзя, так как радий распадается чрезвычайно медленно. За 1590 лет из одного грамма радия распадается только половина. Если бы можно было ускорить этот процесс, то энергии, выделяемой одним граммом радия, было бы достаточно, чтобы электрическая лампа мощностью 50 ватт могла гореть в течение семи лет. Однако физики пока еще практически не умеют влиять на скорость естественного радиоактивного распада радия.

Открытие закона взаимосвязи массы и энергии в свое время послужило основанием для всякого рода идеалистических высказываний. «Материя исчезает!», «Не выполняется закон сохранения массы и энергии!» — кричали физики различных идеалистических школ. Подобные высказывания совершенно беспочвенны. Прежде всего масса и материя — разные понятия. Материя, как ее определяет В. И. Ленин, есть философская категория для обозначения объективной реальности, которая дана человеку в его ощущениях, которая копируется, фотографируется, отображается нашими ощущениями, существуя независимо от них. Таким образом, всевозможные элементарные частицы (открытые и еще не открытые), поля (электромагнитное, гравитационное и другие), свет — это разные формы материи, проявляющейся в различных движениях. Если под массой подразумевать меру инерции, одного из самых общих свойств материи, то различные формы материи всегда обладают массой, так же как и энергией.

Очень легко показать, что закон взаимосвязи массы и

энергии отнюдь не опровергает законы их сохранения, а доказывает. Эти законы всегда выполняются.

Предположим, что произошла ядерная реакция деления ядра атома урана и при этом выделилась энергия. Масса получившихся «осколков» ядра уменьшилась по сравнению с массой развалившегося ядра урана. Вот эту разницу массы и составляют массы нейтронов, квантов гамма-лучей, электронов и других элементарных частиц, выделившихся при ядерной реакции¹.

Можно утверждать, и это подтверждается опытом, что энергия и масса частиц и ядер, вступивших в ядерную реакцию, будут в точности равны энергии и массе образовавшихся в результате превращения частиц и ядер. При этом надо учесть, что гамма-квант также обладает массой и, кроме того, согласно принципу относительности масса частиц увеличивается с ростом скорости их движения:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где m_0 — масса покоящейся частицы и v — ее скорость. Таким образом, при скоростях, близких к скорости света c , масса частиц значительно возрастает.

В 1932 году физиками при исследовании космических лучей были обнаружены новые частицы. Они по своим свойствам оказались очень похожими на электроны. Но, имея равную с электронами массу, эти частицы, названные позитронами, несут положительный заряд. Позитроны в паре с электронами ведут себя довольно необычно: при соединении они исчезают, или как говорят, аннигилируют. На этом основании физики-идеалисты пытаются доказать, будто бы современная физика открыла исчезновение материи и «опровергла» материализм. Однако опыты показывают, что вместо пары противоположно заряженных частиц появляются два равных по величине гамма-кванта, энергия и масса которых равны энергии и массе электрона и позитрона.

Существует и обратное явление — «рождение» пары

¹ По современным представлениям, любое излучение (света, рентгеновских и гамма-лучей) происходит порциями определенной величины — квантами. Чем короче длина волны излучения, тем больше величина кванта.

частиц (позитрона и электрона) при поглощении гамма-кванта каким-либо тяжелым ядром. Причем само ядро в этом «рождении» не участвует. Позитрон и электрон образуются вблизи ядра, в области действия электростатических сил его положительного заряда.

Опыты показали, что гамма-квант превращается в электрон и позитрон, сумма энергий и масс которых равна энергии и массе этого гамма-кванта.

Таким образом, при аннигиляции и «рождении» пар, так же как и во всех процессах, выполняются законы сохранения энергии и массы.

Давайте проведем воображаемый опыт. Заклучим какой-нибудь объем, где находятся различные частицы и ядра, в непрозрачную для любых частиц и излучений оболочку. Тогда, что бы ни происходило внутри этого объема, общая энергия и масса всего объема останутся неизменными. Любые частицы и гамма-кванты, испускаемые при ядерных реакциях, возбуждении и ионизации атомов, останутся в том же объеме. Будет ли происходить аннигиляция пар либо их «рождение», передаст ли фотон свою энергию электрону или электрон возбудит атом с последующим излучением кванта света — в любом процессе не будут исчезать ни масса, ни энергия. Вместе с тем масса всего объема определяет его общую энергию по закону $E = mc^2$.

Конечно, такой идеальной оболочки, непрозрачной для любых излучений, не существует, и при любом процессе, где выделяется энергия, часть этой энергии теряется, уходит из малого объема в пространство. Законы же сохранения массы и энергии всегда выполняются.

Ядерные реакции. В средние века алхимики пытались превращать одни вещества в другие. Больше всего их интересовало искусственное получение золота, сулившее несметные богатства. Сейчас нам понятна бесплодность таких попыток. Даже в наше время химик, обладающий несравненно большими знаниями и опытом, в прекрасно оборудованной лаборатории с помощью какого-либо химического процесса не может превратить атомы одного элемента в атомы другого.

Но в начале XX века мечту алхимиков осуществили физики. Они сумели превратить одни элементы в другие.

Впервые превращение одного элемента в другой было выполнено Резерфордом в 1919 году.

Еще значительно раньше физики научились регистрировать отдельные альфа-частицы, получаемые при радиоактивном распаде, на экране, покрытом сернистым цинком.

Посмотрите внимательно в темноте на светящийся циферблат ваших часов. Если вы поднесете его ближе к глазам или воспользуетесь увеличительной линзой, то увидите, что свечение циферблата перестанет быть ровным. То в одном, то в другом месте циферблата будут возникать быстрогаснущие отдельные вспышки. Эти вспышки появляются неожиданно и через самые различные промежутки времени. Состав, покрывающий стрелки и цифры на часах, обычно состоит из сернистого цинка, к которому примешано небольшое количество радиоактивного препарата. Отдельные вспышки, или, как их обычно называют, сцинтилляции, обусловлены взаимодействием излучаемых препаратом альфа-частиц с сернистым цинком.

Этим явлением сцинтилляции и воспользовался Резерфорд в своих исследованиях. Он поместил радиоактивный препарат (рис. 6) *A* в сосуде, наполненном газом, в

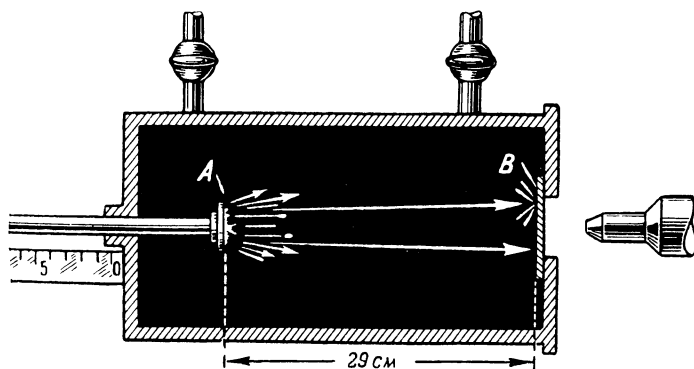


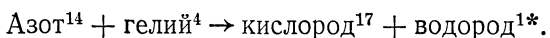
Рис. 6. Схема опытов Резерфорда. Достигнуть экрана и произвести сцинтилляцию могут только протоны, выбитые альфа-частицей из ядра азота

таком месте, что альфа-частицы не могли достигнуть стенки сосуда, где был расположен экран *B*. Достаточно толстый слой исследуемого газа поглощал все альфа-частицы, и вспышек на экране не появлялось.

Однако при наполнении сосуда азотом на экране появились сцинтилляции. Это не могли быть альфа-частицы.

При наполнении сосуда кислородом или углекислотой вспышки на экране исчезали. Совершенно ясно, что частицы, вызывающие сцинтилляции, могли быть получены только в результате взаимодействия (реакции) альфа-частиц и атомов азота.

Тщательные исследования показали, что в азоте действительно имела место ядерная реакция, которую можно записать так:



Легкие частицы слабее поглощаются газом. Поэтому частицы, пробегающие путь почти в 30 сантиметров от радиоактивного препарата до экрана, могли быть только ядрами водорода — протонами.

Таким образом, было установлено, что при бомбардировке ядер азота альфа-частицами последние как бы застревают в ядрах. Но взамен альфа-частицы из ядра вылетает протон. Получающееся при этом новое ядро является ядром изотопа кислорода с массовым числом 17.

Интересно подсчитать уже известным нам методом, каков баланс энергии в этой реакции. Написав сумму масс ядер до реакции в левой части формулы и сумму масс ядер после реакции в правой части ($14,0075 + 4,0040 \rightarrow 17,0045 + 1,0081$, или $18,0115 \rightarrow 18,0126$), видим, что сумма масс частиц до реакции меньше суммы масс, получившихся после реакции частиц, на 0,0011, то есть в этой реакции энергия не выделяется, а поглощается. В данном случае превращение элементов идет за счет энергии альфа-частиц, выбрасываемых ядрами радиоактивного препарата.

Таким образом, мы выяснили, что не при всякой ядерной реакции выделяется энергия. Так же как и в некоторых химических реакциях, значительное число ядерных превращений требует расхода энергии.

Ядро — жидкая капля. Итак, ядерные реакции можно осуществить путем бомбардировки ядер частицами. Такая частица, попав в ядро, останется в нем, удерживаемая большими ядерными силами. Но быстрая частица, попав-

* Здесь цифры справа над названием элемента обозначают число частиц (протонов и нейтронов) в ядре. Сумма этих чисел в правой части формулы должна быть равна сумме чисел в левой части формулы.

шая в ядро, передаст свое движение всем ядерным частицам.

Закон сохранения энергии утверждает, что энергия влетевшей в ядро частицы не пропала. Она равномерно распределилась между всеми ядерными частицами. Это очень похоже на то, что происходит при нагревании жидкости. Действительно, мы знаем, что если через воду пропустить пар, то молекулы пара, сталкиваясь с молекулами холодной воды, будут передавать им свою энергию. Молекулы воды придут в более энергичное движение. Иными словами, температура воды, которая определяется скоростью движения молекул, повысится — вода нагреется.

Скорости движения частиц в ядре, так же как и скорости молекул жидкости, соответствуют определенной температуре. Но скорость ядерных частиц в десятки тысяч раз больше скорости молекул жидкости и газа при обычных температурах, и поэтому температура ядра колоссальна. Когда частица с энергией около 10 Мэв влетает в ядро, его температура достигает 10—15 миллиардов градусов. Такое ядро можно представить себе в виде сильно нагретой капли жидкой ядерной материи, способной испаряться.

Очевидно, что через некоторое время после резкого повышения температуры ядра из него вылетит (испарится) какая-нибудь частица. Энергия, необходимая для вылета этой частицы, соответствует теплоте испарения жидкости.

Аналогию ядра с жидкой каплей можно провести значительно дальше. Ядро, как уже указывалось, состоит из двух сортов частиц: протонов и нейтронов, и, следовательно, его нужно сравнивать со смесью двух жидкостей. Скорость испарений каждой из этих жидкостей зависит от температуры. Так же и в ядре при определенных условиях может быть наиболее вероятен вылет нейтрона или протона. Раскаленная жидкая капля железа излучает видимый свет. Нагретое до высокой температуры ядро также излучает гамма-лучи, обладающие способностью проникать через толстые непрозрачные слои.

Над поверхностью нагретой воды вы всегда наблюдаете туман. Это то, что в нашей практике не совсем верно называют паром. Капельки тумана состоят из большого числа молекул и образуются при конденсации

паров после выхода с поверхности жидкости. Примерно то же наблюдается в ядерных реакциях. Часто вылетают не отдельные частицы, а целое ядро, состоящее из четырех ядерных частиц, — альфа-частица. Правда, аналогия здесь не совсем полная. Альфа-частица, по-видимому, образуется внутри ядра, а капли тумана — после выхода молекул с поверхности жидкости.

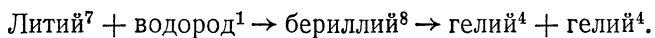
После вылета какой-нибудь частицы ядро охлаждается так же, как охлаждается при усиленном испарении жидкость. Как на испарение жидкости, так и на вылет частицы затрачивается энергия. В том случае, когда ядро обладает большой остаточной энергией, возможен вылет второй частицы. Но если остатка энергии не хватает для удаления второй частицы, ядро охлаждается испусканием света — гамма-излучением.

Не все частицы легко могут проникнуть в положительно заряженное ядро атома. Протону или альфа-частице, несущим положительные заряды, нелегко подойти к одноименно заряженному ядру. Сильное электростатическое поле ядра будет отталкивать такую частицу. Преодолеть электростатические силы и попасть в область действия ядерных сил может только достаточно быстрая, обладающая большой энергией заряженная частица.

Очень долго физики пользовались альфа-частицами, выбрасываемыми ядрами радиоактивных элементов при естественном их распаде. Однако для осуществления многих ядерных реакций необходимы элементарные частицы с большими энергиями, которые при радиоактивных превращениях не получают. Чтобы получить частицы с большими энергиями, надо сообщить им большие скорости движения.

Ускоренные заряженные частицы можно получать в так называемых ускорителях и этими быстрыми частицами бомбардировать ядра различных веществ. Часть заряженных частиц попадает в атомные ядра и производит ядерные реакции.

Например, быстрый протон, попадая в ядро легкого элемента лития, совершает следующую реакцию (рис. 7):



Ядро лития содержит три протона и четыре нейтрона. После его слияния с протоном мы будем иметь новое ядро, содержащее восемь частиц (четыре протона и че-

тыре нейтрона). Это уже изотоп бериллия с массовым числом, равным восьми. Но ядро бериллия ⁸ неустойчиво и очень быстро распадается на две альфа-частицы (ядра гелия). При этом освобождается большое количество энергии.

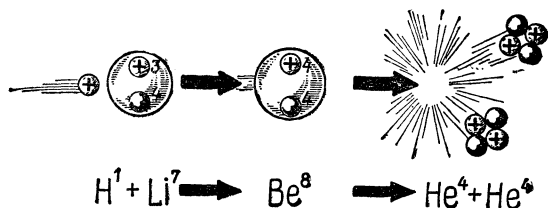


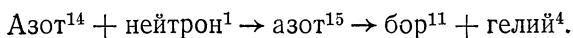
Рис. 7. Схема ядерной реакции:
Водород¹ + литий⁷ → бериллий⁸ → гелий⁴ + гелий⁴

После открытия в 1932 году Жолио-Кюри и Чадвиком нейтронов исследователи получили новое мощное средство для осуществления ядерных реакций. Нейтроны — незаряженные частицы, и на них не действуют электрические силы. Поэтому подойти к ядру и произвести ядерное превращение могут даже очень медленные нейтроны. Больше того, очень часто медленные нейтроны гораздо активнее, чем быстрые, производят ядерные превращения. Такие нейтроны находятся вблизи ядра большее время и поэтому легче захватываются ядерными силами ядра.

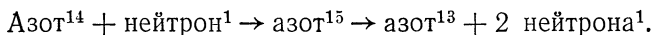
При захвате ядром нейтрона получается новое ядро, и так как нейтрон не имеет заряда, оно остается ядром изотопа первоначального химического элемента.

Даже самый медленный нейтрон, «упавший» под действием ядерных сил в ядро, приносит с собой значительную энергию. В результате захвата нейтрона ядро «нагревается». Охлаждение полученного ядра может, как мы уже говорили, проходить несколькими способами: из него выбрасывается одна или две частицы или испускаются гамма-лучи.

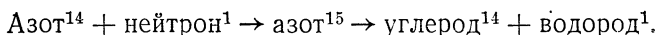
Например, целый ряд реакций с нейтроном дает ядро азота. На быстрых нейтронах может идти реакция с испусканием альфа-частицы:



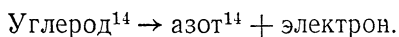
Может идти также реакция, где из ядра азота 15 вылетают две частицы. Происходит как бы размножение нейтронов:



На медленных нейтронах очень часто происходит такая реакция:

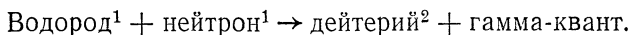


Эта реакция интересна тем, что дает нам искусственное радиоактивное вещество — углерод 14 с периодом полураспада 5100 лет:

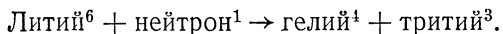


В результате обоих ядерных превращений мы опять получим ядро азота 14 . Но вместо захваченного нейтрона из ядра вылетели протон (водород 1) и электрон.

Типичной нейтронной реакцией с испусканием гамма-лучей является захват протоном нейтрона и образование изотопа водорода — дейтерия:



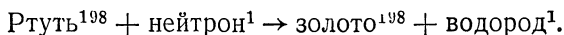
Используя современные мощные источники нейтронов, можно получать значительные количества различных элементов, редко встречающихся в природе. Например, сверхтяжелый водород — тритий — можно получить в ядерной реакции:



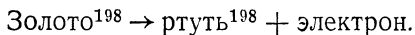
Тритий — радиоактивный изотоп водорода, и за время около 12 лет половина его атомов распадается. При этом тритий превращается в устойчивый изотоп гелия с массовым числом 3, одновременно испуская электрон:



В настоящее время физики умеют даже превращать ртуть в золото. При этом может быть использована следующая ядерная реакция:



Правда, это золото обходится дороже самородного. Кроме того, оно неустойчиво и быстро распадается, излучая электрон (период полураспада 2,7 дня):



Тем не менее не исключена возможность получения дешевого золота из ртути или из других элементов. Но сейчас перед наукой стоят другие, более важные задачи.

Когда физик намеревается исследовать ту или иную ядерную реакцию, перед ним сразу встают вопросы: как велика вероятность осуществления этой реакции? Сколькими частицами надо обстрелять данное ядро, чтобы произошло ядерное превращение? Мы не будем входить в подробности этого вопроса: он достаточно сложен. Следует указать только, что не каждая заряженная частица, попадая в ядро, совершает ядерную реакцию. Огромное большинство частиц под действием электрических или ядерных сил рассеивается вблизи ядра и не производит ядерной реакции. Исключения составляют так называемые резонансные реакции, когда частицы, обладающие определенной скоростью (энергией), легко проникают в ядро.

Современная физика учит нас, что движение элементарных частиц можно рассматривать как распространение волны. Каждой скорости (энергии) частицы соответствует определенная длина волны. Несомненно, что движение частиц в самом ядре имеет также волновой характер. А если это так, то здесь действительно можно говорить о резонансе: совпадении длин волн частицы и ядра. В этом случае их взаимодействие усиливается. В школе нам показывали опыты с резонансом двух настроенных в унисон камертонов. Звучание одного камертона вызывает звучание другого.

Ядро является очень сложной системой, и поэтому у него может быть несколько уровней энергии, то есть несколько частот или несколько длин волн. Частица, обладающая одним из значений энергии, соответствующих уровням ядра, всегда активнее вступает в ядерную реакцию, чем другие частицы.

Вспомните одну из любимых детских игр — китайский бильярд. Хороший игрок знает, что для того, чтобы попасть в нужную лунку, надо шарик выпустить с точно определенной скоростью. Очень быстрый шарик проско-

чит далеко и выбьет мало очков. Шарик с малой скоростью не дойдет до лунки с большим числом очков.

Конечно, ядро сложнее китайского бильяра, но там тоже можно представить себе такие уровни (лунки), в которые может попасть заряженная частица, обладающая только определенной скоростью. При этом происходит либо захват частицы с испусканием гамма-кванта с определенной длиной волны (энергией), либо последующий распад ядра с выбрасыванием одной или нескольких частиц.

В качестве примера резонансной реакции можно привести такую:



Эта реакция отличается от описанной ранее тем, что вначале получается гамма-квант, а лишь затем ядро бериллия распадается на две альфа-частицы. Она происходит лишь при определенной энергии ядра водорода (протона), равной приблизительно 0,440 Мэв.

Незаряженному нейтрону проникнуть в ядро легче, чем заряженной частице, так как он не взаимодействует с электрическим зарядом ядра. Иногда нейтрону достаточно пройти вблизи ядра, и он будет как бы втянут ядерными силами внутрь ядра и вызовет ядерную реакцию. Тогда вероятность осуществления ядерной реакции с нейтроном в десятки тысяч раз больше, нежели с заряженной частицей.

Но и нейтроны, так же как заряженные частицы, вступают в резонансные реакции. Например, происходит резонансный захват ядром урана²³⁸ всех нейтронов, обладающих определенной энергией, соответствующей какой-то средней скорости. С этой важной реакцией мы познакомимся позже.

Электронный распад ядра. Мы видели, что многие ядерные превращения сопровождаются вылетом электронов.

Возникает законный вопрос: откуда же берутся электроны в ядре? Ведь ядро состоит только из протонов и нейтронов.

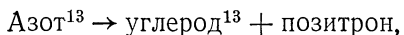
Остается предположить, что электрон рождается в ядре в момент его превращения. При распаде, например, грития, в ядре которого один протон и два нейтрона, получается электрон и ядро изотопа гелия³, содержащее два

протона и один нейтрон. Выходит, что при излучении электрона из ядра один из нейтронов превратился в протон.

«Ну что же здесь странного? — скажете вы. — Очевидно, нейтрон — сложная частица и состоит из протона и электрона».

Но факты опровергают это предположение.

Есть много ядер, которые излучают при распаде не электроны, а положительно заряженные частицы — позитроны. Так, например, азот¹³, о котором упоминалось раньше, является радиоактивным изотопом. Его ядро, излучая позитрон, переходит в ядро углерода¹³:



то есть вместо семи протонов и шести нейтронов в новом ядре будет уже шесть протонов и семь нейтронов. Здесь мы имеем превращение протона в нейтрон и позитрон. Становится ясным, что представление о том, что нейтрон состоит из протона и электрона, несовместимо с существованием радиоактивности, с образованием позитрона.

Современная теория утверждает, что протоны и нейтроны в процессе их взаимодействия в ядре могут превращаться друг в друга с испусканием электрона или позитрона. Эти частицы и излучаются ядром при радиоактивном распаде.

Что же происходит с ядром после этого?

Излучение электрона связано с тем, что один из нейтронов превращается в протон, что, естественно, приводит к увеличению положительного заряда ядра. Мы получаем ядро следующего элемента периодической системы. Например, при распаде трития (изотопа водорода) образуется изотоп гелия.

В случае позитронной радиоактивности, наоборот, протон превращается в нейтрон, ядро теряет положительный заряд, равный заряду протона, и номер элемента становится на единицу меньше. Это происходит, например, при превращении азота¹³ в углерод¹³.

Однако в поведении радиоактивного ядра при испускании электрона и позитрона есть что-то странное. В каждом подобном акте ядро теряет вполне определенную энергию. Можно ожидать, что энергия (или скорость) всех электронов (или позитронов), испускаемых

ядрами этого сорта, будет одинакова. Физики сумели измерить эту энергию, и неожиданно оказалось, что излучаемые электроны обладают самыми различными энергиями — от очень малой до максимальной энергии, теряемой радиоактивным ядром.

Тут обнаружилось какое-то неблагополучие. Ядро передает электрону совершенно определенную энергию. Но в процессе этой передачи часть энергии где-то пропадает.

Явное несоответствие с законом сохранения энергии, который утверждает, что энергия никогда не возникает и не пропадает!

Но, может быть, часть энергии уносят с собой гамма-кванты, часто сопровождающие испускание электрона или позитрона?

Однако измерения показали, что гамма-квант уносит с собой всегда определенную часть энергии и испускается позже электрона. Кроме того, энергия, теряемая ядром, всегда равна сумме энергии гамма-кванта и максимальной энергии электрона.

А если вылетевший электрон не обладает максимальной энергией, то куда же девается ее часть, недостающая до максимальной?

Может быть, можно объяснить странное поведение радиоактивного ядра, если предположить, что из него одновременно вылетают два электрона?

Действительно, в этом случае у каждого из электронов может быть самая различная энергия. Сумма этих энергий должна быть равна энергии, теряемой ядром. Однако такое предположение сразу же опровергается тем обстоятельством, что ядро при электронном или позитронном распаде всегда теряет или приобретает заряд, соответствующий одному элементарному заряду.

Такое положение привело к тому, что реакционно настроенная часть зарубежных физиков снова стала утверждать, что закон сохранения энергии — один из самых фундаментальных законов природы — не выполняется в атомных и ядерных процессах.

Очень скоро было показано, что для того чтобы устранить все сомнения, достаточно предположить, что одновременно с электроном (позитроном) вылетает еще одна нейтральная частица — нейтрино, которая и уносит с собой недостающую часть энергии. Таким образом, взаимо-

превращение нейтрона и протона можно записать следующим образом:

Нейтрон \rightleftharpoons протон + электрон + нейтрино,

Протон \rightleftharpoons нейтрон + позитрон + нейтрино.

Стрелки разных направлений указывают, что может быть и обратный процесс: протон, электрон и нейтрино превращаются в один нейтрон.

Существование нейтрино доказывается не только радиоактивным распадом. Оно подтверждается также рядом других экспериментальных фактов, полученных за последние годы физиками.

Благодаря отсутствию электрического заряда и очень малой массе нейтрино слабо взаимодействует с окружающими атомами и ядрами; в лучшем случае эта частица ионизирует один атом на пути 500 километров. Чтобы обнаружить такую частицу, нужны очень тонкие и сложные эксперименты.

Долгое время усилия физиков в этом направлении оставались безуспешными. Только совсем недавно, в конце 1953 года, исследования с достаточной достоверностью доказали, что нейтрино действительно существует.

Так потерпела окончательный крах реакционная идеалистическая концепция, отрицающая применимость закона сохранения энергии в микромире атома и ядра.

У читателя могут возникнуть вопросы: почему происходит электронный или позитронный распад? Почему при распаде одни ядра испускают электроны, а другие позитроны?

Современная физика дает ответ и на эти вопросы.

Исследования показали, что для того, чтобы атомные ядра были более прочными, протоны и нейтроны должны находиться в ядре в определенном соотношении. Это соотношение меняется для различных ядер. Так, легкие ядра более прочны, если они состоят из равного количества протонов и нейтронов. Средние и тяжелые ядра становятся прочнее, если в них несколько преобладает число нейтронов.

В тяжелых ядрах электростатические силы, расталкивающие протоны, настолько велики, что эти ядра становятся неустойчивыми даже при большом избытке нейтро-

нов. Поэтому находящиеся в конце периодической системы элементы являются радиоактивными и их ядра могут стать более прочными, только излучая различные частицы.

Если в ядре слишком много нейтронов, оно неустойчиво и становится более прочным, выбрасывая в радиоактивном распаде электрон и нейтрино. При этом один из нейтронов превращается в протон. Наоборот, если в ядре находится избыток протонов, то наиболее вероятен позитронный радиоактивный распад.

Переход ядра в устойчивое состояние происходит не обязательно при одном распаде. Очень часто только в результате целого ряда радиоактивных превращений с вылетом альфа- и бета-частиц, сопровождаемых гамма-излучением, радиоактивное ядро переходит в ядро устойчивого элемента. Так, ядро урана²³⁸, претерпевая ряд превращений, постепенно переходит в ядро свинца²⁰⁶.

Схему этого ряда превращений можно проследить по рис. 8. Мы видим, как ядро урана²³⁸ выбрасывает альфа-частицу и превращается в ядро тория²³⁴. Но это ядро также неустойчиво. Оно перегружено нейтронами. Происходит превращение одного из нейтронов в протон с вылетом электрона и нейтрино. Получается ядро протактиния²³⁴, которое тем же способом переходит в ядро урана²³⁴. Вылет электрона недостаточно «охлаждает» ядро, и поэтому этот распад сопровождается гамма-излучением.

Далее следует длинный ряд преобразований с испусканием альфа-частиц, а иногда и гамма-лучей. В результате этих превращений образуется изотоп свинца — свинец²¹⁴. Но этот свинец неустойчив. Он также перегружен нейтронами, его ядро, испуская электрон, образует ядро висмута²¹⁴, которое, теряя альфа-частицу, переходит в ядро таллия²¹⁰. В этом неустойчивом ядре все еще есть излишки нейтронов. Лишние нейтроны превращаются в протоны, и ядро, три раза испуская электрон, переходит в ядро полония²¹⁰, из которого вылетает альфа-частица, и, наконец, образуется вполне устойчивое ядро свинца²⁰⁶.

Интересно, что получающееся при промежуточных превращениях ядро висмута²¹⁰ может распадаться двумя способами: излучая электрон или альфа-частицу. В обоих случаях конечным ядром является ядро свинца²⁰⁶.

Не следует думать, что все эти процессы протекают очень быстро. В среднем проходит много миллиардов лет, прежде чем из ядра урана²³⁸ получится ядро свинца²⁰⁶.

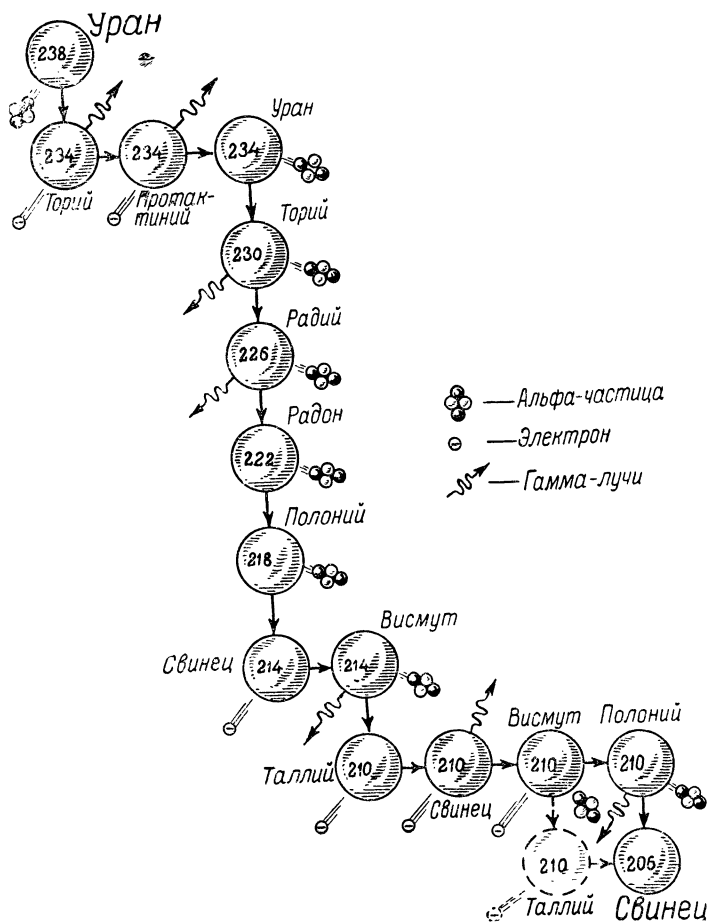


Рис. 8. Радиоактивный распад ядра урана²³⁸. Ядро урана²³⁸, претерпевая ряд радиоактивных превращений, переходит в устойчивое ядро свинца²⁰⁶

Отдельные превращения происходят очень быстро, другие требуют тысяч, миллионов и даже миллиардов лет. Например, среднее время «жизни» ядер урана²³⁴ около 380 тысяч лет, тория²³⁴ — 35 дней, а свинца²¹⁴ — 38 минут.

Было бы неправильным сравнивать среднее время «жизни» радиоактивного ядра со средним временем жизни, например, человека. Вполне закономерно то, что человек умирает не в юношеском, а в престарелом возрасте, так как изношенный организм старого человека сильнее подвержен различного рода заболеваниям.

Но нельзя говорить об «износе» радиоактивных ядер. Эти ядра «умирают» независимо от внешних обстоятельств. Законы радиоактивных превращений таковы, что с одинаковой вероятностью распадаются как старые, давно образовавшиеся ядра, так и молодые, только что получившиеся из другого радиоактивного ядра.

Новые элементарные частицы. Для того чтобы объяснить плотность и огромную прочность ядра, в 1935 году японский физик Юкава предположил, что ядерные силы вызываются особыми частицами, в 200—300 раз тяжелее электрона. Один из нуклонов испускает эту частицу, другой ее поглощает. Таким образом, частица связана с каждым из нуклонов и обуславливает ядерные силы между ними. Эта на первый взгляд странная теория Юкавы, как мы знаем, позволила объяснить величину ядерных сил и обстоятельство, благодаря которому эти силы действуют на весьма малом расстоянии.

Надо было найти такую частицу. И вот в 1937 году появилось сообщение, что в космических лучах были действительно найдены частицы, обладающие подходящей массой. Но ликование физиков было преждевременным. Вновь открытая частица — мю-мезон очень слабо взаимодействовала с ядрами и поэтому, естественно, не могла играть роли связующего звена между протоном и нейтроном.

Десять долгих лет физики усиленно искали другую частицу. Наконец ее след был обнаружен в эмульсии фотопластинки, облученной космическими лучами высоко в горах. Она оказалась несколько тяжелее своей предшественницы и была названа пи-мезоном. Пи-мезон живет очень недолго — несколько миллиардных долей секунды и затем превращается в знакомый нам мю-мезон, излучая при этом нейтрино. Пи-мезон живет примерно в 100 раз меньше мю-мезона. Вот поэтому физики так долго и не могли обнаружить пи-мезоны. Ведь 99 процентов времени своей жизни они проводят в виде мю-мезонов.

Как мы уже с вами знаем, пи-мезоны и оказались частицами, о существовании которых предполагал Юкава. По-видимому, они и обуславливают ядерные силы, действующие между протонами и нейтронами. Пи- и мю-мезоны могут быть отрицательными и положительными, в зависимости от знака электрического заряда, который всегда равен по величине заряду электрона. Найден был также пи-мезон, не имеющий электрического заряда.

Последние годы оказались для физиков весьма продуктивными. Было найдено больше десятка новых элементарных частиц: ка-мезоны с массой около 1000 электронных масс и гипероны — частицы тяжелее протонов. Большинство этих частиц было найдено в космических лучах. Сейчас, когда ученые обладают весьма мощными ускорителями заряженных частиц, различные мезоны получают искусственно.

Среди других элементарных частиц антипротон занимает несколько особое место. Дело в том, что история этой частицы начинается не с момента ее открытия, то есть с 1955 года, а значительно раньше.

Еще в 1928 году, когда известный физик Дирак создал уточненную теорию электрона, он с удивлением увидел, что из написанных им на бумаге уравнений вытекают не только свойства самого электрона. Эти уравнения указывали на существование еще и другой частицы, по своим свойствам противоположной электрону. Тут не могло быть математической ошибки, так как это уравнение очень точно предсказывало наблюдаемое в опыте поведение электрона. Но, может быть, Дираку следовало поступить так же, как школьнику, решающему задачу с квадратным уравнением: выбрать решение, имеющее физический смысл, а другое отбросить! Нет, уравнение Дирака говорит об одновременном существовании двух частиц: электрона и какого-то антиэлектрона. Дирак с большим сомнением рассказывал своим коллегам, что по совершенно непонятной ему причине его уравнение для электрона описывает частицу с массой электрона, но имеющую положительный заряд.

Сейчас мы знаем, что антиэлектроном оказался позитрон. Он был предсказан за несколько лет до своего открытия и обнаружен сначала в космических лучах, а затем уже получен искусственно. Позитрон — это уди-

вительное, как бы зеркальное отображение своего собрата электрона.

Теория Дирака дает нечто большее, чем предсказание существования позитрона. Она говорит о существовании античастиц у тяжелых ядерных частиц: антипротона и антинейтрона, и дает возможность также предсказать основные свойства этих частиц. В частности, антипротон должен обладать массой, равной массе протона, и в противоположность ему иметь отрицательный заряд. При встрече с протоном такая пара, протон-антипротон, исчезает. Эта атомная катастрофа по своим масштабам значительно больше, чем аннигиляция электрона и позитрона, и сопровождается выделением энергии, равной двум миллиардам электронвольт.

Получить антипротон значительно труднее, нежели позитрон. Для рождения пары электрон-позитрон нужен гамма-квант с энергией около одного миллиона электронвольт. Рождение же антипротона может произойти только при столкновении двух нуклонов. При этом должна затратиться энергия, равная двум миллиардам электронвольт.

Вполне естественно, что ученые пытались вначале найти антипротоны в космических лучах, где происходит столкновение ядерных частиц с колоссальной энергией. Однако найти следы антипротона в фотоэмульсии среди миллионов следов других частиц различной массы и энергии, конечно, очень трудно. Были найдены следы, которые, судя по многим признакам, должны принадлежать антипротонам. Но здесь могла быть и ошибка. Поэтому ученые обратились к мощным ускорителям, на которых получается очень много заряженных частиц с энергией в несколько миллиардов электронвольт.

Трудности получения антипротона усугубляются тем обстоятельством, что при столкновении нуклонов не вся энергия расходуется на рождение пары протон-антипротон. Большая часть энергии удерживается сталкивающимися нуклонами. Поэтому для рождения антипротона нужна энергия не менее четырех миллиардов электронвольт, если столкновение происходит между свободными протонами (или нейтронами), и больше пяти миллиардов электронвольт, если столкновение нуклонов происходит внутри ядра.

Протоны с такой энергией были получены в 1955 году на большом ускорителе — космотроне в Беркли (Калифорния), и это дало возможность группе американских физиков под руководством Сегре, Чемберлена и других в 1955 году получить антипротоны при бомбардировке быстрыми протонами медной мишени.

Физики уже не сомневались, что раз существует антипротон, то должен существовать антинейтрон. Его труднее обнаружить, потому что, как и нейтрон, он не регистрируется обычными счетчиками и не оставляет следа в фотоэмульсии. Но, помимо других отличий от обычного нейтрона, эта частица обладает еще способностью к аннигиляции. Это обстоятельство позволило ученым в 1956 году обнаружить и антинейтрон.

Открытие антипротона и антинейтрона, по-видимому, не сулит нам новых возможностей в получении атомной энергии. Но изучение новых элементарных частиц позволяет глубже познать само ядро, характер и свойства ядерных сил, а это очень важно для развития ядерной физики, техники и ядерной энергетики.

Сейчас, когда доказана возможность рождения антипротонов и антинейтронов, можно поставить вопрос о возможности существования различных антивеществ. Действительно, пока не найдено никаких фактов, которые противоречили бы этому. Антиводород в этом случае состоял бы из ядра — антипротона, вокруг которого движется один позитрон. Ядро атома антигелия должно быть построено из двух антипротонов и двух антинейтронов; вокруг этого ядра вращаются два позитрона и т. д.

Надо иметь в виду, что существовать одновременно в одном месте вещество и антивещество не могут. Произойдет аннигиляция протонов и антипротонов, нейтронов и антинейтронов, электронов и позитронов. «Выживет» только то вещество, которого в данном месте находится больше. Поэтому на земле, конечно, нет ни тяжелых античастиц, ни антивеществ. По-видимому, если современное представление о происхождении солнечной системы правильно, то Солнце и все планеты также состоят из обычного вещества. Относительно других звезд и звездных систем мы это утверждать не можем. Спектральные исследования света, приходящего от звезд, не могут пока дать ответа на вопрос, какое там находится вещество.

Обсуждается также возможность падения на Землю метеоритов из антивещества и его аннигиляции с земным веществом. Авторы предполагают, что это было в тех случаях, когда осколки метеоритов не удается отыскать, как, например, в случае с Тунгусским метеоритом. Такому предположению сейчас не противоречат никакие факты. Взрыв, который произошел на месте падения Тунгусского метеорита, можно, конечно, рассматривать как ядерный взрыв. Но хорошо известно, что это явление находит себе и другое вполне удовлетворительное объяснение.

Такие рассуждения сейчас, конечно, преждевременны. Возможно, что дальнейшее исследование свойств антипротонов и антинейтронов покажет нам, что устойчивые антивещества не могут существовать.

ГЛАВА 2

ЯДЕРНЫЙ ЦЕПНОЙ ПРОЦЕСС

Деление урана. Чрезвычайно заманчивым является использование огромной энергии, освобождающейся в ядерных реакциях. Но не так легко практически получить эту энергию. Путем бомбардировки различных веществ заряженными частицами этого сделать нельзя. Атомные ядра составляют ничтожную часть объема вещества, и попасть в ядро значительно трудней, чем стрелку с завязанными глазами направить пулю в центр удаленной мишени. Из миллионов заряженных частиц лишь одна — две произведут ядерную реакцию. Остальные пройдут мимо ядер и потеряют свою скорость при взаимодействии с электронной оболочкой атомов. Даже очень большая энергия, выделяемая в одной ядерной реакции, не может восполнить потерю энергии на ускорение миллиардов заряженных частиц.

Нельзя получить энергию для практических целей и путем бомбардировки веществ нейтронами, так как получение каждого нейтрона связано с большой затратой энергии.

Опыт практического использования химической энергии говорит нам, что ее можно получать только в таких реакциях, которые поддерживают сами себя, — в так на-

зываемых цепных процессах. Таким процессом является известная каждому химическая реакция горения. Для того чтобы зажечь костер из сухих веток, не надо нагревать каждую ветку. Можно зажечь некоторые из них, и тепла, выделяемого при их горении, достаточно для того, чтобы разгорелись соседние, а затем и весь костер.

Нужно было найти такие ядерные реакции, которые вызывали бы подобные же реакции в соседних ядрах вещества, то есть получить ядерный цепной процесс.

Недавно был открыт электрический способ окраски различных изделий. Распыление краски производится при ее соприкосновении с электродом высокого напряжения. Жидкие капли краски разрываются электростатическими силами, возникающими благодаря электрическому заряду жидкости. Здесь, очевидно, электростатические силы преодолевают молекулярные силы сцепления, и большая капля краски делится на ряд маленьких.

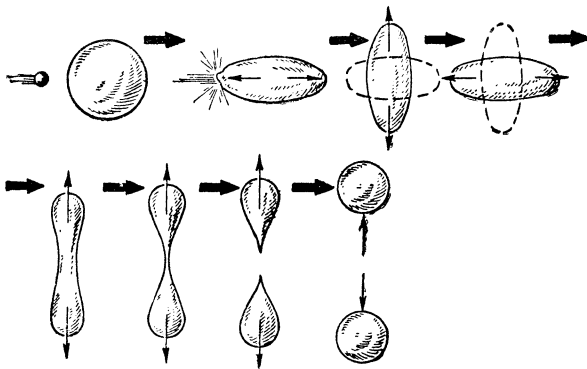


Рис. 9. Колебательное движение тяжелого ядра перед делением. Размах колебания может быть настолько сильным, что в средней части ядра образуется перетяжка и оно разорвется на два ядра меньшей массы

То же самое может происходить и с положительно заряженным ядром. Например, при попадании в него нейтрона оно нагревается и может не испускать отдельных частиц, а придать в колебательное движение, как жидкая капля. Этот процесс схематически изображен на рис. 9. Благодаря таким колебаниям шарообразное ядро

попеременно принимает либо сплюснутую, либо удлинённую форму. Размах подобного колебания может быть настолько велик, что в средней части ядра образуется перетяжка, и оно под действием электростатических сил разрывается на две части.

Такое расщепление скорее всего возможно у очень тяжелых ядер, так как заряд их довольно большой, а электростатические силы расталкивания растут с зарядом ядра.

Тяжелые ядра обладают меньшей энергией связи, а следовательно, и менее устойчивы. Если такое ядро придет в колебательное движение, то это движение усиливается электростатическим отталкиванием и ядро может разорваться на две части.

Ядерная реакция деления урана была открыта в 1939 году. Было обнаружено, что если нейтрон попадает в ядро урана, то в некоторых случаях это ядро раскалывается, делится на две части, два «осколка» (рис. 10). Из одного ядра урана получаются два радио-

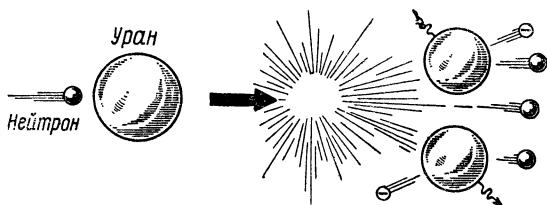


Рис. 10. Деление ядра урана. Из одного ядра урана получаются два радиоактивных ядра более легких элементов

активных ядра более легких элементов. При этом выделяется значительная энергия.

Эту энергию довольно просто подсчитать, воспользовавшись кривой энергии связи. Мы примем, что ядро урана разделится на два почти одинаковых ядра. В получившихся ядрах частицы связаны друг с другом более прочно, нежели в ядре урана. Энергия связи, приходящаяся на одну частицу в этих ядрах, больше энергии связи частицы в уране на 0,85 Мэв.

В момент разрыва ядра урана частицы в «осколках» сжимаются, и при этом выделяется энергия. Каждая частица выделяет как раз ту энергию, которую она при-

обрела, двигаясь под действием ядерных сил. Эта энергия и равна увеличению энергии связи одной частицы — 0,85 Мэв. Для всех частиц ядра урана выделение энергии составит около 200 Мэв. Сюда входит энергия движущихся «осколков» ядра, нейтронов, гамма-квантов и других частиц, получающихся как в самом процессе деления, так и при последующем радиоактивном распаде «осколков». Надо считать, что кинетическая энергия всех этих «осколков» и частиц в конечном счете превращается в теплоту.

В одном килограмме урана содержится около $2,46 \cdot 10^{24}$ ядер. Если все ядра разделятся, то при этом выделится $200 \cdot 2,46 \cdot 10^{24} = 4,92 \cdot 10^{26}$ Мэв.

Для того чтобы пересчитать эту энергию в более знакомые нам единицы, надо учесть, что 1 Мэв равен $4,5 \cdot 10^{-20}$ киловатт-часа. Деление одного килограмма урана дает 22 миллиона киловатт-часов энергии, что равноценно теплу, получающемуся при сгорании 2,5 тысячи тонн угля.

Но не это самое важное. Физики знают ядерные реакции, которые дают большую энергию. Например, в реакции образования гелия, о которой говорилось раньше, выделяется в восемь раз большая энергия, чем при делении урана. Самое существенное в реакции деления заключается в том, что, кроме двух обладающих большой энергией «осколков», в этой реакции выделяется еще два или три новых нейтрона, а эти нейтроны могут произвести деление соседних ядер урана. Таким образом, в уране может быть осуществлен цепной процесс (рис. 11).

Два нейтрона, получающиеся в результате первого деления, могут произвести деление еще двух ядер урана. Появятся уже четыре нейтрона, которые разделят четыре ядра, и т. д. Процесс развивается лавинообразно и мгновенно. Все ядерные процессы очень быстры, поскольку при малых междуядерных расстояниях скорость частиц, производящих ядерные реакции, обычно очень велика.

Так, например, скорость нейтронов, получающихся при делении, достигает 20 тысяч километров в секунду. Такая частица за полсекунды может преодолеть путь от Москвы до Владивостока! Поэтому достаточно миллионной доли секунды для того, чтобы в большом куске урана возник цепной процесс с огромным выделением энергии. А выделение большого количества энергии за короткий

промежуток времени есть взрывной процесс. Этим и отличается взрыв от всякого другого метода получения энергии.

Но в природном уране такой цепной процесс не идет. Природный уран состоит в основном из двух изотопов: урана²³⁸ и урана²³⁵. Причем на тысячу ядер природного урана приходится всего только семь ядер урана²³⁵.

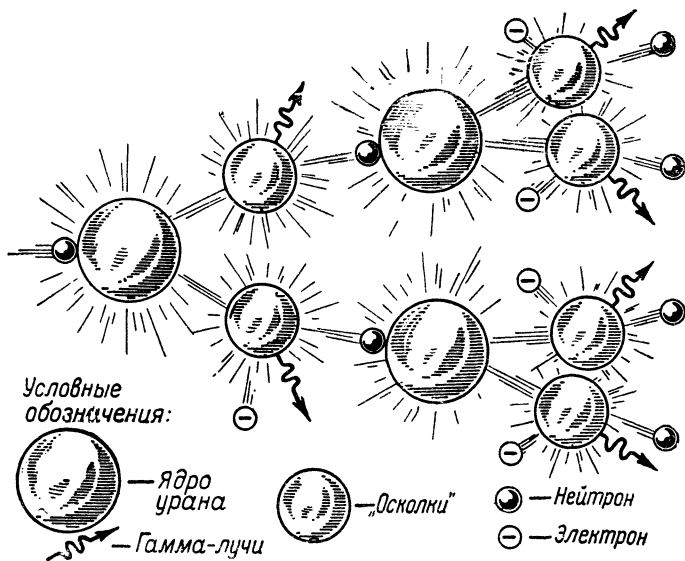


Рис. 11. Цепной процесс в уране. Процесс развивается лавинообразно

Оказалось, что цепной процесс может идти только в чистом или почти чистом уране²³⁵. Ядра урана²³⁵ делятся как медленными, так и быстрыми нейтронами. А ядра урана²³⁸ делятся только очень быстрыми нейтронами.

Такие быстрые нейтроны, правда, освобождаются при делении урана, но после нескольких столкновений с ядрами они теряют свою скорость и не могут произвести деления ядер урана²³⁸. Ядра тяжелого изотопа урана очень жадно поглощают нейтроны, обладающие средней, так называемой резонансной энергией. При этом деления ядра урана²³⁸ не происходит.

Нейтроны, получающиеся в природном уране после деления, в 99 случаях из 100 попадают в ядра урана²³⁸ и там поглощаются. Это обстоятельство препятствует возникновению цепного процесса в природном уране.

Для осуществления этого процесса необходимо отделить от природного урана основную часть урана²³⁸, то есть разделить изотопы.

Трудная задача. Если мы имеем смесь каких-нибудь веществ, то химики с помощью ряда операций легко могут разделить эти вещества. Но для разделения изотопов химические реакции бесполезны. По своим химическим свойствам изотопы не отличаются друг от друга. Получение отдельных изотопов в чистом виде имеет особое значение сейчас, когда становится ясной их роль в получении и использовании атомной энергии.

Разделение изотопов оказалось очень трудной задачей. Здесь можно использовать только различие масс их атомов и ядер. Но это различие заметно только у изотопов самых легких элементов; у тяжелых изотопов это отличие незначительно.

Так, например, у водорода разница в массах тяжелого (дейтерия) и легкого изотопов составляет 100 процентов, а у урана — всего 1,3 процента. И все-таки во всех известных в настоящее время методах разделения изотопов урана используют это различие в массах.

Предположим, что требуется разделить газ, состоящий из двух сортов молекул. Если температура во всех точках пространства, заполненного газом, будет одинакова, то средняя энергия хаотически движущихся молекул обоих сортов будет также одинакова, то есть $\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_2 v_2^2}{2}$. Отсюда получается, что $\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$, то есть средние скорости молекул обратно пропорциональны корням квадратным из их масс.

Если это соотношение применить к атомам урана, то получим, что скорость атома урана²³⁵ будет в 1,0065 больше скорости атомов урана²³⁸.

Различие в скоростях весьма мало, но все же его можно использовать для разделения изотопов урана в методе газовой диффузии. Принцип этого метода не сложен.

Представим себе сосуд, разделенный перегородкой с мельчайшими порами. Если в одну часть этого сосуда впустить газообразный шестифтористый уран (есть такая соль урана), то молекулы, содержащие уран²³⁵, будут быстрее проникать через пористую перегородку и во второй половине сосуда газ будет содержать несколько большее количество легкого изотопа.

Наиболее простая диффузионная ячейка такого рода изображена на рис. 12. Ячейка состоит из трубки с пористыми стенками,

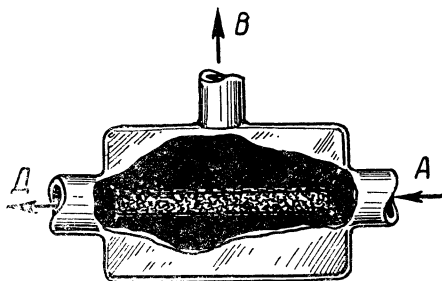


Рис. 12. Схема диффузионной ячейки для разделения изотопов урана. В отверстия А поступает шестифтористый уран. Через В откачивают продиффундированный газ с увеличенным содержанием легкого изотопа. Из Д выходит газ, содержащий тяжелый изотоп урана

помещенной внутри широкого сосуда, в котором с помощью насосов поддерживается вакуум. Газ, состоящий из двух сортов молекул различной массы, втекает в ячейку. Часть этого газа, прошедшая через пористую перегородку, имеет немного увеличенное содержание легких молекул. В конце ячейки поступает газ с большим содержанием тяжелых молекул.

Благодаря малому различию атомных весов изотопов урана изменения изотопного состава газа в обоих сосудах очень малы. Поэтому для получения почти чистого урана²³⁵ и полного извлечения его из природного урана нужны тысячи таких ступеней разделения.

Другой способ основан на явлении так называемой термодиффузии газов. Если в сосуде, наполненном шестифтористым ураном, создать большой перепад температуры, то благодаря различию скоростей частиц газ, содержащий тяжелый изотоп, будет скопляться в холодной, а легкий — в горячей части сосуда. Здесь для достаточно эффективного разделения изотопов урана тоже необходимо очень много ступеней очистки.

На совершенно другом принципе основан электромаг-

нитный способ разделения. В основе этого метода лежит принцип масспектрографа, с помощью которого производились измерения масс различных изотопов. Смесь ионов различных изотопов ускоряют в электрическом поле и направляют между полюсами сильного электромагнита. Как известно, движущиеся таким образом ионы будут описывать круговые линии в плоскости, параллельной поверхности полюсов магнита. Кривизна этих круговых линий при прочих равных условиях зависит от массы иона. Более легкий ион описывает окружность меньшего радиуса. Таким образом, выпущенные из масспектрографа ионы различных изотопов могут улавливаться в разных местах. Движение иона по правильной круговой орбите возможно лишь при условии, что на всем пути ион не столкнется с какой-либо молекулой газа. Поэтому из камеры прибора тщательно откачивают воздух.

В одном аппарате такого рода можно сразу получить довольно чистые продукты разделения. Однако производительность установки очень мала. Поэтому опять-таки нужно много ячеек для получения достаточного количества урана²³⁵.

Все известные в промышленности способы разделения изотопов очень сложны. Но, несмотря на это, чистые изотопы урана получают в довольно больших количествах.

Критический вес. Уголь — прекрасный горючий материал. Но попробуйте осуществить горение в маленьком куске каменного угля. Вам это не удастся. Химическая реакция горения не может поддерживать сама себя в малом объеме.

Вместе с тем большая масса угля в топке легко сгорит до конца.

Горение угля может происходить только при температуре 500—600 градусов, то есть оно может поддерживаться только тогда, когда выделяющегося при реакции тепла достаточно, чтобы нагреть соседние слои угля до этой температуры. Но тогда нужно, чтобы меньше тепла уходило через поверхность горящего тела. Очевидно, что потеря тепла зависит от величины поверхности горящего тела, а относительная величина поверхности растет с уменьшением размеров тела. Так, например, для шара диаметром 20 сантиметров отношение поверхности к объему будет 0,3, тогда как при диаметре шара 2 сантиметра это же соотношение будет 3, то есть в десять

раз больше. Естественно, что при горении малый шар будет терять относительно больше тепла, чем большой. Потеря тепла может быть настолько велика, что горение перестанет само себя поддерживать.

Таким образом, химическую реакцию горения можно осуществить только в достаточно большом объеме¹.

Так же как и химический, ядерный цепной процесс не может идти в малом куске расщепляющегося материала.

Для цепного процесса в уране необходимо, чтобы нейтроны, получающиеся при делении, производили новые

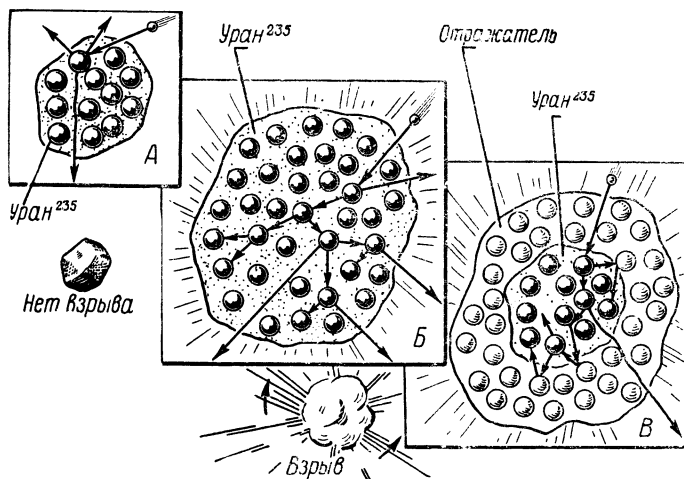


Рис. 13. Критический вес урана. В малом куске урана (А) цепной процесс не идет: нейтроны деления выходят наружу. В большом куске (Б) нейтроны деления производят новые деления: цепной процесс поддерживается. Выход нейтронов можно уменьшить, окружив малый кусок урана слоем отражателя (В)

деления. Но так как ядра составляют ничтожную часть объема вещества, нейтроны могут свободно пройти сквозь малый объем урана²³⁵, не задев ни одного ядра, то есть не совершив нового деления (на рис. 13, А). Нужно

¹ Но в очень большом куске горение также не поддерживается из-за недостатка кислорода. Для интенсивного горения нужны большие массы раздробленного угля, через который легко проходит воздух.

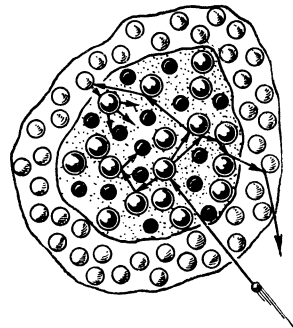
уменьшить выход нейтронов, а это можно сделать двумя способами. Во-первых, можно увеличить объем (на рис. 13, *Б*), при этом уменьшится относительное значение поверхности куска урана и, следовательно, уменьшится вероятность выхода нейтронов через эту поверхность. Во-вторых, выход нейтронов можно уменьшить, окружив кусок урана веществом, отражающим нейтроны (на рис. 13, *В*). Нейтроны, сталкиваясь с ядрами вещества отражателя, будут частично возвращаться обратно в уран, где вновь примут участие в цепном процессе.

Для осуществления цепного процесса в уране необходимо, чтобы кусок урана был больше определенного объема или чтобы вес куска урана был больше так называемого критического веса.

Чем же определяется критический вес куска урана²³⁵? Легко показать, что необходимым и достаточным для осуществления цепной реакции является условие, при котором хотя бы один из нейтронов деления производит новое деление.

Предположим, что в каждом акте деления получаются три нейтрона (рис. 14). Один из нейтронов может после ряда соударений с ядрами урана или вещества отражателя произвести еще одно деление; при этом появятся опять три нейтрона. Другой нейтрон может, столкнувшись с ядром какого-либо вещества посторонней примеси, им поглотиться; новых нейтронов при этом возникать не будет. И, наконец, третий нейтрон может выйти за пределы урана и отражателя, не производя ядерной реакции.

Но, несмотря на эти потери нейтронов, реакция будет себя поддерживать. Действительно, в начале процесса после первого деления было три нейтрона. Это первое поколение нейтронов исчезло, но дало «жизнь» еще трем нейтронам второго поколения. Если в результате одного деления, произведенного вторым поколением нейтронов,



- Ядро урана
- ⊗ Ядро отражателя
- Ядро примеси

Рис. 14. Условие существования цепного процесса. Один нейтрон деления должен совершить еще одно деление

появятся опять три нейтрона, то число нейтронов в последующих поколениях будет одинаковое. Если число нейтронов, рождающихся в единицу времени, постоянно, то постоянно и число ядерных делений, а следовательно, и количество выделяющейся энергии. Иначе говоря, уровень мощности такой атомной установки будет постоянным.

Очевидно, что критический вес, при котором начинается цепной процесс, есть тот минимальный вес, при котором каждое поколение нейтронов рождает последующее поколение, состоящее из такого же количества нейтронов, то есть потери нейтронов вследствие утечки или поглощения примесями должны быть полностью компенсированы образующимися в уране нейтронами.

Критический вес зависит прежде всего от формы куска урана, которая определяет величину поверхности. Можно показать, что при одном и том же объеме (или весе) наименьшей поверхностью обладает шар. Например, при одинаковом объеме, равном 125 кубическим сантиметрам, тонкая пластинка размером $25 \times 5 \times 1$ сантиметр имеет примерно в три раза большую поверхность, чем поверхность шара радиусом 3,1 сантиметра. Поэтому критический вес сферического куска урана — наименьший и для чистого урана²³⁵ равен примерно одному килограмму. Критический вес может быть значительно уменьшен применением отражателя, препятствующего утечке нейтронов.

Атомный взрыв. Присутствующие в уране²³⁵ примеси поглощают нейтроны, что создает дополнительные их потери. Эти потери могут быть компенсированы только уменьшением выхода нейтронов наружу. А это приводит к увеличению критического веса урана²³⁵.

Здесь можно провести аналогию с горением сырого дерева. Вода поглощает большое количество тепла, выделяющегося при горении, и поэтому трудно разжечь и поддерживать огонь в сырых дровах.

В уране при большом содержании примесей потеря нейтронов вследствие их поглощения не может быть компенсирована ни отражателем, ни увеличением критического веса урана. В таком «грязном» уране цепной процесс не может возникнуть, как бы мы ни увеличивали размеры куска. Поглощающей нейтроны примесью является тяжелый изотоп урана — уран²³⁸. Поэтому в

сплошном куске природного урана любого объема цепной процесс осуществить нельзя.

Наши рассуждения можно подтвердить очень простыми расчетами.

Предположим, что в куске урана цепной процесс начался в результате одновременного появления N_0 нейтронов. Из этих нейтронов некоторое число поглотится примесями, и если предположить, что p есть доля нейтронов, которым удалось избежать этого поглощения, то останется, очевидно, $N_0 p$ нейтронов. Кроме этого, часть нейтронов выйдет наружу, но некоторая доля f нейтронов произведет деление ядер урана. В каждом делении будет освобождаться ν новых нейтронов. Таким образом, мы будем иметь второе поколение нейтронов в количестве $N_0 p f \nu$. Очевидно, что каждая из величин p и f будет меньше единицы.

Для того чтобы шел цепной процесс, потери нейтронов должны быть полностью компенсированы. Поэтому число нейтронов второго поколения должно быть равно начальному количеству нейтронов или больше его, то есть $N_0 p f \nu \geq N_0$, или $p f \nu \geq 1^*$.

Величина $p f \nu = K$ называется коэффициентом размножения нейтронов. Цепной процесс может идти, только если $K \geq 1$. При $K = 1$ цепной процесс начинается, и это равноценно нашему условию, что хотя бы один из нейтронов деления произвел новое деление. Если коэффициент размножения больше единицы, то число нейтронов нарастает лавиной. Действительно, если в начальный момент было N_0 нейтронов, то при $K > 1$ в последующих поколениях количество нейтронов будет все время расти:

$$N_1 = N_0 K; N_2 = N_0 K^2; N_3 = N_0 K^3 \dots$$

В чистом уране²³⁵, где поглощение нейтронов почти полностью отсутствует, коэффициент p близок к единице. Среднее число нейтронов, приходящихся на одно деление ν , приблизительно равно 2,5. Поэтому в достаточно большом куске, где выход нейтронов через поверхность мал, коэффициент размножения может быть близок к 2.

Предположим, что цепной процесс был вызван одним нейтроном, то есть $N_0 = 1$; тогда большинство ядер раз-

* Знак \geq обозначает, что находящаяся влево от него величина должна быть больше или равна правой.

делится уже примерно на восьмидесятом поколении, так как число атомов в одном килограмме урана²³⁵ приблизительно равно числу $N_{80} = 1 \cdot 2^{89}$. Можно считать, что, прежде чем вызвать деление ядра урана, нейтрон должен пройти расстояние, равное примерно 10 сантиметрам. Таким образом, для того чтобы произвести 80 ядерных реакций, нейтронам надо пройти всего около восьми метров; а при скорости их в 20 тысяч километров в секунду они это сделают за миллионную долю секунды, и при этом выделится огромное количество энергии. А это и есть атомный взрыв.

Для начала цепного процесса нет необходимости как-то искусственно впускать нейтроны, для того чтобы «зажечь» кусок урана, имеющего вес больше критического. В уране всегда имеются блуждающие нейтроны, которые обязаны своим происхождением ряду ядерных процессов. Прежде всего в уране происходят самопроизвольные деления ядер. Это явление было открыто советскими учеными Г. Н. Флеровым и К. А. Петржаком. Самопроизвольное деление ядер урана происходит очень редко. В среднем в одном грамме природного урана совершаются 23 деления в час. Но при каждом самопроизвольном делении освобождается несколько нейтронов, которые будут блуждать в куске урана до тех пор, пока не выйдут наружу или не поглотятся его ядрами. При поглощении этих нейтронов ядрами урана может произойти деление и освобождение новых блуждающих нейтронов. В двух разъединенных кусках урана общим весом около двух килограммов за счет самопроизвольного деления освобождается около 40 нейтронов в секунду. В среднем каждые 0,02 секунды образуется один нейтрон.

Кроме того, могут быть нейтроны космического происхождения. Из далеких миров, из Галактики к нам приходят космические частицы, представляющие собой ядра легких элементов, обладающие колоссальной энергией. Эти частицы, сталкиваясь с ядрами различных веществ, производят ядерные реакции, в которых иногда образуются нейтроны. Эти нейтроны тоже могут быть начальными при развитии цепного процесса. Не исключено также деление ядер урана непосредственно теми же космическими частицами.

Итак, в большом куске урана всегда найдется несколько блуждающих нейтронов, которых вполне доста-

точно для начала цепного процесса. Как только вес куска урана превысит критический, в нем мгновенно произойдет атомный взрыв.

«Горение» урана. Мы уже знаем, как получают атомную энергию из урана²³⁵. Но этого недостаточно. Надо научиться управлять процессом выделения энергии. Ведь эта энергия получается в форме взрыва. Цепной процесс идет очень быстро до тех пор, пока не распадется весь расщепляющийся материал или пока этот материал не разлетится под действием атомного взрыва.

Следовательно, нужно научиться осуществлять медленное «горение» урана.

Казалось бы, управлять цепным процессом не так трудно.

Предположим, что мы сумеем изменять и поглощение нейтронов и выход их через поверхность урана, то есть изменять величину коэффициентов p и f .

Для начала цепного процесса мы должны увеличить p или f до тех значений, при которых коэффициент размножения K становится больше единицы. Число нейтронов, а следовательно, и число реакций деления, будет непрерывно возрастать. После того как количество выделяющейся энергии станет достаточно велико и мощность установки возрастет до необходимых значений, коэффициент размножения можно уменьшить до единицы. При этом число нейтронов, а следовательно, и мощность установки останется на прежнем уровне. Изменять же коэффициент размножения можно, и позже мы покажем, как это делается.

Но скорость нейтронов слишком велика, чтобы можно было достаточно надежно управлять процессом. Мы уже видели, что при коэффициенте размножения, равном двум, цепной процесс длится миллионные доли секунды. Поэтому, казалось бы, как только значение коэффициента превзойдет единицу, управление процессом станет невозможным: слишком быстро будет нарастать число нейтронов, участвующих в делении урана. Даже если нам и удастся держать значение коэффициента размножения близким к единице, не может быть гарантии, что при внезапном изменении режима процесс может либо совсем затухнуть, либо перейти в атомный взрыв.

К счастью, есть одно обстоятельство, которое облегчает управление цепным процессом в уране. Исследова-

ния показали, что при делении ядра урана не все нейтроны выделяются одновременно. Часть нейтронов (около одного процента) выбрасывается «осколками» деления с довольно большим запозданием, достигающим 60—80 секунд. Эти так называемые запаздывающие нейтроны позволяют в некоторых случаях сильно замедлять развитие цепного процесса.

Предположим, что мы довели значение коэффициента размножения до единицы. Это значит, что потеря нейтронов полностью восполняется вновь образованными при делении ядер. В этом случае цепной процесс осуществляется за счет запаздывающих нейтронов, так как без них коэффициент размножения был бы равен приблизительно 0,99.

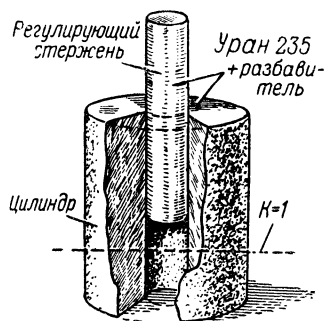


Рис. 15. Схема простейшего ядерного реактора. При определенном положении регулирующего стержня коэффициент размножения становится больше единицы. Цепной процесс развивается

Если мы теперь увеличим коэффициент размножения до 1,01, то это увеличение произойдет не сразу. Та часть его, которая определяется мгновенно вылетающими нейтронами, быстро поднимется до единицы. Запаздывающие же нейтроны увеличат значение коэффициента размножения только через одну — полторы минуты. И только после этого будет развиваться цепной процесс.

Таким образом, изменяя коэффициент размножения вблизи значения единицы, мы можем постепенно ускорять или замедлять развитие цепного процесса, то есть управлять скоростью выделения атомной энергии, получающейся при делении урана.

Простейший ядерный реактор. Аппарат, в котором осуществляется управляемый цепной процесс деления, называется ядерным реактором.

Принцип действия ядерного реактора очень прост (рис. 15). Можно взять, например, кусок урана в виде полого короткого цилиндра с таким расчетом, чтобы его вес был близок к критическому. В этом случае коэффи-

коэффициент размножения будет близок к единице. Если постепенно вдвигать в полость цилиндра урановый стержень, то вследствие уменьшения утечки нейтронов через полость коэффициент размножения будет расти и при определенном положении стержня он может стать несколько больше единицы. Нужно только помнить, что коэффициент размножения не должен превышать 1,01, так как при больших его значениях ядерный процесс будет определяться мгновенно вылетающими нейтронами, реактор может выйти из управления и произойдет атомный взрыв. При коэффициенте размножения больше единицы начнет развиваться цепная реакция и возрастет количество выделяющейся энергии. При достижении нужной мощности, изменяя положение уранового стержня, можно добиться такого состояния, при котором коэффициент размножения будет равен единице. Тогда в ядерном реакторе будет выделяться постоянная во времени атомная энергия. Урановый цилиндр будет нагреваться, и выделяющееся в такой атомной «печи» тепло может быть использовано для различных целей.

Однако, как мы уже говорили, для осуществления такого рода цепного процесса необходимо из ядерного горячего реактора удалить значительную часть урана²³⁸. Движущиеся нейтроны сталкиваются с его ядрами и, постепенно теряя свою скорость, в конце концов поглощаются ими.

Медленные нейтроны. Цепной процесс может возникнуть и в природном уране, но на медленных нейтронах.

Что же такое медленные нейтроны?

Молекулы различных газов находятся в непрерывном хаотическом движении. Скорость этого движения зависит от температуры. Но даже при нормальной температуре она довольно велика. Например, молекулы кислорода или азота, из которых состоит воздух, двигаются хаотически в различных направлениях со скоростями порядка 500—600 метров в секунду. Такие скорости называются тепловыми скоростями, а нейтроны, обладающие такими скоростями,—тепловыми, или медленными, нейтронами. Медленные нейтроны легко захватываются ядрами урана²³⁵ и с колоссальной активностью производят их деление.

Очень существенным является также то, что эти тепловые нейтроны относительно слабо поглощаются ядрами

урана²³⁸. Поэтому на медленных нейтронах цепной процесс может идти и в природном уране. Замедляются нейтроны довольно просто, примерно так же, как бильярдные шары, ударяющиеся друг о друга. Если движущийся шар ударится о неподвижный, то он всегда теряет часть своей энергии. Иногда при так называемом лобовом ударе движущийся шар потеряет всю свою энергию. Он остановится, а пойдет вперед шар, бывший ранее неподвижным. Но большей частью при косом ударе оба шара будут двигаться с меньшей скоростью. Законы механики говорят нам, что наибольшая потеря энергии будет при столкновении с шаром равной массы. В среднем в каждом таком столкновении шар будет терять половину своей энергии.

Так же как и бильярдные шары, замедляются и нейтроны при столкновении с легкими ядрами. После ряда столкновений нейтроны растрачивают свою энергию, и их скорость становится тепловой, соответствующей скорости молекул замедлителя, то есть вещества, замедляющего нейтроны. В качестве замедлителя можно взять, например, простую воду, содержащую легкие ядра водорода, масса которых примерно равна массе нейтрона. Однако эти ядра не только замедляют движение нейтрона, но и легко их поглощают. А это невыгодно. Поэтому в большинстве случаев в качестве замедлителя используется не простая, а тяжелая вода, в которой легкий водород заменен тяжелым изотопом — дейтерием, слабо поглощающим нейтроны. Хорошим замедлителем является также графит (модификация углерода). Замедление нейтронов в графите идет медленнее, чем в тяжелой воде. Ядра углерода тяжелее ядер дейтерия, и нейтрон при столкновении теряет меньшую часть своей скорости. Но ядра углерода, так же как и ядра дейтерия, почти не поглощают нейтронов.

ГЛАВА 3

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

Гетерогенные реакторы. В однородной (гомогенной) смеси природного урана с замедлителем не всегда можно осуществить цепной процесс.

Нейтроны теряют свою скорость в замедлителе постепенно и обычно в результате большого числа столкновений становятся тепловыми. Когда слабо замедлившийся нейтрон встретит на своем пути ядро урана²³⁸, то произойдет его поглощение.

Как же уменьшить захват нейтронов ядрами урана²³⁸?

Если применять в качестве замедлителя графит, то никаким увеличением количества урана и размеров реактора не удастся довести коэффициент размножения до единицы. Следовательно, надо удалить ядра урана²³⁸ из зоны, где происходит замедление нейтронов. Поэтому ядерные реакторы, использующие природный уран и графит, изготавливаются в виде гетерогенной (неоднородной) смеси урана и замедлителя. В этих реакторах обычно уран в виде стержней (блоков) чередуется с чистым графитом (рис. 16).

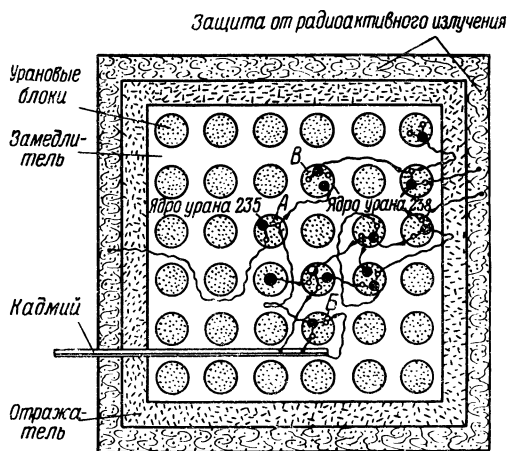


Рис. 16. Схема гетерогенного ядерного реактора

Диаметр урановых стержней должен быть рассчитан так, чтобы нейтроны, получающиеся при делении, не испытывали много столкновений в уране. В противном случае уран²³⁸ может опять поглотить большое число нейтронов. Обычно урановые стержни имеют диаметр не больше трех — четырех сантиметров.

Предположим, что в одном из урановых блоков произошло деление ядра урана²³⁵. При этом выделились

три нейтрона. У этих нейтронов может быть различная судьба.

Один из нейтронов может испытать большое число столкновений с ядрами замедлителя и, теряя в каждом столкновении часть своей скорости, придет в другой урановый блок с очень малой тепловой скоростью. Такой нейтрон при столкновении с ядром урана²³⁸ имеет очень небольшие шансы им поглотиться: он просто отскочит от этого ядра, как резиновый мячик от тяжелой стены. Ведь ядро урана в 238 раз тяжелее нейтрона. Тепловой нейтрон после ряда столкновений с ядрами тяжелого изотопа в конце концов в том или другом урановом стержне встретится с ядром урана²³⁵ и произведет его деление. При этом выделятся опять два или три новых нейтрона.

Другой нейтрон испытает меньшее число столкновений с ядрами замедлителя и придет в другой урановый блок с какой-то средней скоростью. Такие нейтроны очень жадно поглощаются ядрами урана²³⁸. Новых нейтронов при этом возникать не будет.

Наконец, третий нейтрон может совсем выйти за пределы уранового котла, не задев ни одного уранового блока.

Как уже указывалось, цепной процесс может протекать, если хотя бы один из нейтронов деления произведет еще одно новое деление. В этом случае коэффициент размножения будет равен единице.

Изменяя величину коэффициента размножения, мы можем управлять процессом, то есть изменять мощность ядерного реактора. Управление котлом обычно производится с помощью стержня из кадмия или бористой стали (кадмий и бор очень жадно поглощают тепловые нейтроны). Такой стержень поглощает нейтроны на их пути между урановыми блоками, уменьшая число делений. Изменяя глубину погружения поглощающего стержня в реактор, можно тем самым изменять величину коэффициента размножения около значений, близких к единице.

Значение коэффициента размножения для случая цепного процесса с замедлителем необходимо несколько уточнить. Поскольку природный уран содержит большое количество тяжелого изотопа, то нужно учесть также ту долю нейтронов, которая выделится за счет деления

урана²³⁸ быстрыми нейтронами. Таких делений будет немного, но каждое из них даст добавочных два или три нейтрона. Это значит, что из уранового блока будет вылетать уже больше быстрых нейтронов. В среднем вместо одного нейтрона за счет деления урана²³⁸ мы получим ϵ нейтронов, где ϵ есть величина, немного бóльшая единицы (обычно = 1,03).

Эти ϵ нейтронов будут терять свою энергию в замедлителе, и если они не успеют стать тепловыми до встречи с ядрами урана²³⁸, то последние могут их захватить: эти нейтроны потеряются. Обозначим долю нейтронов, избежавших такого захвата в уране²³⁸, через φ . Так как всегда некоторое число нейтронов захватится тяжелым изотопом, то, очевидно, величина φ будет меньше единицы. Таким образом, останется $\epsilon\varphi$ свободных нейтронов. Эти нейтроны имеют скорость, близкую к тепловой, и поэтому могут весьма активно производить деление ядер урана²³⁵. Однако часть тепловых нейтронов поглощается замедлителем, регулирующими стержнями из кадмия или бористой стали или просто различными примесями. Обозначим через Θ ту долю тепловых нейтронов, которая поглотится ядрами урана²³⁵ и произведет их деление; при этом появляется η новых нейтронов. В результате всех процессов в реакторе каждый быстрый нейтрон будет давать в среднем $K = \epsilon\varphi\Theta\eta$ вторичных нейтронов.

Произведение $\varphi\Theta$ всегда меньше единицы. Если в качестве замедлителя применяется тяжелая вода, то в случае природного урана $\varphi\Theta$ примерно равно 0,9. Если учесть, что $\epsilon = 1,03$ и $\eta \approx 1,33$, то получим для ядерного реактора на тяжелой воде следующее максимальное значение для коэффициента размножения:

$$K = 1,03 \cdot 0,9 \cdot 1,33 = 1,22.$$

Для графитового реактора $\varphi\Theta$ примерно равно 0,79, и поэтому коэффициент размножения значительно меньше: $K \approx 1,07$.

В работающем ядерном реакторе непрерывно происходит деление ядер урана²³⁵. Накапливающиеся в урановых блоках «осколки» деления также поглощают тепловые нейтроны, а это приводит к тому, что значение коэффициента размножения довольно быстро падает.

Чтобы избежать частой замены урановых блоков, в урановом котле с графитовым замедлителем выгод-

нее применять уран обогащенный — с содержанием 1—1,5 процента урана²³⁵.

Все приведенные значения коэффициентов размножения относятся к котлам неограниченных размеров. На самом деле величина коэффициента размножения несколько меньше, если учесть утечку нейтронов через наружную поверхность.

Для уменьшения выхода нейтронов за пределы реактора применяются отражатели. В качестве отражателя нейтронов может быть использован тот же графит. Нейтроны, сталкиваясь с ядрами углерода, частично отражаются обратно в так называемую активную зону реактора, где участвуют в цепном процессе.

Однако значительная часть нейтронов все же выходит наружу. Для защиты людей от очень вредного нейтронного и радиоактивного излучения ядерный реактор окружают толстой бетонной стеной толщиной 1,5—2,5 метра.

Мы знаем, что в природном уране необходимо учитывать два конкурирующих процесса: деление ядер урана²³⁵ и захват нейтронов ядрами урана²³⁸. От того, какой из процессов сильнее, зависит возможность осуществления цепной реакции. Если преобладает поглощение нейтронов, реакция не может поддерживаться, как, например, в природном уране, в случае непосредственного использования быстрых нейтронов деления. Здесь процесс может идти только при использовании медленных нейтронов, или, как говорят, на медленных нейтронах. Но при замедлении нейтроны не сразу приобретают тепловую скорость. Если замедлителем является, например, графит, то, чтобы стать тепловыми, нейтроны должны испытать в среднем 110 соударений. За это время их могут поглотить ядра урана²³⁸, и поэтому в однородной смеси природного урана с графитом цепной процесс осуществить нельзя.

Гомогенные реакторы. Очень эффективным замедлителем является тяжелая вода. В каждом соударении с ядром тяжелого водорода нейтрон теряет значительную энергию, и уже после 18—20 соударений скорость его так мала, что вероятность его поглощения ядром урана²³⁸ незначительна. Такой нейтрон очень активно производит деление ядер урана²³⁵. Поэтому цепной процесс возмо-

жен даже в однородной смеси природного урана с тяжелой водой.

Такой гомогенный реактор (рис. 17) состоит из бака с тяжелой водой, в которой растворены урановые соли. Для уменьшения размеров реактора бак окружают слоем отражателя, снижающего утечку нейтронов наружу. Управление котлом, как обычно, производится с помощью стержня из кадмия.

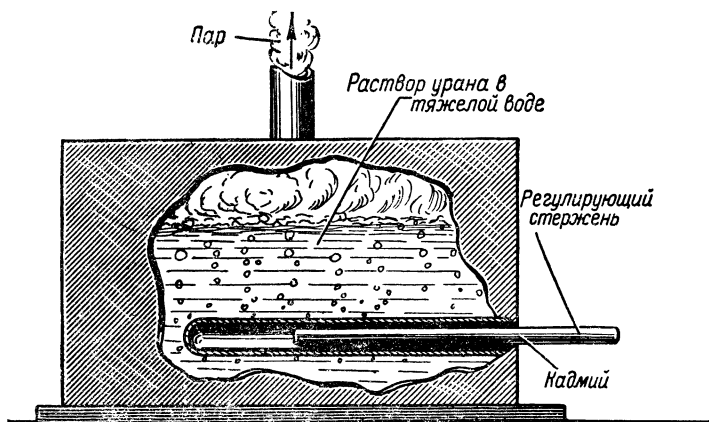


Рис. 17. Схема гомогенного ядерного реактора на тяжелой воде
В растворе урана в тяжелой воде идет цепной процесс. Вода нагревается и дает пар высокого давления

Если применять уран с большим содержанием легкого изотопа (обогащенный уран), то в гомогенном реакторе может применяться и другой замедлитель. Расчеты показывают, что можно изготовить реактор, состоящий из 15 литров простой воды и одного килограмма солей урана²³⁵.

Забегая несколько вперед, нужно отметить, что реактор с тяжелой или простой водой является одновременно паровым котлом. Вода в нем непрерывно нагревается и может давать пар высокого давления. Температуру воды и давление пара можно сравнительно легко регулировать с помощью кадмиевых стержней.

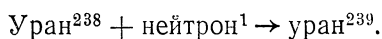
Классификация ядерных реакторов. Итак, мы теперь знаем с вами два основных типа ядерных реакторов: на быстрых и медленных нейтронах. Однако иногда выгодно

применять для осуществления цепного процесса нейтроны средних (промежуточных) скоростей. Такие нейтроны слабее, чем медленные, поглощаются ураном²³⁸ и довольно активно делят ядра урана²³⁵. В реакторах на промежуточных нейтронах обычно применяются довольно тяжелые замедлители (например, натрий), в которых замедление происходит не так эффективно, как в воде.

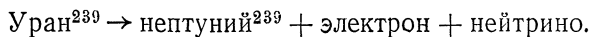
Ядерные реакторы на медленных и промежуточных нейтронах в свою очередь можно разделить на гетерогенные и гомогенные. Все эти реакторы могут быть использованы для получения атомной энергии в промышленных целях.

Позже мы подробнее расскажем об их устройстве и практическом использовании.

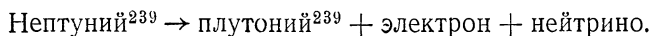
Искусственное ядерное горючее. Что же происходит, когда ядро урана²³⁸ поглощает нейтрон? Очевидно, в этом случае получается новое ядро, состоящее уже из 239 частиц. Нейтрон не принес в ядро дополнительного заряда, поэтому химические свойства нового вещества остаются прежними. Это новый изотоп урана:



Такого изотопа нет в природной смеси урана. Это легко понять, если учесть, что ядро урана²³⁹ очень неустойчиво: половина всех ядер урана²³⁹ распадается примерно за 23 минуты, излучая электрон и нейтрино. При этом, как мы знаем, один из нейтронов превращается в протон. Получающееся ядро имеет на один элементарный положительный заряд больше, чем у урана. Следовательно, в этой ядерной реакции образуется новый элемент периодической системы. Читатель помнит, что в нашей планетной системе за Ураном следует Нептун. В честь этой планеты ученые назвали новый, 93-й элемент нептунием. Таким образом, 93-й элемент может быть получен в реакции:



Но изотоп нептуний²³⁹ также радиоактивен, и половина его ядер за очень короткое время (2,3 дня) распадается, образуя следующий, 94-й элемент — плутоний:



Плутоний также радиоактивный изотоп, но с очень большим периодом полураспада: половина его ядер распадается за 24 тысячи лет.

Все эти превращения схематически показаны на рис. 18.

В настоящее время в лабораториях уже получено десять новых, так называемых трансурановых элементов, которые в периодической системе элементов Менделеева

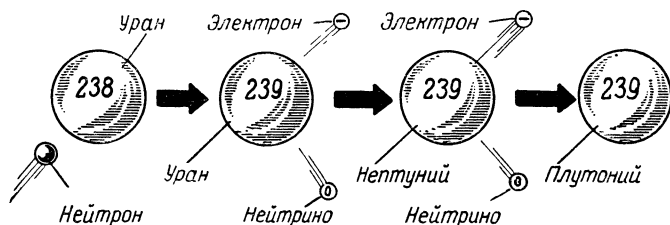


Рис. 18. Образование плутония²³⁹

стоят после урана и заняли места до сто второго номера включительно. Из этих элементов, пожалуй, самым ценным оказался изотоп плутония — плутоний²³⁹.

Плутоний²³⁹ является расщепляющимся материалом. Он делится таким же образом, как и уран²³⁵, и может заменить его в любой установке, где выделяется атомная энергия.

Искусственное ядерное горючее может быть получено также из радиоактивного элемента — тория (рис. 19).

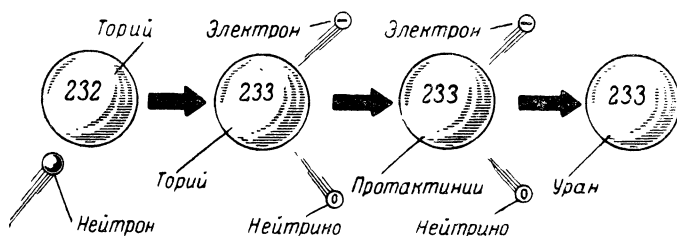


Рис. 19. Образование урана²³³

У тория имеется всего один изотоп с достаточно большим периодом полураспада (14 миллиардов лет) — торий²³². При облучении его нейтронами образуется неустойчивый изотоп тория, который после ряда радиоактивных превра-

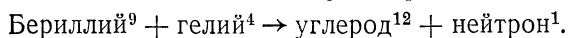
щений переходит в изотоп урана — уран²³³. Уран ²³³, так же как уран²³⁵ и плутоний²³⁹, является хорошим расщепляющимся материалом. Его период полураспада равен примерно 163 тысячам лет.

Новые возможности. Итак, теперь мы имеем три сорта ядерного горючего: уран ²³⁵, уран ²³³ и плутоний²³⁹. Энергия, выделяющаяся при делении ядер этих веществ, практически одна и та же, поскольку любое из этих ядер делится на два ядра меньшей массы, а разность энергии связи «осколков» и исходного ядра для всех сортов ядерного горючего почти одинакова.

Из всех расщепляющихся веществ только уран²³⁵ в небольшом количестве имеется в природе. Урана²³³ и плутония²³⁹ в природе нет, и чтобы их получить, нужно облучать мощным потоком нейтронов соответственно торий²³² и уран²³⁸.

Но как получить такое большое количество нейтронов?

Физики уже довольно давно научились изготавливать так называемые искусственные источники нейтронов. Для этой цели обычно используется реакция:



В качестве источника ядер гелия⁴ может быть использован радий или полоний, дающие большое количество альфа-частиц. Такой источник обычно состоит из смеси порошка бериллия с солями радия или полония. Маленькие стеклянные или металлические ампулы наполняются смесью и откачиваются до высокого вакуума. Нейтроны почти без потерь проходят через стенки сосуда. Однако наиболее мощные из современных искусственных источников нейтронов дают всего примерно 10^9 нейтронов в секунду. Но в одном грамме плутония содержится около $3 \cdot 10^{21}$ ядер. Легко подсчитать, что даже в том случае, если все добытые нейтроны будут поглощаться ядрами урана²³⁸, нужно миллион лет, чтобы накопить примерно один грамм ядерного горючего — плутония²³⁹.

Для получения нейтронов можно применить очень мощные ускорительные установки, но и в этом случае понадобится 10 лет непрерывной работы для изготовления одного грамма плутония²³⁹ или урана²³³. Таким путем нельзя создать запас больших количеств искусственно расщепляющихся материалов

К счастью, сам цепной процесс дает нам в руки мощное средство для изготовления ядерного горючего. В самом деле, ядерный реактор является мощным источником нейтронов. Легко подсчитать, что на каждый киловатт-час выделенной реактором энергии должноделиться примерно 10^{17} ядер урана²³⁵. Но при каждом делении в среднем освобождается 2,5 нейтрона. При работе уранового котла один из этих нейтронов производит новое деление, то есть идет на поддержание цепной реакции. Из оставшихся 1,5 нейтрона один будет поглощен замедлителем, регулирующими стержнями и примесями, а примерно 0,5 нейтрона поглощается в уране²³⁸ с последующим образованием плутония²³⁹.

Таким образом, даже очень маленький реактор мощностью в один киловатт за один час производит $0,5 \cdot 10^{17}$ ядер плутония²³⁹. В одном грамме плутония содержится около $3 \cdot 10^{21}$ ядер. Поэтому один грамм нового ядерного горючего образуется за пять — шесть лет.

Если же создать реактор, имеющий тепловую мощность в 1 миллион киловатт, то он даст в сутки около 500 граммов нового ядерного горючего.

Надо учесть, что плутоний и уран — различные химические элементы и их сравнительно легко можно отделять химическими способами. Химическая обработка бывших в работе урановых стержней, в которых образуется плутоний²³⁹, обходится значительно дешевле, чем разделение изотопов.

Таким образом, гораздо выгоднее получать ядерное горючее в ядерных реакторах, нежели производить разделение изотопов урана в весьма сложных и громоздких установках.

Размножающие (бридерные) реакторы. Мы видели в нашем примере, что из 2,5 нейтрона, выделяющихся при делении ядра урана²³⁵, в среднем один нейтрон идет на поддержание цепной реакции, то есть на новое деление. Один нейтрон поглощается или выходит за пределы активной зоны реактора и только 0,5 нейтрона идет на получение плутония²³⁹. Таким образом, каждые два ядра урана²³⁵ дают одно ядро плутония²³⁹, то есть при расщеплении одного килограмма легкого изотопа урана получается 500 граммов искусственного горючего.

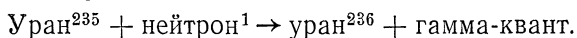
Нельзя ли так построить ядерный реактор, чтобы в нем «сгоревший» уран²³⁵ полностью заменялся новым

ядерным горючим? Нетрудно догадаться, что в этом случае для получения атомной энергии можно было бы полностью использовать не только ничтожные количества урана²³⁵, но и весь природный уран и торий.

В этом случае имеющиеся на земле запасы ядерного горючего были бы увеличены в несколько сот раз.

Оказывается, это вполне возможно.

Для восстановления ядерного горючего необходимо, чтобы каждое деление урана²³⁵ приводило к образованию хотя бы одного ядра плутония²³⁹ или урана²³³. Иначе говоря, один из нейтронов, получившихся при делении, должен быть поглощен ураном²³⁸ или торием²³², которые затем превращаются в ядра плутония²³⁹ или урана²³³. Но для существования цепной реакции, как мы знаем, необходим второй нейтрон, который будет производить деление урана²³⁵. Тем самым из образующихся в среднем 2,5 нейтрона при каждом делении два нейтрона должны быть использованы в этих двух процессах. Но в ядерном реакторе имеются различные потери нейтронов, и весьма существенным источником потерь является сам уран²³⁵, так как его ядра могут также поглощать нейтроны. При этом деления не происходит, а образуется ядро изотопа урана²³⁶, излучающее гамма-квант:



Новые нейтроны в этой реакции не освобождаются.

В реакторе, где должно происходить восстановление ядерного горючего, все эти потери не должны превышать 0,5 нейтрона из числа нейтронов, получающихся в каждом акте деления, то есть не больше 20 процентов образующихся в реакторе нейтронов. Очевидно, надо найти возможности существенно уменьшить эти потери. В обычном реакторе с замедлителем, использующим природный уран, они составляют примерно 40—50 процентов всего количества нейтронов деления. Утечку нейтронов можно уменьшить, увеличив размеры котла или применив эффективный отражатель. Но в этом случае будет иметь место поглощение нейтронов в ядрах отражателя и увеличатся потери нейтронов в замедлителе, уране и примесях.

Работы ученых, доложенные на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии в Женеве в августе 1955 года, показали, что возможны

три типа ядерных реакторов с полным восстановлением ядерного горючего.

Первый тип реактора основан на использовании быстрых нейтронов для цепного процесса.

Как уже говорилось, поглощение нейтронов ядрами почти всегда растет с уменьшением скорости нейтронов.

Вы, вероятно, наблюдали, как быстро летящая муха прорывает паутину, расставленную пауком. Муху спасает только ее скорость, ее энергия. Муха, летящая медленно, безнадежно застревает в паутине. Эта аналогия довольно правильно отражает поведение различных нейтронов в веществе. Медленный нейтрон долгое время находится вблизи ядра, в области действия ядерных сил, и поэтому имеется большая вероятность его поглощения: он может быть захвачен ядерными силами даже тогда, когда проходит на некотором расстоянии от ядра. Поглощение же быстрого нейтрона не всегда происходит даже при его столкновении с ядром. Таким образом, если цепной процесс будет идти на более быстрых нейтронах, то тем самым значительно уменьшатся бесполезные потери нейтронов. Поглощение быстрых нейтронов в уране²³⁵, замедлителе и примесях в десятки раз меньше, чем медленных. Но в природном уране цепной процесс на быстрых нейтронах, как мы уже знаем, идти не может. Поэтому в реакторах на быстрых нейтронах, которые предназначены для восстановления ядерного горючего, должен применяться уран с большим содержанием урана²³⁵.

Такой реактор называется размножающим (бридерным), и состоит он обычно из центральной части (ядра реактора) и оболочки (рис. 20).

Цепной процесс происходит в центральной части реактора, которая должна состоять из сплава урана, обогащенного легким изотопом, с каким-либо тяжелым металлом, слабо поглощающим нейтроны. Таким разбавителем может быть свинец или висмут. Объем центральной части должен быть рассчитан так, чтобы при его заполнении вес уранового сплава был немного меньше критического. Регулировка процесса может производиться добавлением небольшого количества сплава, приводящего систему в критическое состояние. В этом состоянии, как уже нам известно, один из нейтронов деления вызывает еще одно деление, то есть коэффициент размножения равен единице.

При работе такого реактора поглощение нейтронов невелико. Значительная часть их выходит из центральной части реактора и поглощается в оболочке, состоящей из урана²³⁸ или тория²³². При достаточно толстой оболочке выход нейтронов из реактора практически отсутствует.

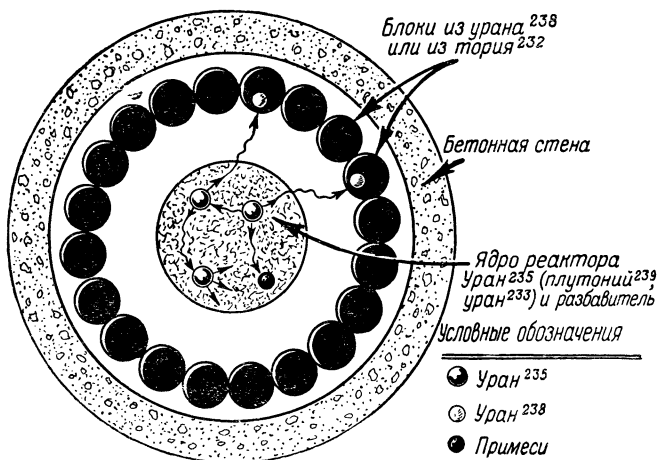


Рис. 20. Схема размножающегося реактора на быстрых нейтронах. Цепной процесс идет в центральной части реактора. Во внешних блоках происходит образование искусственного ядерного горючего — плутония²³⁹ или урана²³³

В оболочке нейтроны поглощаются ядрами урана²³⁸ или тория²³², образуя искусственное ядерное горючее — плутоний²³⁹ или уран²³³.

Центральная часть реактора может состоять из чистого урана²³⁵. Однако в этом случае подбор критических условий затруднен. Ничтожное добавление урана может привести к очень быстрому возрастанию коэффициента размножения, и когда он значительно превысит единицу, произойдет атомный взрыв.

Кроме того, при применении чистых расщепляющихся материалов центральная часть реактора будет иметь очень малый объем, в котором выделяется громадное количество тепла. Это затрудняет отвод тепла от реактора. Добавление значительных количеств разбавителя, естественно, облегчает регулировку цепного процесса и работу охлаждающей системы.

Вместо урана²³⁵ в центральной части реактора может использоваться плутоний²³⁹ или уран²³³. При работе на быстрых нейтронах легче всего добиться полного восстановления горючего, применяя плутоний²³⁹.

Второй тип размножающего реактора может быть выполнен в виде гетерогенного с замедлителем из тяжелой воды. В этом случае блоки из обогащенного урана располагаются очень близко один к другому. На малых расстояниях между блоками большая часть нейтронов не успевает замедлиться, и много актов деления ядер урана²³⁵ производится быстрыми нейтронами. Эти нейтроны, как уже говорилось, слабо поглощаются ядрами урана²³⁵.

Наконец, оказалось возможным использовать и медленные нейтроны в реакторе с восстановлением горючего. Легче всего это сделать, применяя для цепного процесса уран²³³. Его ядра сравнительно слабо поглощают (без деления) тепловые нейтроны. Выходящие из активной зоны реактора нейтроны поглощаются в наружной оболочке, состоящей из тория²³², где и образуется уран²³³. Расчеты показывают, что в оболочке такого реактора можно получить «свежего» урана²³³ не меньше, чем его «выгорает» в центральной части.

Таким образом, размножающие реакторы могут быть осуществлены на быстрых и медленных нейтронах.

Процессы в размножающем реакторе очень чувствительны к различным примесям, загрязняющим уран или замедлитель. Увеличение примесей, естественно, приводит к уменьшению выхода искусственного горючего, так как в них поглощается часть нейтронов. Такими примесями являются «осколки» деления ядер расщепляющихся материалов. Накопление «осколков» приводит к все ухудшающейся эффективности реактора. Нужна частая замена материалов, находящихся в центральной части реактора, и очистка урана от накопившихся «осколков», представляющих собой ядра различных элементов.

Как мы увидим позже, возможно осуществление реакторов, позволяющих непрерывное частичное обновление ядерного горючего. Бывшее в работе горючее проходит стадию химической очистки и возвращается обратно.

Работа ядерного реактора. В условиях постоянной работы ядерного реактора коэффициент размножения должен быть равен единице. Иначе говоря, реактор должен

быть в критическом состоянии. Однако он не может находиться долго в таком режиме, когда его размеры точно критические. Существует ряд явлений, которые приводят к самопроизвольному уменьшению коэффициента размножения. Поэтому надо иметь возможность постепенно увеличивать этот коэффициент, или, как принято говорить, реактор должен обладать некоторым запасом реактивности.

Прежде всего в процессе работы происходит постепенное уменьшение содержания расщепляющегося вещества. В том случае, когда размеры системы остаются постоянными, величина коэффициента K становится меньше единицы и цепной процесс затухает. Для поддержания процесса нужно увеличить реактивность ядерного реактора.

Кроме того, при работе реактора происходит накопление «осколков» продуктов деления ядер. Это приводит к отравлению реактора примесями, очень жадно поглощающими нейтроны. Бесплезная потеря нейтронов вызывает уменьшение коэффициента размножения K , то есть опять-таки снижается реактивность системы.

Значительное влияние на протекание цепного процесса оказывает температура реактора. Если при запуске холодный реактор был в критическом состоянии, то при работе в нагретом реакторе обычно уменьшается реактивность. Это объясняется тем, что делящиеся материалы и замедлители при нагревании расширяются, плотность их уменьшается, а это приводит к увеличению среднего расстояния между ядрами. Следовательно, нейтроны уже реже встречаются с ядрами, реже производят деления и менее эффективно замедляются. Кроме того, увеличение температуры означает увеличение скорости молекул и медленных нейтронов, и, следовательно, если реактор работает на тепловых нейтронах, активность их уменьшается. Более быстрые нейтроны с меньшей вероятностью производят деление ядер расщепляющегося материала и значительно чаще поглощаются ядрами урана²³⁸. Таким образом, повышение температуры тоже приводит к уменьшению реактивности. Для того чтобы ядерный реактор продолжал свою работу и при высокой температуре, надо увеличить его эффективные размеры.

Рассмотрим в качестве примера работу гетерогенного реактора на медленных нейтронах, выполненного в виде алюминиевого бака, наполненного тяжелой водой, в ко-

тору опущены урановые стержни. Цепной процесс управляется регулирующим кадмиевым стержнем. Если мы поднимем регулирующий стержень, то поглощаемое им число нейтронов уменьшится: величина θ , которая входит одним из множителей в выражение для коэффициента размножения, увеличивается, а следовательно, увеличивается реактивность котла. Если регулирующий стержень останется на уровне, при котором коэффициент K больше единицы, то очевидно, что каждое деление ядра урана²³⁵ будет вызывать в среднем больше чем одно деление других ядер. Поток нейтронов в реакторе, а вместе с ним и выделение энергии возрастет, мощность котла увеличится.

Мощность котла, или количество энергии, выделяющейся в одну секунду, можно определять, измеряя поток нейтронов, так как их количество определяет число ядерных реакций, в которых освобождается энергия. Чем больше поток нейтронов, тем выше уровень мощности котла. Во всех реакторах предусмотрено измерение потока нейтронов. Это осуществляется с помощью специального прибора — ионизационной камеры, помещенной вблизи активной зоны.

Для регистрации медленных нейтронов применяются ионизационные камеры, наполненные газообразным соединением бора (BF_3). Поглощение нейтрона бором приводит к ядерной реакции, сопровождающейся вылетом быстрой альфа-частицы. При своем движении в камере альфа-частица производит ионизацию молекул газа. На электроды ионизационной камеры приходит электрический заряд. При измерении очень интенсивных потоков медленных нейтронов, возникающих во время работы ядерных реакторов, используют менее чувствительные камеры, электроды которых покрыты слоем карбида бора.

Таким образом, нейтрон, проходящий сквозь камеру, вызывает небольшой импульс электрического тока. Чем больше поток нейтронов, тем больший ток протекает в камере. Измерительный прибор дает нам значение потока нейтронов или относительную величину мощности уранового котла.

Как показывают расчеты, при коэффициенте размножения 1,005 поток нейтронов и соответственно мощность реактора увеличиваются за 10 секунд примерно в 2,7 раза.

В любом куске урана, а следовательно, и в урановом котле, независимо от того, протекает цепной процесс или

нет, непрерывно выделяется энергия. Это происходит за счет самопроизвольного деления. Учитывая, что в 1 грамме урана за один час происходит в среднем 23 деления, можно легко подсчитать: если в ядерный реактор загружено около 1 тонны природного урана, то начальная мощность его примерно будет $7 \cdot 10^{-14}$ киловатт. Это, конечно, очень маленькая мощность, но ее вполне достаточно для развития цепного процесса. При выбранном нами коэффициенте размножения $K=1,005$ через 10 секунд эта мощность увеличится в 2,7 раза, через 20 секунд — в 7,3 раза и т. д.

Подсчитанное таким путем повышение мощности котла во время пускового периода можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1

Время, мин.	Мощность, квт	Время, мин.	Мощность, квт
0	$7 \cdot 10^{-14}$	4,0	$7 \cdot 10^{-4}$
0,5	$9 \cdot 10^{-13}$	4,5	$1,4 \cdot 10^{-2}$
1,0	$2,8 \cdot 10^{-11}$	5,0	$2,8 \cdot 10^{-1}$
1,5	$5,6 \cdot 10^{-10}$	5,5	5,6
2,0	$7 \cdot 10^{-9}$	6,0	91
2,5	$1,4 \cdot 10^{-7}$	6,5	1 750
3,0	$2,8 \cdot 10^{-6}$	7,0	28 000
3,5	$4,5 \cdot 10^{-5}$	7,5	100 000

Мощность реактора, как видно из таблицы, возрастает медленно за первые 5 минут. Однако в последующие 1,5 минуты скорость значительно увеличивается; за промежуток времени от 6 до 6,5 минуты мощность котла возрастает от 91 до 1750 киловатт, что очень опасно. При недостаточном охлаждении температура тяжелой воды, а следовательно, и давление паров может достигнуть весьма больших значений. В лучшем случае разорвется алюминиевый бак и вода выльется; при отсутствии замедлителя цепной процесс прекратится.

Если провести измерение фактической зависимости мощности котла от времени, то легко убедиться, что приведенные расчеты не совпадают с результатами измерений.

По прошествии некоторого времени вследствие повышения мощности температура котла возрастет, коэффи-

коэффициент размножения уменьшится и поэтому мощность будет увеличиваться значительно медленнее, чем это следует из таблицы. При некоторой температуре коэффициент размножения может стать даже равным единице. Эта температура соответствует определенной мощности ядерного реактора, которая является максимальной для данного положения регулирующего стержня.

Возрастание температуры вследствие большой теплоемкости реактора должно происходить медленнее, чем изменение коэффициента размножения. Поэтому, после того как величина K станет равна единице, температура реактора может еще повышаться. Это приводит к дальнейшему уменьшению K и, следовательно, к падению мощности котла. Уменьшение выделяемого тепла в свою очередь вызовет охлаждение реактора и создаст условия для развития цепного процесса. Таким образом, благодаря своеобразной тепловой инерции происходит колебание мощности ядерного реактора (рис. 21). Раз-

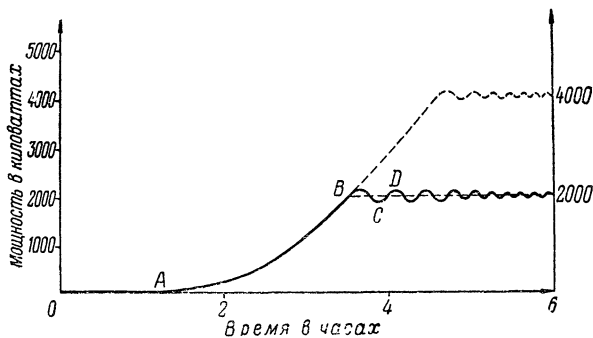


Рис. 21. Колебание мощности ядерного реактора в пусковой период

мах этих колебаний постепенно убывает, пока не устанавливается мощность, соответствующая температуре реактора, при которой коэффициент размножения становится равным единице. Если мы хотим получить от реактора большую мощность, необходимо выдвинуть часть кадмиевого стержня из реактора. Произойдет дальнейший рост температуры, и мощность реактора после ряда колебаний установится на более высоком уровне.

Может случиться, что при полном удалении регулирующего стержня рост температуры приведет к такому

уменьшению коэффициента размножения нейтронов, что мощность котла не сможет превысить некоторого вполне безопасного значения. Такой реактор очень удобен в обращении, так как нет опасности чрезмерного развития цепного процесса, приводящего к аварии.

Если, несмотря на зависимость коэффициента размножения от температуры, реактор все же может выйти из

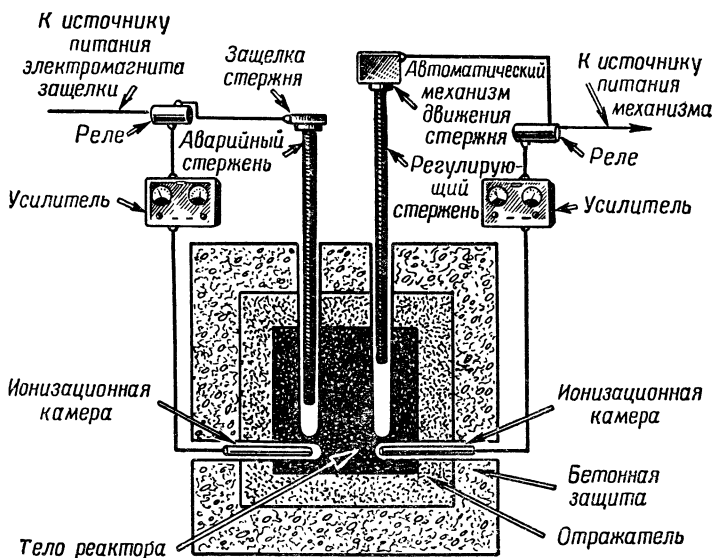


Рис. 22. Схема автоматического управления ядерным реактором. Регулирующий стержень совершает колебания вблизи положения, при котором коэффициент размножения нейтронов равен единице; соответственно этому колеблется и мощность ядерного реактора

управления, то его регулировка должна быть полностью автоматизирована. При ручном управлении существует опасность, что быстрое развитие цепного процесса может привести к аварии раньше, чем обслуживающий персонал успеет произвести необходимые операции.

Автоматическое управление может производиться с помощью уже описанной ионизационной камеры (рис. 22). После того как котел достиг заданной мощности (кривая *A — B* на рис. 21), включают автоматическое управление. При некотором повышении мощности нейтронный поток, пронизывающий ионизационную ка-

меру, создает там электрический ток, который, будучи усилен с помощью радиотехнических устройств, притягивает якорь электромагнитного реле. Якорь реле включает электрический мотор механизма, опускающего регулирующей стержень. Поглощение нейтронов стержнем приводит к уменьшению коэффициента размножения. Мощность котла, а следовательно, и нейтронный поток постепенно уменьшаются. Этот процесс описывается отрезком кривой $B - C$. Благодаря уменьшению тока в ионизационной камере якорь реле отходит и включает мотор механизма перемещения стержня в обратную сторону. Регулирующий стержень поднимается, что ведет к увеличению нейтронного потока (кривая $C - D$), а следовательно, мощности.

Таким образом, мощность реактора все время колеблется вблизи заданного среднего значения. С помощью подобной автоматической регулировки колебание мощности уранового реактора может поддерживаться с точностью до 0,1 процента.

Однако не исключено, что автоматическое устройство может вследствие неисправности каких-либо элементов электрической схемы или по другой причине выйти из строя. Чтобы предупредить аварию, реактор имеет аварийный стержень. Механизм передвижения такого стержня связан с другой ионизационной камерой. В случае резкого увеличения мощности реактора или вследствие неисправности каких-либо автоматических устройств срабатывает электромагнитная защелка аварийного кадмиевого стержня; он падает и глубоко входит в тело ядерного реактора. Поглощение большого количества нейтронов ведет к резкому уменьшению коэффициента размножения и, следовательно, к полному прекращению цепного процесса в реакторе. Таким путем может быть обеспечена стабильная и вполне безопасная работа ядерных реакторов.

В реакторах на быстрых и промежуточных нейтронах нельзя применять для регулировки стержни из кадмия или из бористой стали. Эти вещества активно поглощают только медленные нейтроны. Нейтроны, обладающие средними скоростями, очень сильно поглощаются ураном²³⁸ и торием²³².

Для реакторов на быстрых нейтронах трудно подобрать материалы, жадно поглощающие нейтроны. Регу-

лировка этих реакторов может производиться стержнями из расщепляющихся материалов примерно так, как это показано на рис. 15.

По мере работы реактора в урановых стержнях будет «выгорать» уран²³⁵ и накапливаться плутоний²³⁹. Если реактор не воспроизводит ядерное горючее, то количество накапливающегося плутония²³⁹ меньше «выгоревшего» урана²³⁵. Но даже если бы общее содержание расщепляющегося материала в стержне оставалось бы постоянным, мощность ядерного реактора постепенно падала бы. Поглощение нейтронов образующимися в реакторе «осколками» приводит к уменьшению коэффициента размножения. Для стабильной работы реактора необходимо компенсировать это поглощение: надо уменьшить потерю нейтронов в кадмиевом стержне, то есть постепенно выдвигать его из активной зоны реактора.

Однако в конце концов реактивность системы настолько уменьшается, что даже при полном удалении регулирующего стержня коэффициент размножения будет все же меньше единицы. После этого мы уже не сможем поддерживать заданную мощность реактора, и она будет падать.

Время устойчивой работы зависит от размеров реактора и мощности, при которой он работает. Естественно, что чем больше урана загружено в реактор и чем меньше его мощность, тем дольше он работает в устойчивом режиме.

Ядерный реактор будет работать вполне устойчиво, если периодически заменять часть отработанных урановых стержней на новые. В том случае если реактор работает устойчиво, например в течение 100 суток, можно время от времени заменять часть урановых стержней и тем самым поддерживать реактор в состоянии достаточной реактивности.

В отработанных стержнях содержится значительное количество урана, плутония и «осколков» деления. Вследствие того что «осколки» деления представляют собой радиоактивные ядра, отработанные урановые стержни очень интенсивно выделяют излучения, весьма пагубно действующие на организм человека. Поэтому отработавшие стержни извлекаются из реактора с помощью специальных механизмов, выдерживаются в специальных хранилищах, а затем идут на химическую обработку.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ

Первый советский реактор. Когда в 1939 году была открыта ядерная реакция деления урана, ученые вскоре поняли, что это открытие сулит получение и использование атомной энергии.

Первые результаты этого открытия были использованы в 1945 году в США для создания атомных бомб и ознаменовались бессмысленным уничтожением сотен тысяч мирных людей Японии.

Во всех странах, владеющих атомным оружием, имеются очень мощные ядерные реакторы, в которых получают расщепляющиеся материалы — плутоний²³⁹ или уран²³³, идущие, как и уран²³⁵, на изготовление запасов атомных бомб. Так, например, в США в штате Хэнфорд имеется несколько больших урановых котлов с тепловой мощностью порядка миллиона киловатт, где получается, по всей вероятности, от половины до одного килограмма плутония в сутки. Подробного описания таких реакторов нет. Надо только указать, что эти установки не имеют никакого энергетического значения. И, по выражению одного из американских физиков, за все время существования котлов в Хэнфорде ни одного ватта полезной энергии не было получено, если не считать, что они слегка нагревают воды мощной реки Колумбии, куда сливается охлаждающая реакторы вода.

Читателю интересно будет узнать о некоторых советских ядерных реакторах, подробное описание которых приводилось нашими учеными в 1955 году на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии.

Изучение цепных реакций в нашей стране было начато еще до Великой Отечественной войны. Это позволило создать соответствующую теорию деления урана. Были исследованы основные параметры процесса деления, найдены величины, от которых зависит коэффициент размножения системы на тепловых нейтронах. Разработана теория развития процесса во времени и определена роль запасающих нейтронов в управлении системами урана с замедлителем. Эти исследования продолжались и в военное время, и, естественно, развитие этой отрасли науки проходило независимо от ученых других стран.

Постройке первого советского ядерного реактора предшествовали многочисленные исследования различных моделей.

Как мы видели, цепной процесс на природном уране и графите возможен только в гетерогенных системах, где уран размещается отдельными блоками в сплошном графитовом замедлителе. Советские ученые подсчитали, что коэффициент размножения в такой системе в самом благоприятном случае не превышает значения 1,07.

А вдруг физики-теоретики ошиблись! В таких расчетах всегда могут быть ошибки, тем более, что ученые основывались на различных недостаточно и точно определенных величинах. Было вполне вероятно, что в действительности коэффициент размножения окажется меньше единицы. А мы уже знаем, что в этом случае цепной процесс не пойдет. Сооружение урано-графитового реактора оказалось рискованным делом.

Ученые многих стран, в частности немецкие ученые, не веря в успех, так и не предприняли попыток строить такие реакторы.

Но советские ученые оказались более настойчивыми. Они провели ряд измерений, подтверждающих возможность осуществления цепного процесса в урано-графитовой системе. Выяснили, что для успешной работы реактора надо применять урановые цилиндрические блоки и располагать их в графите на расстоянии 20 сантиметров один от другого.

Оказалось, что для достижения критического размера, при котором начинается цепной процесс, нужны очень большие количества (для того времени) дорогих материалов: 45—50 тонн металлического урана и несколько сот тонн графита. Нужно еще отметить, что требования, предъявляемые к этим материалам, были чрезвычайно высокие. Примесь бора или кадмия в графите совершенно недопустима. Миллионная доля бора в графите приводила к огромному поглощению нейтронов, что не давало возможности осуществить цепной процесс. От чистоты материалов зависел успех всего дела. На помощь физикам пришли горняки, металлурги и химики. Уран и графит в нужных количествах был получен: уран — в виде металлических блоков диаметром три — четыре сантиметра, а графит — в виде кирпичей размером $10 \times 10 \times 60$ сантиметров.

Постройка реактора является вообще весьма сложным и тонким делом. Сборка же первого реактора, если не принять специальных мер, к тому же и опасна. Может ведь случиться, что вследствие ошибки в расчетах и предварительных измерениях бурный цепной процесс начнется значительно раньше, чем ожидают. Это может привести к очень серьезной аварии и даже к взрыву. В лучшем случае сотрудники лаборатории получают огромные дозы очень вредного нейтронного облучения. Переоблучение может губительно отразиться на здоровье людей.

Все это хорошо понимали советские люди, и поэтому при строительстве реактора велось тщательное наблюдение за числом выделяемых в системе нейтронов. В процессе сборки в тело реактора были всегда погружены поглощающие нейтроны кадмиевые стержни. Эти стержни в любом случае не давали возможности осуществить цепной процесс.

Мы уже знаем, что в уране всегда происходят самопроизвольные (спонтанные) деления, в результате которых возникают нейтроны. Поэтому чувствительная ионизационная камера, помещенная возле куска урана, всегда регистрирует нейтроны. Чем больше масса урана, тем больше нейтронов.

Давайте немного займемся арифметикой. Предположим, что наша камера, установленная на некотором расстоянии от куска урана весом в один грамм, регистрирует в час всего один импульс, вызванный нейтроном спонтанного деления. Сколько же она будет регистрировать, если вместо одного грамма мы в том же месте поместим тонну урана? Задача кажется очень простой. В одной тонне миллион граммов, поэтому камера сосчитает уже 10^6 импульсов в час, или около 300 импульсов в секунду. Но это не так. Мы забыли о том, что нейтроны, вылетающие при делении, будут также вызывать деления, и, чем больше окружающая масса урана, тем больше будет этих новых делений и новых нейтронов. Таким образом, число нейтронов в тонне урана будет всегда несколько больше подсчитанного нами.

Общее число нейтронов можно легко подсчитать, если вспомнить, что такое коэффициент размножения нейтронов.

Читатель знает, что если в нашей системе урана с графитом появилось N_0 нейтронов, то эти нейтроны, совер-

шая новые деления, создадут еще N_0K нейтронов, где K — коэффициент размножения. В свою очередь эти N_0K нейтронов дадут новых N_0K^2 нейтронов и т. д. В конечном счете вместо N_0 нейтронов мы получим бесконечное число поколений новых нейтронов:

$$N_0, N_0K, N_0K^2, N_0K^3 \dots$$

Сумма нейтронов всех поколений даст нам общее число нейтронов, полученное в результате появления в системе N_0 нейтронов, причем так как коэффициент размножения меньше единицы, то число нейтронов каждого последующего поколения меньше предыдущего (цепной процесс не идет).

Читатель, окончивший среднюю школу, конечно, знает эти числа: это члены бесконечно убывающей геометрической прогрессии. Сумма всех членов бесконечной убывающей прогрессии равна: $N = \frac{N_0}{1-K}$.

Не следует думать, что это число нейтронов получается за бесконечно большое время. Скорость нейтронов очень велика, и большое число поколений нейтронов будет рождаться в миллионные доли секунды. За это же время количество нейтронов возрастает до величины, близкой к сумме бесконечно убывающей прогрессии.

Таким образом, система, состоящая из урана или урана с графитом, является умножителем нейтронов. Если мы впустим в нее N_0 нейтронов, то в ней получается большее число $N \frac{N_0}{1-K}$ нейтронов (при $K < 1$). В том случае когда коэффициент размножения очень мал, то есть когда количество урана невелико, размножения нейтронов не происходит и $N \approx N_0$. Но когда размер системы близок к критическому, коэффициент размножения немного меньше единицы и число нейтронов резко возрастает. Так, при $K = 0,9$ в уране рождается нейтронов в 10 раз больше начального количества. Если $K = 0,99$, то первоначальный поток нейтронов увеличивается в 100 раз, если $K = 0,999$, то — в 1000 раз, и т. д. Когда система становится критической, то уже один нейтрон вызывает их бесконечное множество. Теперь нам уже ясно, как экспериментально определяли советские ученые радиус урано-графитового шара, при котором начинается

цепной процесс. Они измерили коэффициент размножения для четырех шаровых моделей различных радиусов.

Ученые вносили в эти шары источник, излучающий известное число нейтронов. Определяя ионизационной камерой число нейтронов, полученных внутри шара, можно было просто найти коэффициент размножения. Таким образом было определено четыре возрастающих значения коэффициента размножения для разных радиусов шаровых моделей. Отсюда уже можно было достаточно точно сказать, при каком радиусе системы коэффициент размножения станет равным единице.

В соответствии с расчетами и экспериментами физики решили строить реактор в виде сферы радиусом в три метра.

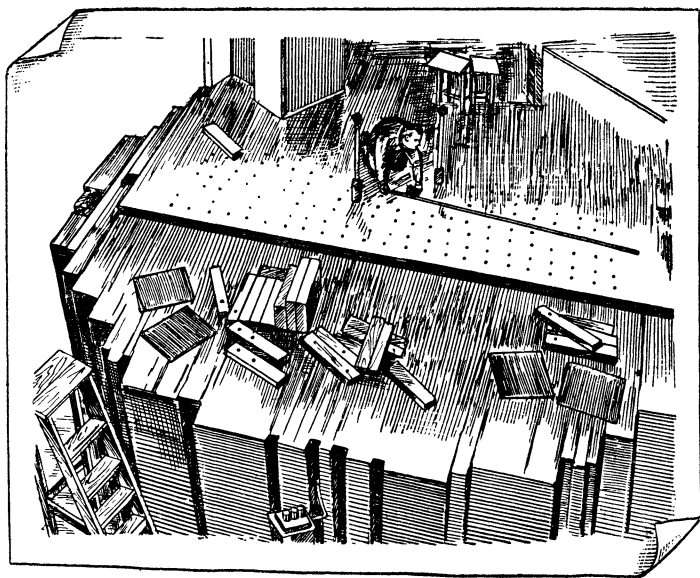


Рис. 23. Сборка активной зоны первого советского реактора

Первые слои графитовых кирпичей не имели отверстий для урановых блоков и предназначались для отражения нейтронов. После восьми таких слоев начали складывать активную зону, вставляя в отверстия графитовых кирпичей урановые блоки. Этот момент запечатлен на рис. 23.

Увеличение размеров реактора осуществлялось последовательной укладкой графитовых кирпичей слоями толщиной 10 сантиметров. При этом велось тщательное наблюдение за увеличением нейтронного потока. Рост числа нейтронов вначале происходил очень медленно, но при приближении активной зоны к критическим размерам нейтронный поток быстро возрастал.

При строительстве реактора не обошлось без неприятных переживаний. Измерения, проведенные после укладки очередного слоя, неожиданно показали, что коэффициент размножения слишком мало вырос. Творцам первого советского реактора пришлось пережить много тревожных минут. «Неужели,— думали они,— расчеты и эксперименты были ошибочными и в действительности коэффициент размножения не будет больше единицы?» Это означало, что рушилась надежда ученых на осуществление цепного процесса в природном уране и графите.

К счастью, такая неуверенность длилась недолго. После укладки пятидесятого слоя стало ясно, что на пятьдесят пятом слое реактор достигнет критических размеров и начнется ожидаемая цепная ядерная реакция. На самом деле цепная реакция возникла уже при укладке пятьдесят четвертого слоя.

Первый советский ядерный реактор начал работать. Он оказался также и первым реактором в Европе.

Трудно передать то волнение, которое охватило участников строительства при пуске реактора. Был совершен подвиг, значение которого трудно переоценить. Наша Родина овладела атомной энергией. Это был торжественный момент. Ученые горячо поздравляли друг друга с решением великой проблемы — получением атомной энергии.

Активная часть первого советского реактора (рис. 24) представляла собой сферу диаметром около шести метров. Отражатель нейтронов имел толщину 80 сантиметров и состоял из тех же графитовых кирпичей. Всего в ядерный реактор было загружено приблизительно 45 тонн природного урана и несколько сот тонн графитовых кирпичей. Управление реактором производилось с помощью кадмиевых стержней.

Для размещения реактора было построено специальное здание, разрез которого приведен на рис. 25. Сам реактор был собран в бетонированном котловане ниже

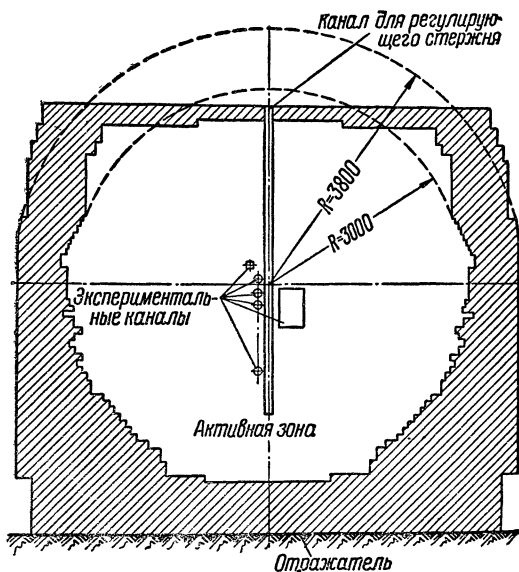


Рис. 24. Схема первого советского реактора

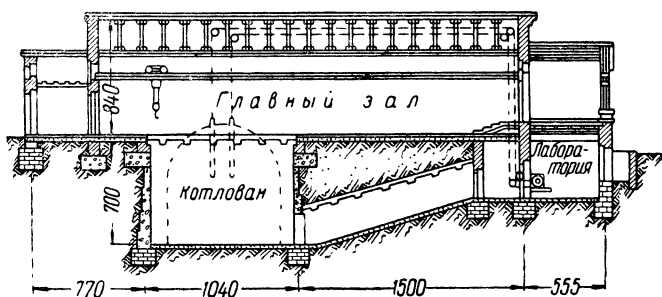


Рис. 25. Разрез здания для размещения первого советского реактора

уровня земли. В первом советском реакторе не было предусмотрено специальное охлаждение, поэтому установка могла лишь кратковременно работать с мощностью в несколько тысяч киловатт.

Когда был пущен первый советский реактор, оказалось, что экспериментаторам приходится иметь дело с потоком нейтронов, во много раз превышающим потоки

всех других источников нейтронов. Этого опасались, так как тогда еще было мало известно о вредном действии больших нейтронных потоков. Поэтому мощность реактора поддерживалась на ничтожно малом уровне. Впоследствии пульт управления реактором был перенесен в коридор, который находился под землей и потому оказался более защищенным от падавшего сверху излучения нейтронов. После этого мощность реактора была значительно повышена.

При увеличении мощности реактора было обнаружено явление саморегулирования реактора. Когда поднимали кадмиевый стержень, то мощность реактора вначале значительно увеличивалась, а затем вследствие нагревания быстро падала. Читателю уже знакомо это явление: при нагревании коэффициент размножения падает и развитие цепной реакции замедляется. Таким образом, первый советский реактор оказался безопасным. После того как в этом убедились, работу на реакторе стали производить гораздо смелее.

Пуск первого ядерного реактора имел огромное значение для советской науки. Была доказана возможность осуществления цепной ядерной реакции с природным ураном в графитовом замедлителе. На реакторе проведены исследования, необходимые для постройки более совершенных установок. Впервые были получены в весомых количествах искусственные радиоактивные изотопы, использованные затем в других отраслях науки и техники.

Реактор для физических и технических исследований (РФТ). Более совершенным аппаратом является советский реактор, предназначенный для физических и технических исследований (РФТ). Этот реактор мощностью в 10 тысяч киловатт был смонтирован под полом большого зала, и на рис. 26 мы видим только плиты и цилиндрический выступ, представляющие собой верхнюю защиту от радиоактивных излучений реактора. Схема на рис. 27 знакомит нас с внутренним устройством реактора. Реактор состоит из графитового цилиндра диаметром 2,6 метра и высотой 2,4 метра. Центральная часть цилиндра пронизана 37 каналами диаметром 54 миллиметра каждый и образует активную зону реактора, диаметр и высота которой равны одному метру. Наружная

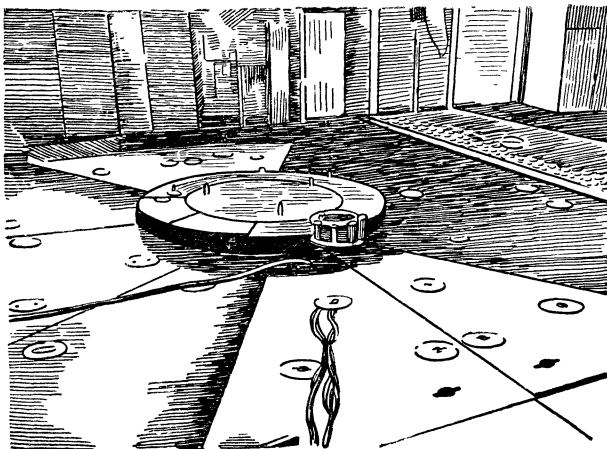


Рис. 26. Верхняя часть реактора РФТ

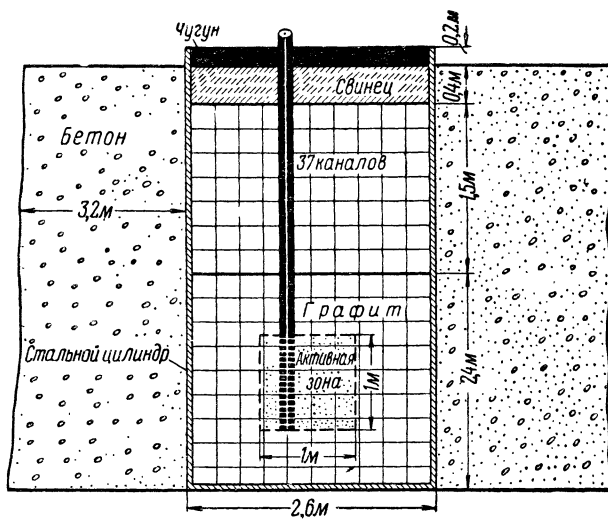


Рис. 27. Схема реактора РФТ

часть графитовой оболочки является отражателем нейтронов.

При работе реактора выделяются весьма интенсивные нейтронные и гамма-излучения. Для защиты обслуживающего персонала от вредного действия этих излучений реактор со всех сторон окружен специальной защитой. Графитовый цилиндр помещен в корпус из листовой стали толщиной 2,5 сантиметра. Корпус окружен бетонной стеной толщиной 3,2 метра. Для защиты верхней части реактора имеется дополнительный слой графита толщиной 1,5 метра и слой свинца — 0,4 метра. Кроме того, сверху реактор прикрыт чугуной плитой толщиной 20 сантиметров.

В реакторе применяется металлический уран с 15-процентным содержанием урана²³⁵. Урановые блоки выполнены в виде труб с внутренней и внешней алюминиевыми оболочками и вставлены в широкие алюминиевые трубы. В собранном виде такая система представлена на чертеже и является одним из 37 рабочих каналов (рис. 28) ядерного реактора.

В процессе работы реактора выделяющаяся атомная энергия превращается в тепло, поэтому урановые трубы нагреваются. Охлаждение производится с помощью дистиллированной воды. Вода входит в рабочий канал сверху, поступает в кольцевой зазор между алюминиевой трубой и внешней поверхностью уранового блока и поднимается обратно по центральному каналу. Такое движение воды обеспечивает хороший отвод тепла.

Урановые блоки, которые побывали в работе, содержат большое количество продуктов деления — «осколков» ядер урана. Это — в большинстве случаев радиоактивные элементы, дающие весьма интенсивные и вредные излучения.

Смена рабочих каналов производится мощным краном с электроприводом. Техник управляет процессом выемки канала, находясь в специальной кабине, расположенной рядом с залом. Наблюдение за операцией ведется через небольшое окно, защищенное толстыми свинцовыми стеклами. Старый канал с помощью того же крана опускается в специальный бетонный колодец, где он будет находиться до тех пор, пока не потеряет большую часть своей радиоактивности.

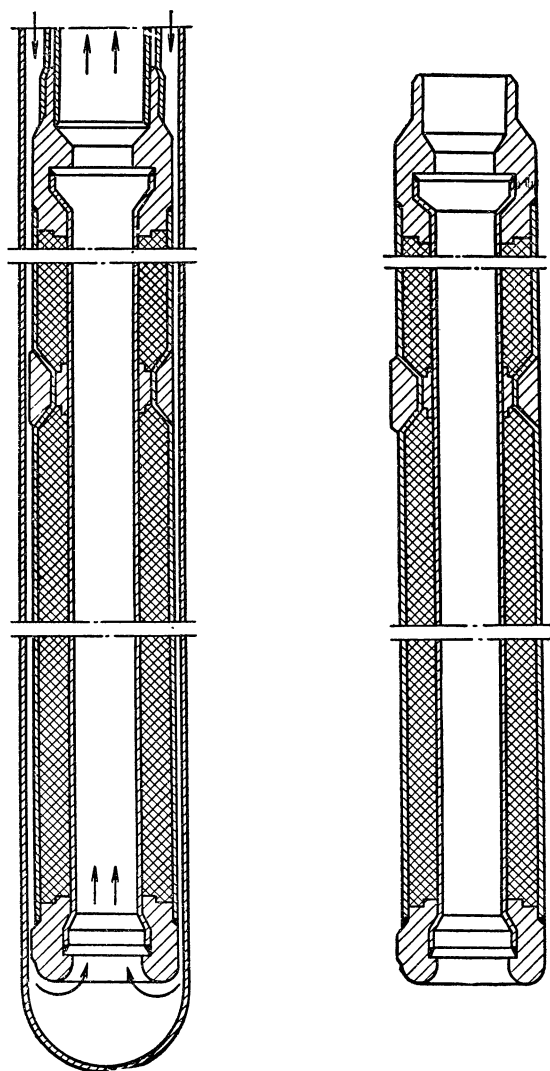


Рис. 28. Рабочие каналы реактора РФТ

«Свежие» урановые блоки совершенно безопасны.

Значительной радиоактивностью будет обладать также дистиллированная вода, отводящая тепло от урановых блоков. Поэтому все трубопроводы, насосы и теплообменники, связанные с радиоактивной водой, расположены в помещениях с толстыми бетонными стенами.

В ядерном реакторе РФТ управление цепным процессом и аварийное выключение питания производится системой поглощающих нейтроны стержней, приводимых

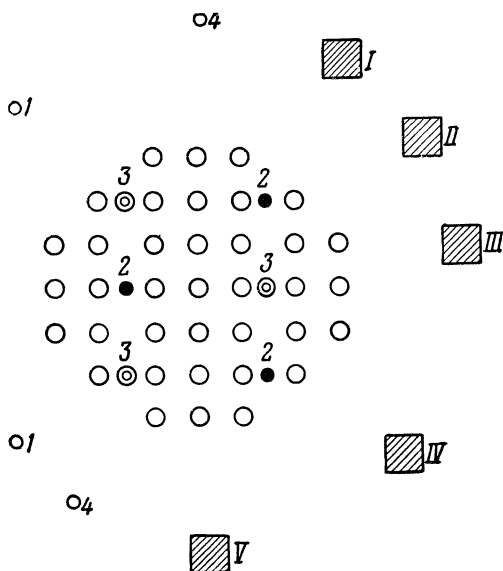


Рис. 29. Схематический поперечный разрез РФТ:

1 — стержни автоматического регулирования; 2 — ручные поглощающие стержни; 3 — автоматические регулирующие стержни; 4 — стержни аварийной защиты; I, II, III, IV, V — квадратные каналы, предназначенные для физических исследований

в движение ручным или автоматическим приводами. Сигналы для автоматического передвижения стержней поступают от ионизационных камер. Схема расположения регулирующих стержней показана на рис. 29, представляющем собой горизонтальный разрез реактора.

Два стержня автоматического регулирования 1 помещены в боковом отражателе нейтронов и при полном

их погружении уменьшают коэффициент размножения на 0,1 процента. Такая регулировка достаточна, чтобы мощность реактора поддерживалась на заданном уровне при случайных колебаниях реактивности. Кроме того, в реакторе имеются еще три ручных 2 и три медленно движущихся автоматических 3 поглощающих стержня, которые изготовлены из карбида бора и помещаются в активной зоне реактора. Эти стержни при общем действии могут изменять коэффициент размножения на 10 процентов. Они обеспечивают запас реактивности на длительные процессы «выгорания» урана²³⁵ и накопления поглощающих нейтроны «осколков» деления.

Для выключения реактора в случае аварии имеются два кадмиевых стержня 4, расположенные в боковом отражателе. Стержни опускаются в крайнее нижнее положение за 0,4 секунды и дают изменение реактивности на 1 процент. Они надежно защищают реактор в случае каких-либо неисправностей в схеме охлаждения реактора и при выключении потребителя энергии.

Если в процессе эксплуатации аппарата стержни автоматической регулировки будут опущены до конца, то мощность реактора уже не сможет поддерживаться на заданном уровне. Для избежания аварии срабатывают аварийные стержни, и цепной процесс затухает. Необходимо уже подбор новых положений поглощающих стержней активной зоны.

На схеме видны также квадратные каналы, куда помещают материалы и конструкции, подлежащие различным исследованиям при их нейтронном облучении. В этих каналах может производиться также облучение химических элементов для получения радиоактивных изотопов.

Охлаждение реактора, как мы уже говорили, производится дистиллированной водой. Вода с помощью насосов прогоняется через рабочие каналы и каналы охлаждения отражателя. Нагретая дистиллированная вода в свою очередь в теплообменниках отдает тепло речной воде. Речная вода охлаждает также и бетонную защиту реактора, проходя внутри нее по трубам.

Для контроля за охлаждением каждого из 37 рабочих каналов на линиях подвода дистиллированной воды установлены индивидуальные водомеры. При сильном отклонении от нормы расхода воды в сторону уменьшения или

увеличения аварийные стержни автоматически останавливают цепную реакцию.

Время устойчивой работы реактора зависит от его размеров и отдаваемой им мощности. Естественно, что чем больше урана загружено в реактор и чем меньше его мощность, тем дольше он работает в устойчивом режиме. В реакторе РФТ вследствие выгорания урана²³⁵ и накопления «осколков» коэффициент размножения будет уменьшаться на величину $7 \cdot 10^{-4}$ части первоначальной величины в сутки. Так как его максимальное значение в рабочем режиме приблизительно равно 1,15, то возможна непрерывная эксплуатация ядерного реактора в течение ста суток. Запас реактивности будет вполне достаточен, если каждые сто суток будет заменяться 10—15 старых урановых стержней на новые. Смена этих стержней может быть произведена за одни сутки.

Реактор РФТ был предназначен для исследований конструкции урановых блоков энергетических реакторов атомных электростанций. Он служит также мощным источником нейтронов для проведения различных физических опытов.

Реакторы на тяжелой и простой воде. Другим типом ядерных реакторов является реактор Академии наук СССР с тяжелой водой, который был построен в 1948 году (рис. 30). Реактор предназначался для научных исследований как в самом аппарате, так и на выведенных из него пучках нейтронов. Он использовался также для получения радиоактивных изотопов. Применение тяжелой воды имеет ряд преимуществ для физических и технических исследований самого реактора. Жидкий замедлитель позволяет осуществить различное расположение и изменить количество и размеры урановых блоков. Этот реактор состоит из цилиндрического алюминиевого резервуара диаметром 1,75 метра и высотой около двух метров. В бак опущены урановые стержни длиной в 160 сантиметров. Диаметр урановых стержней в разных исследованиях менялся от 2,2 до 2,8 сантиметра. Изменялось также и число урановых стержней — от 86 до 292. Отвод тепла в реакторе осуществляется за счет циркуляции тяжелой воды. Скорость циркуляции невелика, и поэтому мощность ядерного реактора не превышает 500 киловатт. Над тяжелой водой непрерывно протекает гелий, который уносит с собой выделяющуюся

за счет разложения тяжелой воды гремучую смесь. Пары конденсируются в ловушке, а гремучая смесь сжигается в специальном приборе (палладиевом катализаторе) и, следовательно, также превращается в воду. Реактор имеет графитовый отражатель нейтронов толщиной около

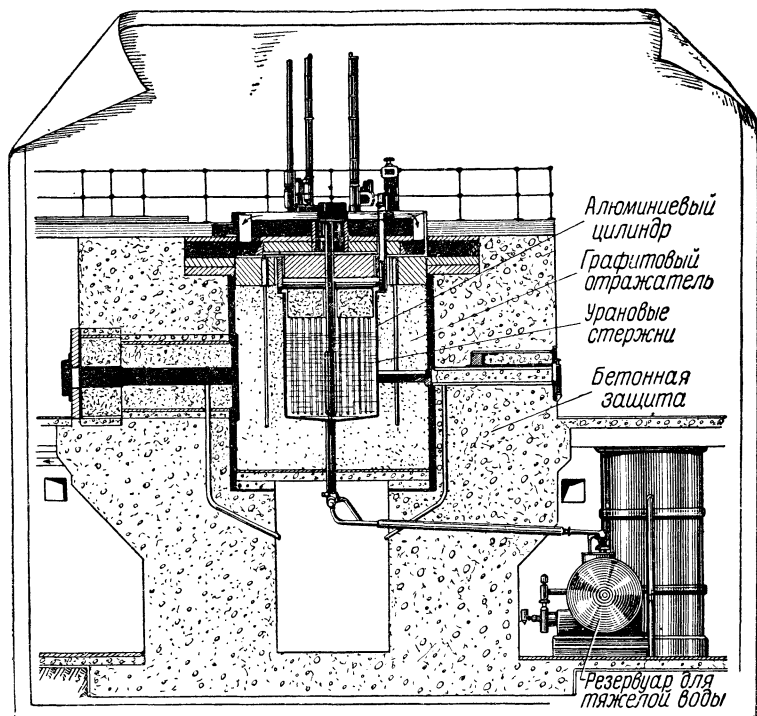


Рис. 30. Реактор на тяжелой воде Академии наук СССР

метра. Защита от излучения выполнена из бетона и имеет толщину 2,5 метра.

Верхняя часть реактора показана на рис. 31.

Управление реактором производится ручным и автоматическим передвижением четырех кадмиевых стержней. Имеются также и два аварийных стержня. Кроме того, в случае аварии тяжелая вода сливается в запасной бак, и цепная реакция прекращается.

Как известно, обыкновенная вода является очень хорошим замедлителем. Нейтрон благодаря соударениям

с ядром водорода становится тепловым в среднем на пути около шести сантиметров. Поэтому реакторы с простой водой весьма компактны.

Существенным недостатком воды как замедлителя является сильное поглощение водородом тепловых нейтронов. Для восполнения больших потерь нейтронов необхо-

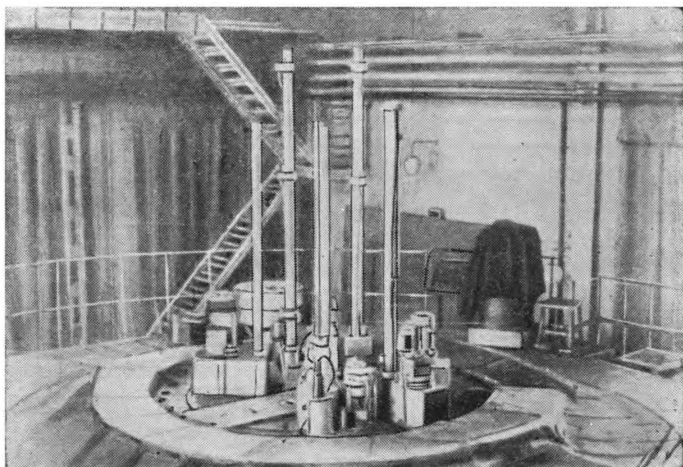


Рис. 31. Верхняя часть реактора на тяжелой воде

димо уменьшать поглощение их ядрами урана²³⁸, то есть применять в реакторе обогащенный уран с большим содержанием урана²³⁵.

Такой небольшой реактор на простой воде был построен Академией наук СССР (рис. 32). Центральная часть реактора представляет собой алюминиевый бак, заполненный водой. В дно бака вварена труба диаметром 50 сантиметров. Внутри этой трубы расположена активная зона реактора, состоящая из обыкновенной воды и урановых блоков, так называемых тепловыделяющих элементов. Получающееся в активной зоне реактора тепло отводится водой и передается в теплообменнике другой проточной воде.

Тепловыделяющие элементы представляют собой цилиндры с наружным диаметром 9 миллиметров, изготовленные из урана, обогащенного до 20 процентов ура-

ном²³⁵. Всего в реактор загружается около 35 килограммов урана.

В качестве отражателя нейтронов также применялась обыкновенная вода.

Управление реактором осуществляется четырьмя стержнями регулирования, из которых один автоматически поддерживает мощность реактора на заданном

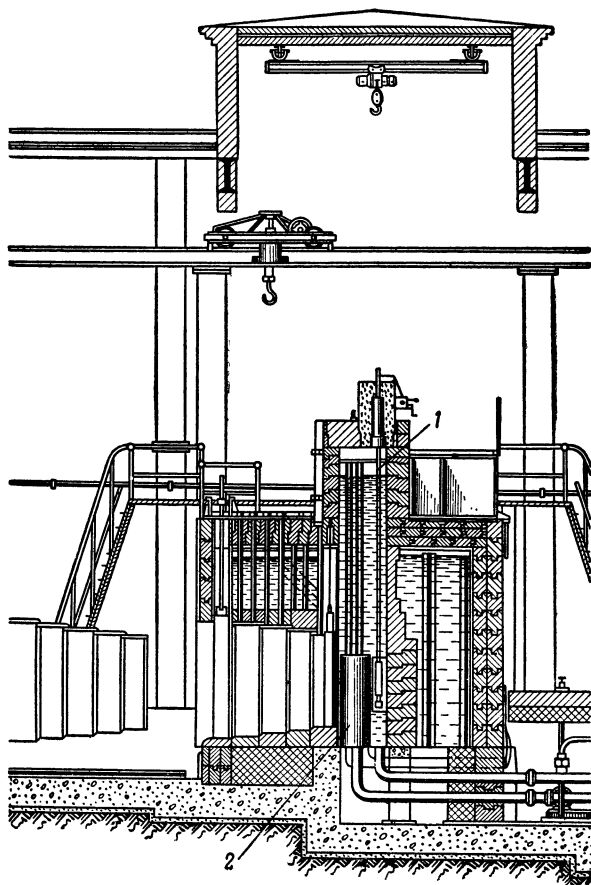


Рис. 32. Реактор на простой воде Академии наук СССР:

1 — алюминиевый бак с простой водой; 2 — активная зона реактора

уровне. Для защиты реактора в случае аварии используются три стержня из карбида и бора. Во время работы реактора стержни аварийной защиты подняты вверх и подвешены на электромагнитах. В случае каких-либо неполадок в работе реактора цепь питания электромагнитов прерывается, и стержни свободно падают в активную зону реактора. Время падения — около полсекунды. Система аварийной защиты автоматически срабатывает: при повышении уровня мощности на 20 процентов, при уменьшении скорости протекающей в реакторе воды, а также в тех случаях, когда оператор при запуске реактора неосторожен и слишком быстро повышает мощность реактора.

В реакторе имеется приспособление для безопасной выгрузки отработанных урановых стержней. Последние в свинцовом чехле переносятся в специальное хранилище.

Этот реактор был предназначен в основном для изучения прохождения нейтронов и гамма-лучей через материалы, применяемые для защиты от излучений, для производства радиоактивных препаратов и для других физических исследований.

Во время работы реактора в активной зоне возникает свечение, вызываемое движением частиц в воде (рис. 33). Свечение особенно интенсивно вокруг урановых стержней, так как в этой области имеются нейтроны с очень большой скоростью.

Опыт постройки и работы малого реактора на обыкновенной воде позволяет создать другой аппарат мощностью в две тысячи киловатт, который по своей принципиальной схеме почти не отличается от предыдущей малой установки.

Несомненный интерес представляет разработанная академиком А. И. Алихановым и другими схема кипящего гомогенного ядерного реактора для энергетических целей. Одна из схем подобного типа представлена на рис. 34. Сосуд *I* представляет собой ядерный реактор, состоящий из взвеси¹ чистого делящегося материала (урана²³⁵, урана²³³ или плутония²³⁹) в воде. При достижении критического объема в реакторе идет цепной про-

¹ Взвесь — смесь порошкообразного твердого вещества с какой-либо жидкостью или газом.

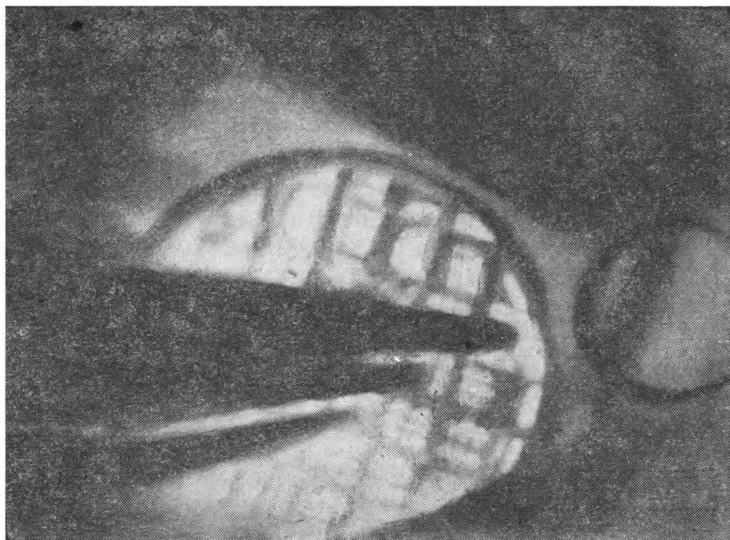


Рис. 33. Свечение активной зоны в реакторе. (Снято сверху через толстый слой воды)

цесс. Взвесь нагревается и кипит. Пар вместе с брызгами воды по подъемной трубе 2 поступает в разделительный сосуд 3. Здесь пар отделяется от воды и направляется в очистительное устройство 4. В очистительном устройстве водяной пар освобождается от примесей взвешенного в воде урана и твердых продуктов деления. Затем он поступает в инжектор 5 и в камеру, где происходит сжигание гремучего газа, образующегося в реакторе. Сжигание газа производится в паре. Вода из разделительного сосуда стекает обратно в реактор по опускной трубе 7. Циркуляция рабочей смеси происходит благодаря различной плотности двух веществ: смеси пара с водой в реакторе и в подъемной трубе 2 и жидкости в опускной трубе 7. Из камеры сжигания 6 пар поступает в теплообменник 8, где производится вторичный пар для паровой турбины. Для того чтобы производить более полное сжигание гремучего газа, инжектор 5 создает циркуляцию части пара через теплообменник и камеру сжигания. Конденсированный пар (вода) из теплообменника самоотеком через гидравлический затвор 9, очистительное и

разделительное устройство по трубе 7 возвращается обратно.

Пуск котла осуществляется путем постепенного введения концентрированной взвеси окиси урана (или другого расщепляющегося материала) в реактор, в котором циркулирует замедлитель. Для циркуляции замедлителя при начале работы реактора в схеме предусмотрен пусковой паровой котел 10 с электрическим нагревом. А. И. Алихановым и сотрудниками разработана также схема кипящего энергетического размножающего реактора (рис. 35).

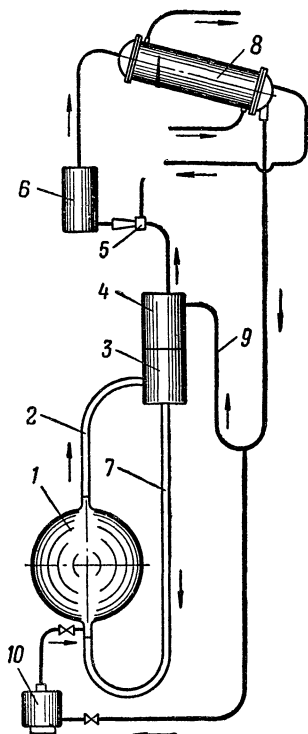


Рис. 34. Схема кипящего гомогенного реактора академика Алиханова:

1 — реактор; 2 — подъемная труба; 3 — разделитель; 4 — устройство для очистки газа; 5 — инжектор; 6 — камера сжигания; 7 — опуская труба; 8 — теплообменник; 9 — гидравлический затвор; 10 — пусковой котел

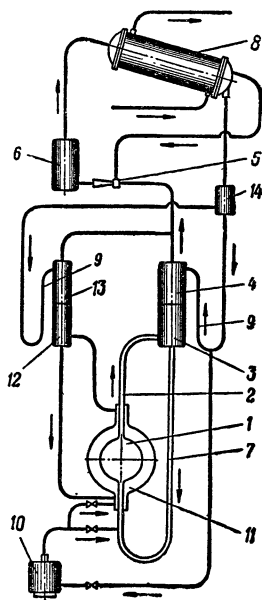


Рис. 35. Схема размножающего гомогенного реактора академика Алиханова:

1 — реактор; 2 — подъемная труба; 3 — разделитель; 4 — устройство для очистки газа; 5 — инжектор; 6 — камера сжигания; 7 — опуская труба; 8 — теплообменник; 9 — гидравлический затвор; 10 — пусковой котел; 11 — отражатель с торием²³²; 12 — отделитель; 13 — устройство для очистки газа; 14 — распределительный резервуар

Для воспроизводства горючего реактор *1* окружают отражателем *11*, заполненным кипящей взвесью окиси тория²³² (или урана²³⁸) в воде. Пар, образующийся в отражателе, отделяется от жидкости в отделителе *12*, в специальном устройстве *13* очищается от порошка окиси тория и затем присоединяется к основному пару центральной части реактора. Дальнейшая циркуляция пара такая же, как и в предыдущей установке. Конденсированный пар после теплообменника поступает в резервуар *14* и оттуда распределяется между центральной частью и отражателем реактора.

Расчеты показывают, что для таких аппаратов на одну тысячу киловатт установленной мощности (по вырабатываемой электроэнергии) потребуется совсем немного материала — от 300 до 700 граммов расщепляющегося вещества и 200—300 литров тяжелой воды. Для размножающего реактора этого типа потребуется еще около 160 килограммов тория. При большей мощности реактора относительный расход материалов значительно уменьшается.

Советские реакторы, о которых здесь шла речь, использовались исключительно для научных исследований.

Так, изучение структуры ядер и характера ядерных сил может быть проведено облучением различных веществ мощным потоком нейтронов, получаемых в реакторе. Характер взаимодействия ядер с нейтронами различных скоростей дает нам сведения об энергии связи частиц в ядре, то есть об его устойчивости. С помощью реактора проводятся исследования гамма-лучей, образующихся при поглощении нейтронов различными ядрами.

Мы уже говорили о том, что ядерные частицы, в том числе и нейтроны, при взаимодействии с атомами веществ ведут себя, как волны. Поэтому нейтронные излучения могут, подобно рентгеновским лучам, применяться для изучения структуры вещества. Эти так называемые нейтронографические исследования также производятся на мощных нейтронных пучках ядерных реакторов. На советских реакторах проводилось также облучение различных материалов с целью определения характера влияния различных излучений на свойства этих материалов. На

рис. 36 приведена фотография пластинки урана до и после облучения. Мы видим, что размеры пластинки после облучения значительно изменились. Она стала уже и длиннее, несколько изменилась и ее форма. При облучении меняется и микроструктура металлического урана.

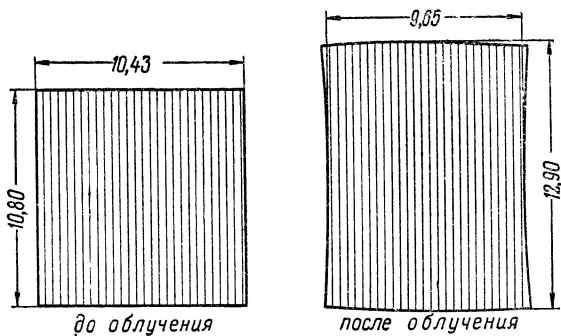


Рис. 36. Пластика урана до и после облучения в ядерном реакторе

Это видно на приведенной фотографии (рис. 37), сделанной с помощью электронного микроскопа при увеличении в 15 тысяч раз.

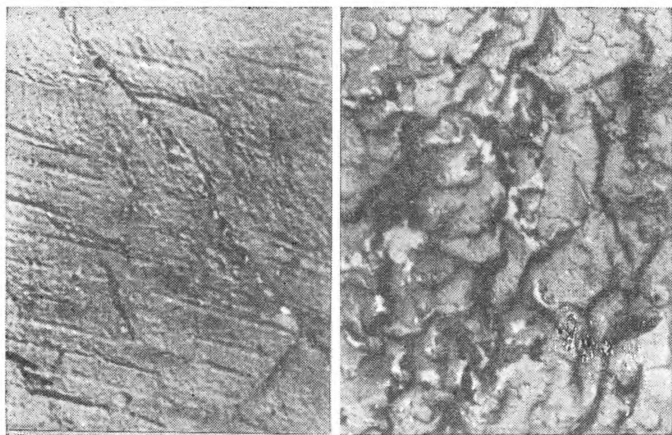


Рис. 37. Изменение микроструктуры облученного урана: слева — до облучения; справа — после облучения

С помощью ядерного реактора может быть проведено изучение влияния излучений на живые организмы. Наконец, необходимо указать на такое важное применение излучений ядерного реактора, как приготовление различных радиоактивных изотопов. Эти изотопы используются для различных отраслей науки, техники, сельского хозяйства и медицины.

Зарубежные ядерные реакторы. Из реакторов, построенных за рубежом, наибольшее число находится в Соединенных Штатах Америки. Мощные установки используются для получения плутония, идущего на изготовление атомного оружия, более малые — для исследовательских целей. Несомненный, правда исторический, интерес представляет первый ядерный реактор CP-1, поперечный разрез которого приведен на рис. 38. Реактор

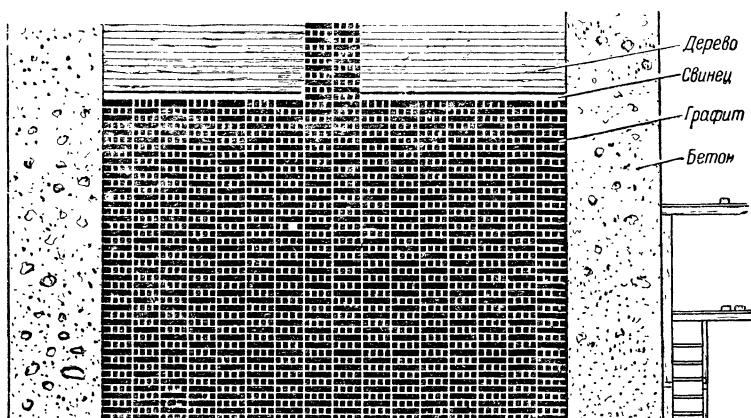


Рис. 38. Разрез американского реактора CP-1

представляет собой большой куб с основанием 9×9 метров и высотой 6 метров. Куб сложен из графитовых блоков квадратного сечения со стороной 104 миллиметра и длиной 415 миллиметров. Часть внутренних блоков имеет отверстия, в которые вставлены цилиндрические урановые блоки диаметром 56 миллиметров. Отражатель состоит также из графитовых брусков. Его толщина 300—400 миллиметров. Всего в реактор было заложено 6 тонн металлического природного урана, 40 тонн окиси урана и 385 тонн графита. Радиоактивные излучения по-

глощались полутораметровой бетонной стеной. Регулировка цепного процесса производилась пятью бронзовыми кадмированными стержнями. В реакторе CP-1 не был предусмотрен принудительный отвод тепла, поэтому его мощность не превышала 100—200 ватт. Общий вес реактора — 1400 тонн. Но дело, конечно, не в мощности первого американского реактора. На этом реакторе в 1942 году была осуществлена первая в мире цепная реакция.

Ядерный реактор был сооружен на теннисных кортах стадиона Чикагского университета и испытывался в присутствии выдающихся физиков К. Комптона, Э. Ферми и Э. Вигнера.

Сейчас мы считаем уже обычным то, что произошло в 1942 году на теннисном корте. По мере удаления из реактора регулирующих стержней счетчик отмечал увеличение числа нейтронов, производимых аппаратом. Количество нейтронов быстро возрастало. И наконец бешеный темп счетчика показал, что первая цепная реакция была искусственно осуществлена учеными. Это была крупная победа. Человек приступил к освоению атомной энергии.

Однако этот и последующие реакторы США не были применены для мирного использования атомной энергии. Исследования, проведенные на первом американском реакторе, позволили построить большие реакторы в Штате Колумбия (Хенфорд), где получается плутоний для изготовления атомного оружия.

Следует, пожалуй, остановиться еще на одном американском гетерогенном реакторе — реакторе типа «погруженный в воду» (рис. 39). Он был построен в штате Теннесси (Ок-Ридж) в 1951 году. Реактор состоит из бетонного бассейна, наполненного простой водой, размером $4,3 \times 5,5$ метра и глубиной 6,7 метра. Активная зона представляет собой решетку, заполненную 12—16 стержнями из обогащенного урана. Содержание урана²³⁵ достигает 50 процентов. В каждом стержне примерно 40 граммов урана²³⁵. Цепной процесс начинается, когда масса урана²³⁵ достигает 2,4 килограмма. В качестве отражателя применен слой окиси бериллия толщиной 10 сантиметров. Активная решетка со стержнями опускается в воду на глубину 5 метров. Как видно из описания, в качестве замедлителя применяется обычная вода, с помощью которой также отводится тепло, развиваемое

активной зоной. Мощность реактора 100 киловатт. Этот реактор применяется как источник нейтронов для физических исследований.

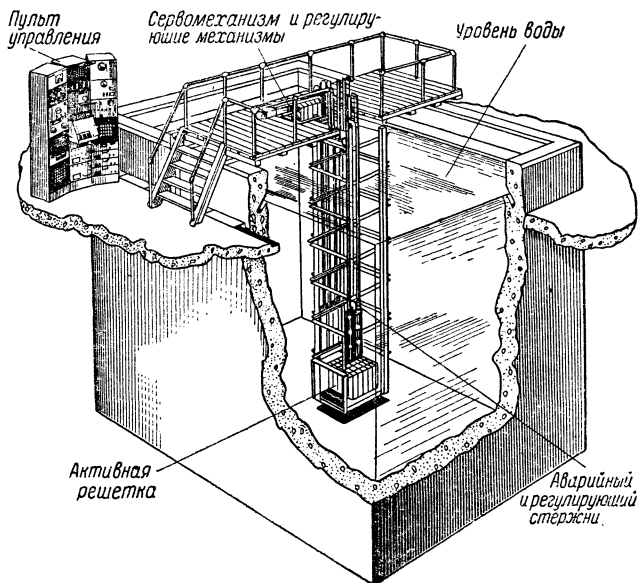


Рис. 39. Реактор типа «погруженный в воду»

На обычной воде и обогащенном уране работает также более мощный реактор STR (рис. 40), являющийся прототипом реактора, использованного впоследствии американцами на подводной лодке «Наутилус». Он был построен в штате Айдахо (Арко) в 1953 году прямо в модели корпуса подводной лодки. Подробных данных об этом реакторе нет. Известно только, что он гетерогенный и в нем используются медленные нейтроны. Полезная мощность реактора больше 12 тысяч киловатт, и для его охлаждения применяется поток воды в количестве 500 кубических метров в час.

В США построены также гомогенные реакторы типа «водяной кипятыльник». Один из таких реакторов (НУРО) приведен на рис. 41. Он предназначен для физических исследований, и его мощность не больше 6 киловатт. В сфере из нержавеющей стали помещен раствор урано-

вой соли на обычной воде. В растворе содержится 870 граммов урана²³⁵ и 5500 граммов урана²³⁸. Цепной процесс начинается при 810 граммах урана²³⁵. В качестве отражателя применяется окись бериллия и графит. Защита от излучения изготовлена из свинца и бетона. Регулировка осуществляется с помощью кадмиевых стержней.

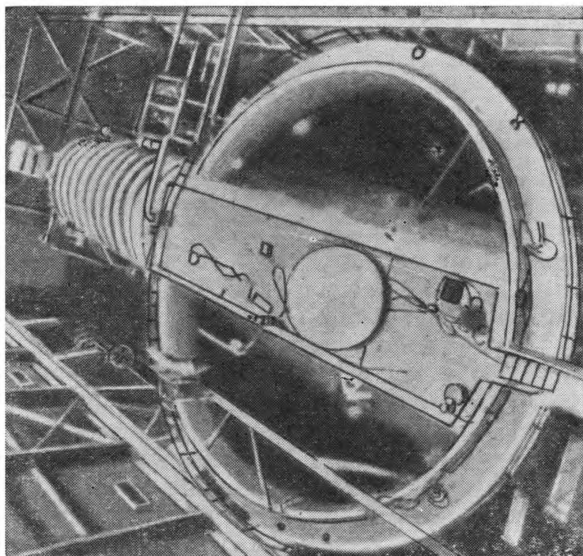


Рис. 40 Реактор STR

Несомненный интерес представляет собой американский реактор EBR — экспериментальный размножающий реактор. Он построен в штате Айдахо (Арко) на станции по испытанию реакторов. Общий вид реактора приведен на рис. 42. Реактор работает на быстрых нейтронах. Активная зона реактора имеет размер футбольного мяча и состоит из чистого урана²³⁵. Эта зона окружена толстым слоем естественного урана, который поглощает нейтроны, выходящие из активной зоны. Благодаря этому во внешнем слое образуется новое ядерное горючее — плутоний²³⁹. Отвод тепла осуществляется с помощью натриево-калиевого сплава. Жидкий сплав обтекает сначала

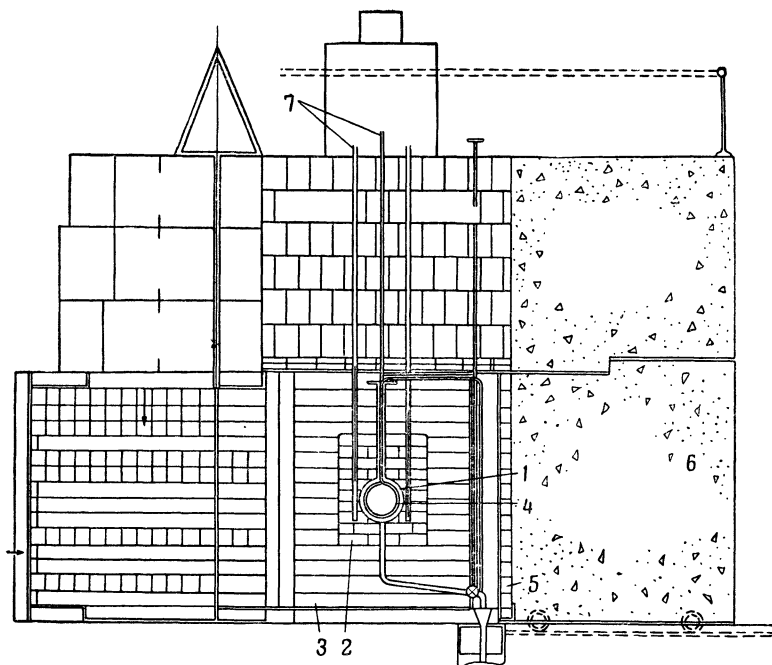


Рис. 41. Схема реактора *НРУ*:

1 — сфера из нержавеющей стали; 2 — отражатель из окиси бериллия; 3 — графитовый отражатель; 4 — охлаждающий змеевик; 5 — слой свинца 100 миллиметров; 6 — бетон 1,5 метра; 7 — регулирующие стержни

зону воспроизводства ядерного горючего из естественного урана, а затем попадает в центральную активную зону. Мощность реактора может быть доведена до 1400 киловатт.

Исследования, проведенные на этом реакторе, показали, что коэффициент воспроизводства на экспериментальном размножающем реакторе (EBR) еще недостаточно высок и приблизительно равен единице, то есть на каждое разделившееся ядро урана²³⁵ в среднем получается одно ядро плутония²³⁹. Опыты показали, что, если улучшить конструкцию зоны, заполненной естественным ураном, так, чтобы уменьшилась бесполезная утечка нейтронов, коэффициент воспроизводства может вырасти до 1,3. В этом случае размножающий реактор уже дает

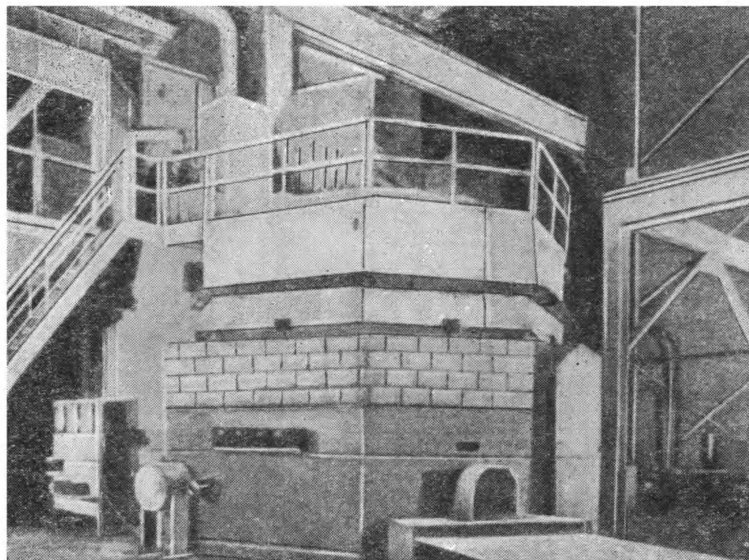


Рис. 42. Экспериментальный размножающий реактор EBR

возможность накапливать запасы ядерного горючего для работы других реакторов.

В Англии работают несколько реакторов, применяемых для получения радиоактивных изотопов и для физических исследований. По своей конструкции они мало отличаются от уже описанных выше.

Один из самых старых английских реакторов — реактор ВЕРО (рис. 43) пущен в Харуэлле в 1948 году. В нем используются тепловые нейтроны и в качестве замедлителя применяется графит. Реактор представляет собой графитовый куб со стороной 8,5 метра. Активная зона расположена в центральной части куба и выполнена в виде цилиндра диаметром и длиной 6 метров; 900 каналов активной зоны заполнены блоками из природного урана. Всего урана в реактор загружено около 40 тонн. Вес замедлителя (графита) составляет 850 тонн. Отвод тепла производится воздухом четырьмя компрессорами общей производительностью 5400 кубометров в минуту. Регулировка цепного процесса производится стальными тру-

бами, заполненными бором. Мощность реактора 4000 киловатт.

В 1956 году вступил в строй реактор типа «Дидо», предназначенный для проведения физических экспери-

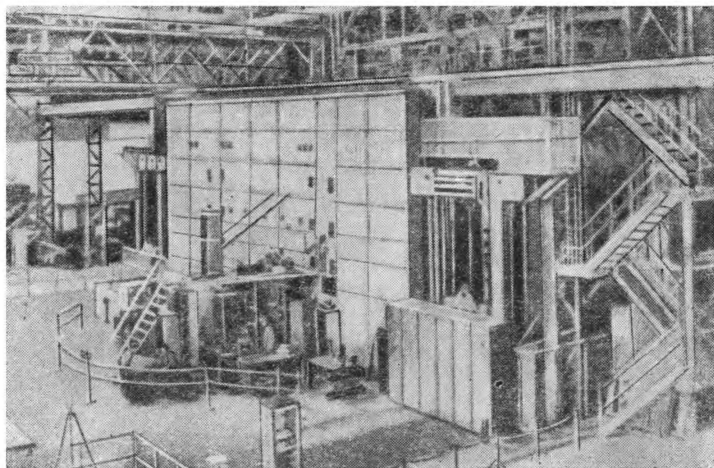


Рис. 43. Английский реактор ВЕРО

ментов (рис. 44). Замедлителем и теплоносителем в реакторе является тяжелая вода, горючим — обогащенный уран. Всего урана — около 6 килограммов, в котором содержится 2,5 килограмма урана²³⁵. Активная зона реактора имеет форму цилиндра высотой 60 и диаметром 86 сантиметров. Она собрана в виде решетки из пластинчатых элементов, заполненных сплавом урана с алюминием. Эта решетка расположена в центре алюминиевого бака высотой и диаметром 2 метра. Графитовый отражатель имеет толщину 60 сантиметров. Весь реактор помещен в стальной кожух, наполненный гелием. Мощность реактора 10 тысяч киловатт.

Один из французских реакторов — реактор, построенный Жолио-Кюри, будет описан ниже. В конце 1952 года во Франции (Сакле) был построен второй французский реактор Сирано (рис. 45). Реактор — гетерогенный, с замедлением на тяжелой воде. Активная зона представляет собой тонкостенный алюминиевый бак диаметром 2 и вы-

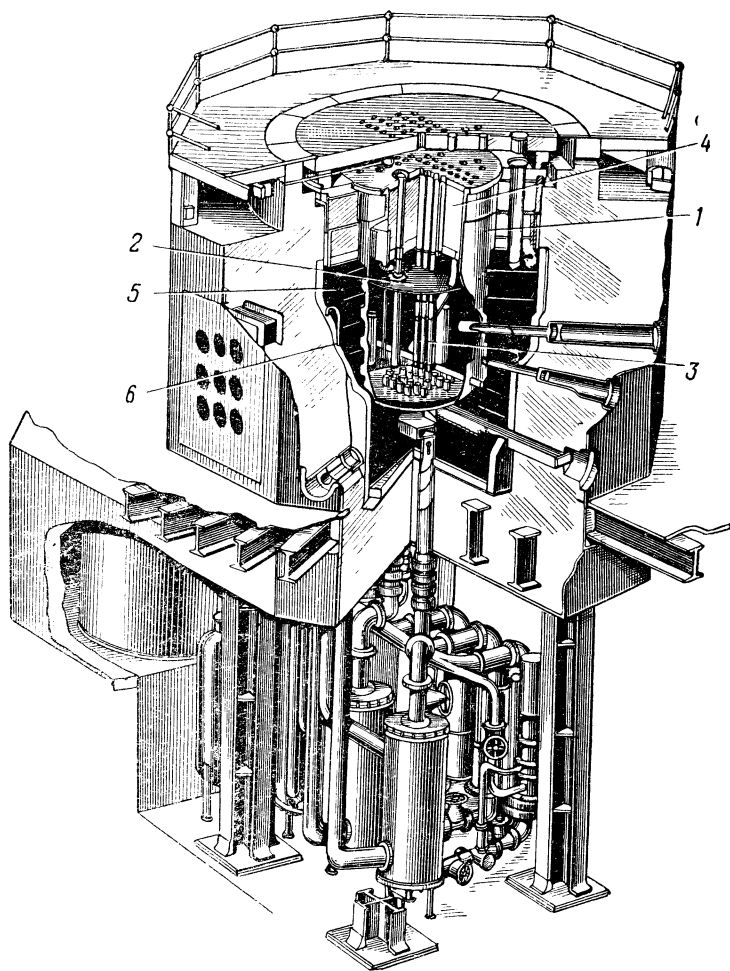


Рис. 44. Английский реактор типа «Дидо»:

1 — алюминиевый бак для тяжелой воды; 2 — уровень тяжелой воды; 3 — тепловыделяющий элемент; 4 — биологическая защита; 5 — графитовый отражатель; 6 — стальной сосуд реактора

сотой 2,5 метра. Внутри бака опущено 136 стержней из природного урана общим весом 3 тонны. В бак залито около 6 кубометров тяжелой воды. Графитовый отража-

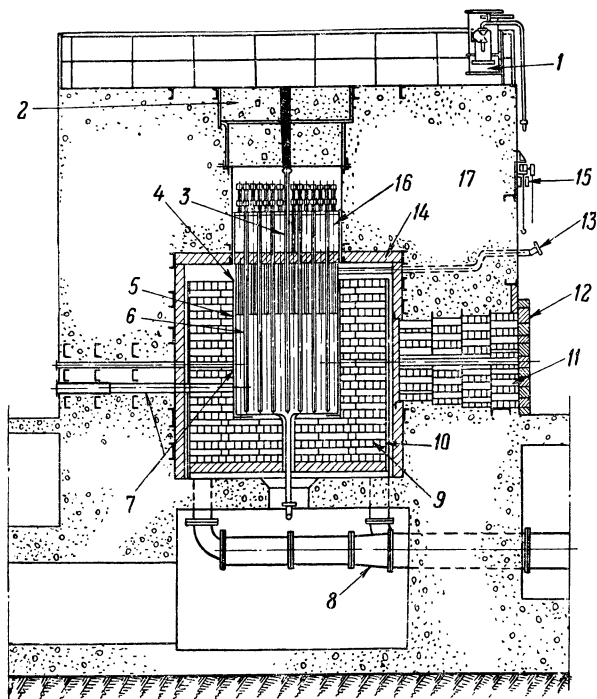


Рис. 45. Французский реактор Сирано:

1 — установка для рекомбинации тяжелой воды; 2 — съемные бетонные плиты; 3 — центральная труба; 4 — металлическая конструкция, поддерживающая бак; 5 — бак с тяжелой водой; 6 — стержни с топливом в охлаждающем канале; 7 — каналы для облучаемых образцов; 8 — вентиляционный трубопровод; 9 — графитовый отражатель; 10 — промежуточная защита; 11 — тепловая колонна для выпуска тепловых нейтронов; 12 — защита из металлических плит; 13 — предохранительный клапан; 14 — чугунная защита; 15 — блок; 16 — трубчатый блок для подвески топливных элементов; 17 — бетонная защита

тель имеет вес 100 тонн. Охлаждение производится азотом под давлением 10 атмосфер. Мощность реактора 1,5—2 тысячи киловатт.

Несколько реакторов, предназначенных для исследовательских целей, имеются также в ряде других стран.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Источники энергии. Энергетика в значительной степени определяет лицо века.

По характеру используемой энергии XIX век называют веком пара, а XX — веком электричества. Но энергия пара, которую мы затем превращаем в энергию движения, — это в конечном счете энергия каменного угля, нефти, газа, сгорающих в топке парового котла. Электрическая энергия — это опять-таки энергия пара или энергии падающей воды. Ни пар, ни электричество не являются новыми источниками энергии. И сейчас используется энергия горючих веществ, рек и ветра, то есть в конечном счете солнечная энергия.

В тяжелом труде обеспечивает человечество свою потребность в энергии. Так, например, в 1941 году было добыто больше 2,5 миллиарда тонн горючих ископаемых (табл. 2). А при использовании ядерного горючего для получения той же энергии было бы вполне достаточно одной тысячи тонн урана или тория.

Таблица 2

Мировое потребление энергии в 1941 году

Источник энергии	Энергия, млн. квт-ч	Добыча, млн. т
Уголь	17 500 000	2000
Нефть	4 400 000	460
Естественный газ	1 000 000	120
Гидроэлектростанции	420 000	—
Итого	23 320 000	2580

Запасы урана и тория на земле не так уж малы. Эти элементы содержатся в различных горных породах и минералах. Крупные месторождения богатых ураном руд находятся в Бельгийском Конго, в Канаде (Медвежье озеро) и других местах. Много урановых руд содержат недра Советского Союза и стран народной демократии. Сейчас уран и торий добываются только из сравнительно

богатых руд, с содержанием урана или тория от 100 граммов до 100 килограммов на тонну породы. Это — урановые и ториевые руды, монациты, карнаатиты и горючие сланцы.

Если учесть мировые запасы урана и тория только в этих сравнительно богатых рудах и заменить во всех энергетических установках химическое горючее на ядерное, то даже при быстрорастущей потребности в энергии ядерного горючего хватит на несколько тысяч лет. Но, безусловно, недалеко то время, когда будет разработана технология обогащения таких бедных ураном и торием пород, как гематит, гранит, различные базальты, пески и известняки. Даже в морской воде есть уран. Правда, его содержание там ничтожно, всего около миллиграмма на один кубометр воды. Однако в будущем, если не будут открыты другие виды ядерного горючего, по всей вероятности, найдут способы извлечения урана и из морской воды.

Запасы обычных горючих ископаемых не очень велики. Эти вещества, представляющие собой остатки древнего растительного мира, в которых в течение миллионов лет накапливалась солнечная энергия, практически не возобновляются. Если не будут найдены какие-нибудь новые, очень богатые месторождения, то запасов угля и нефти, по всей вероятности, хватит не больше чем на двести — триста лет.

Овладев атомной энергией, человечество получило совершенно новый богатейший источник энергии.

Большие трудности на великом пути. Основная энергия, получающаяся при делении ядер, — это энергия движения очень быстрых «осколков» и нейтронов. Температура вещества определяется скоростью движения молекул и атомов: чем больше скорость, тем выше температура. Подсчет показывает, что «осколки» ядер при делении разлетаются со скоростями, соответствующими температуре в несколько миллиардов градусов. Поэтому как будто бы нет особого предела для достижения сверхвысоких температур в процессе деления урана.

Однако очень высокая температура, порядка нескольких миллионов градусов, может быть получена только при атомном взрыве, когда очень большое число ядер урана делится за весьма короткий промежуток времени. При управляемом процессе такой температуры получить

нельзя. Она ограничивается прежде всего теплотойкостью материалов, из которых построен ядерный реактор. Кроме того, мы уже знаем, что реактивность установки с повышением температуры обычно падает. Поэтому в ядерном реакторе на природном уране, где запас реактивности мал, нельзя получить высоких температур. При некоторой, сравнительно небольшой температуре коэффициент размножения становится равным единице и мощность реактора не достигает желаемой величины. Использование же тепловой энергии при низких температурах невыгодно: коэффициент полезного действия паросиловой установки при этом очень мал.

Для увеличения коэффициента полезного действия атомной установки, по-видимому, наиболее целесообразным является использование ядерных реакторов на обогащенном уране с большим содержанием легкого изотопа или искусственного ядерного горючего — урана²³³ или плутония²³⁹. В таких реакторах коэффициент размножения достаточно велик и предельная температура практически зависит только от жаропрочности материалов, из которых изготовлен реактор.

Казалось бы, что, поскольку в ядерном реакторе могут быть получены высокие температуры, создание паротурбинного атомного двигателя является несложным делом. В самом деле, если в обычной теплосиловой энергетической установке используется химическая энергия горючих материалов, которые сгорают в топке парового котла, то здесь роль топки играет ядерный реактор, в котором выделяется атомная энергия при делении урана. Все остальные агрегаты — паровой котел, турбина — могут оставаться прежними.

Можно, конечно, как мы это делали в предыдущих главах, провести некоторую аналогию между горением и цепным процессом в уране. Однако ядерное топливо все же существенно отличается от химического.

В обычной паросиловой установке время от времени из топки котла необходимо удалять золу. Нечто вроде этого надо делать и при цепном процессе. «Золой» при делении урана являются два «осколка», на которые расщепляется ядро урана²³⁵. Но удаление их — несравненно более сложная операция, чем удаление золы сгоревшего угля: ведь «осколки» обладают большой радиоактивностью. Выгребать же радиоактивные вещества так, как мы выгребать

баем золу из топки, нельзя. Кроме того, «зола» цепного процесса скапливается внутри урановых блоков, и выбрасывать эти блоки нельзя, так как они содержат очень много весьма ценных материалов: почти весь уран²³⁸, идущий на изготовление искусственного ядерного горючего, значительное количество урана²³⁵, а также получающийся в ядерных превращениях плутоний²³⁹. Все эти материалы, после того как они будут химическим путем очищены от «осколков», снова могут быть использованы в работе реакторов.

Радиоактивность продуктов ядерного реактора вызывает необходимость в разработке весьма сложных механизмов для транспортировки и переработки использованных урановых блоков. Люди должны управлять этими операциями на больших расстояниях.

Наконец, цепной процесс предъявляет особые требования к материалам, применяемым в ядерном реакторе.

Мы видели, что поглощение нейтронов в реакторе затрудняет получение атомной энергии и искусственного горючего. В реакторе, работающем на природном уране, большая потеря нейтронов приводит к прекращению цепного процесса. Особенно вредно поглощение нейтронов в размножающем реакторе. Каждый потерянный там нейтрон означает потерю ядра плутония²³⁹ или урана²³³.

Поглощение нейтронов ядрами веществ приводит к образованию изотопа того же элемента. Если этот изотоп радиоактивен, то он постепенно переходит в другой элемент. При этом может измениться объем вещества. В результате меняется прочность материалов, разрушаются металлические оболочки конструкций и стенки труб. Поэтому материалы, используемые в различных конструкциях ядерных реакторов, должны как можно меньше поглощать нейтроны.

Кроме того, эти материалы должны быть стойкими и в отношении интенсивного радиоактивного облучения. Многие вещества при радиоактивном облучении разрушаются, активнее вступают в различные химические реакции, усиливается коррозия их поверхности. В последнее время ученые исследовали и начали использовать в реакторах мало применявшиеся до сих пор редкие металлы, такие, например, как цирконий. Оказалось, что очень чистый цирконий слабо поглощает нейтроны и почти не изменяет своих химических свойств при интен-

сивном радиоактивном облучении. По-видимому, этот тугоплавкий металл в ближайшее время найдет себе широкое применение при строительстве ядерных реакторов для атомных двигателей.

При использовании атомной энергии надо тепло, выделяемое реактором, передать энергетической установке. Для отвода тепла обычно применяют жидкие или газообразные вещества — теплоносители, которые пропускаются по трубам, проходящим через тело ядерного реактора. Охлаждая реактор, теплоноситель нагревается и передает тепло потребителю, которым может быть паровой котел или отопительная сеть.

К теплоносителям, применяемым в ядерной энергетике, также предъявляются особые требования. Они должны слабо поглощать нейтроны, то есть практически не изменять реактивности реактора. В противном случае произойдет значительное и иногда невосстановимое уменьшение коэффициента размножения, и цепной процесс будет невозможно осуществить. Кроме того, поглощая нейтроны, такой теплоноситель будет обладать большой радиоактивностью, а радиоактивность теплоносителя потребует дополнительных мер для того, чтобы обезопасить обслуживающий персонал от излучения трубопроводов, по которым протекает теплоноситель.

Таким образом, прежде чем удалось достаточно эффективно использовать энергию ядерного реактора ученым и инженерам пришлось преодолеть ряд больших трудностей, произвести многочисленные исследования, проявить выдумку и изобретательность.

Химики затратили много труда на разработку методов эффективного отделения «осколков», плутония и чистого урана²³⁸ из отработанных урановых блоков.

Высокая радиоактивность отработанных блоков и «осколков» не допускает непосредственного участия людей в этих операциях. Поэтому механики, электротехники и радиотехники построили систему управления на расстоянии процессом химической и металлургической обработки продуктов ядерного реактора.

Такая же автоматизация была предусмотрена для замены вышедших из строя деталей работающего ядерного реактора. Нужно помнить, что как только реактор вступил в строй, его центральная часть становится весьма радиоактивной. Присутствие людей возле центральной

части даже остановленного реактора при капитальном и предупредительном ремонте совершенно недопустимо.

Физики и радиоинженеры разработали такую систему управления ядерным реактором, которая гарантирует полную безопасность и совершенно исключает возможность выхода цепной реакции из управления. Заданная мощность реактора поддерживается автоматически.

Технологи и металлурги нашли материалы, которые слабо поглощают нейтроны. В этих материалах ядерные реакции с нейтронами не приводят к значительным нарушениям прочности конструкций и к необходимости частой замены деталей. Кроме того, слабое поглощение нейтронов не уменьшает заметно реактивности ядерного реактора, изготовленного из таких материалов.

Эти материалы являются также стойкими в отношении действия радиоактивных излучений. Специальные покрытия предохраняют поверхность конструкций от коррозии.

Энергетиками и физиками были найдены теплоносители, которые не только хорошо отводят тепло, но и обладают малой активностью в отношении реакций с нейтронами. Сравнительно слабая радиоактивность таких теплоносителей облегчает их использование в тепловой схеме.

Физиками были разработаны и исследованы различные защитные средства, предохраняющие обслуживающий персонал от биологически вредных излучений.

Эти и многие другие очень трудные задачи были решены советскими учеными и инженерами, прежде чем первая в мире советская атомная электростанция дала промышленный ток.

Ядерное топливо. Атомная энергетика ближайшего будущего в качестве ядерного горючего будет использовать не только уран²³⁵, но и весь природный уран и торий. Размножающий реактор будет давать не только атомную энергию для вращения генераторов электростанции, но и вырабатывать определенное количество искусственного ядерного горючего.

Однако читатель уже знает, что для работы такого реактора необходим либо чистый уран²³⁵, либо уран, обогащенный легким изотопом.

Существующие методы разделения изотопов или обогащения урана очень сложны и дороги. Но, оказывается,

можно в энергетической схеме использовать природный уран и торий.

Мы можем всегда накопить первоначально некоторое количество плутония в реакторе на природном уране, использующем медленные нейтроны. Вряд ли в таком реакторе можно эффективно получать атомную энергию, так как он при высоких температурах работает неустойчиво. Однако в результате работы такого реактора в нем получается достаточное количество плутония, из которого может быть затем изготовлена центральная часть размножающего реактора.

Такая вполне возможная схема использования природного ядерного горючего в энергетической установке представлена на рис. 46. Урановая руда из рудника направляется на обогатительную фабрику, где урановые соединения (минералы) отделяются от пустой породы. Из минералов на химическом заводе получается чистый металлический уран, из которого на металлургическом заводе отливаются урановые блоки.

Металлический уран легко окисляется на воздухе, поэтому урановые блоки на том же заводе заделываются в тонкую оболочку из алюминиевого сплава.

В таком виде блоки природного урана поступают в урановый котел, работающий на медленных нейтронах, и участвуют в ядерных реакциях по накоплению плутония. Отработанные урановые блоки, содержащие плутоний и «осколки», подвергаются химической и металлургической обработке на заводе. Здесь от них отделяются «осколки» и плутоний. Плутоний затем направляется или в центральную часть размножающего реактора, работающего на быстрых нейтронах, или на склады; «осколки» идут на завод по изготовлению радиоактивных препаратов. Остальной материал, который состоит в основном из урана²³⁸, используется во внешней части размножающего реактора, где снова образуется плутоний²³⁹.

Атомное горючее центральной части размножающего реактора время от времени требует замены, так как плутоний «выгорает» и в нем накапливаются «осколки». Отработанный плутоний отправляют на обрабатывающие химические и металлургические заводы, где он подвергается очистке от «осколков». После очистки он снова возвращается обратно в размножающий реактор, а «осколки» используются для изготовления радиоактивных препара-

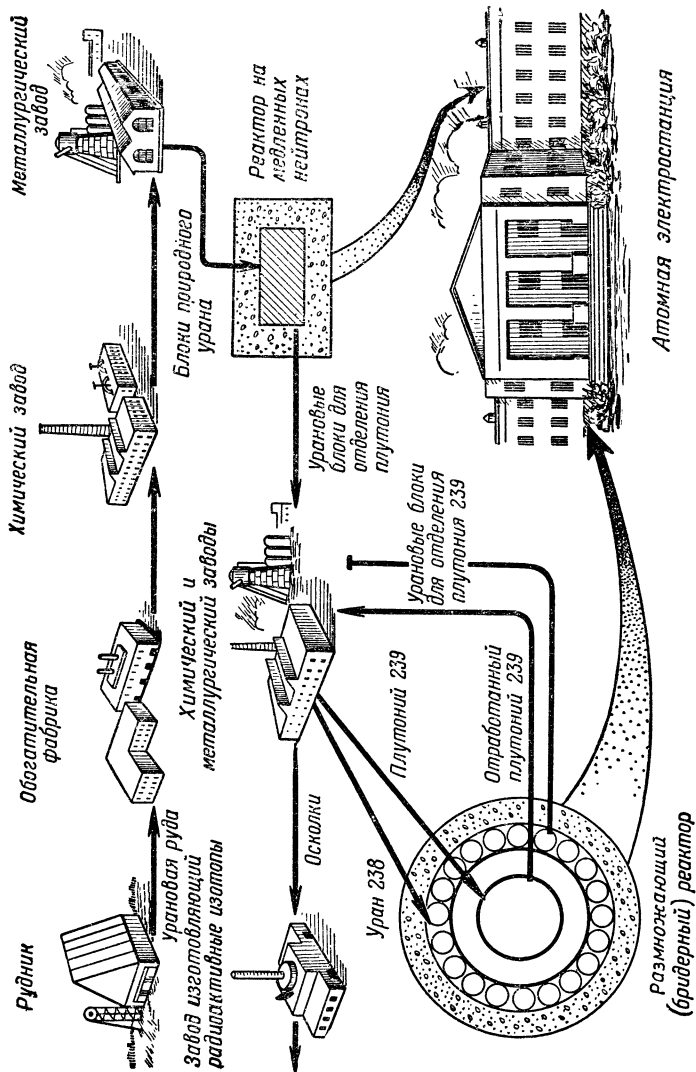


Рис. 46. Схема использования природного ядерного горючего в энергетической установке

гов. Нейтроны, выходящие из центральной части реактора, поглощаются в наружной оболочке, где образуют плутоний. Время от времени блоки с ураном²³⁸ вынимают из оболочки и направляют на обработку. Выделенный из них плутоний тоже идет в центральную часть размножающего реактора, а урановые блоки возвращаются обратно в наружную оболочку. Так сгоревший плутоний полностью восполняется. В урановых блоках внешней части реактора также образуются «осколки» ядер, так как имеющийся там уран делится под действием быстрых нейтронов, вылетающих из центральной части размножающего реактора.

После того как урановый котел на медленных нейтронах произвел достаточное для размножающего реактора количество плутония, его работа больше не нужна. В дальнейшем размножающий реактор может не только обеспечить себя необходимым количеством плутония, но и создать некоторый запас искусственного ядерного горючего. Этот запас может быть использован для пускового периода других энергетических установок.

Если рассматривать строительство атомных электростанций в большом государственном масштабе, то, по всей вероятности, целесообразнее создать производство плутония в больших реакторах на природном уране. Нескольких лет работы таких реакторов достаточно, чтобы затем можно было произвести одновременный запуск большого числа размножающих реакторов крупных энергетических установок.

Примерно по той же схеме работает атомная станция, использующая торий. При использовании тория химическая обработка блоков должна заключаться в отделении урана²³³ от тория.

В таких схемах предусмотрено полное использование природного урана или тория. Тепло размножающего реактора превращается в электрическую энергию на атомной электростанции. Некоторое количество накапливающегося плутония²³⁹ или урана²³³ идет на запуск других энергетических установок. Наконец, «осколки», вес которых примерно равен весу разделившегося урана²³³ или плутония²³⁹, могут быть использованы как радиоактивные препараты в различных отраслях народного хозяйства.

Отвод тепла от ядерного реактора. В работающем реакторе большая часть атомной энергии превращается

в теплоту и нагревает тело реактора. Для охлаждения его, для отвода получившегося тепла от реактора и использования тепла в промышленных условиях используются жидкие или газообразные вещества — теплоносители.

Проще всего, казалось бы, использовать в качестве охлаждающей жидкости расплавленный уран, плутоний или жидкий замедлитель. Но для достаточно эффективного отвода тепла нужны большие количества теплоносителя. Это обстоятельство, а также высокая радиоактивность ядерного горючего во время цепного процесса затрудняют использование таких охлаждающих веществ в реакторе. Поэтому сейчас в большинстве случаев применяют «нейтральные» теплоносители, которые, нагреваясь, не принимают непосредственного участия в самом процессе получения энергии.

Таким теплоносителем может быть, например, простая вода в урано-графитовом реакторе на медленных нейтронах, где применяется природный уран. На рис. 47 приведен разрез небольшого участка рабочей части такого реактора. Урановые блоки помещаются в алюминиевой трубке, которая вставляется в цилиндрическое отверстие графитового блока прямоугольной формы. Вода поступает в зазор между алюминиевой оболочкой уранового блока и стенкой трубки. Так как вода сильно поглощает нейтроны, то для того чтобы избежать большой потери нейтронов, заставляют воду проходить через тонкие зазоры с очень большой скоростью. Недостатком такой системы является то, что нельзя получить температуру теплоносителя выше 100 градусов. При более высоких температурах усиленное парообразование приводит к разрывам потока воды и, следовательно, к сильным местным перегревам.

Очевидно, что при температуре 100 градусов практи-

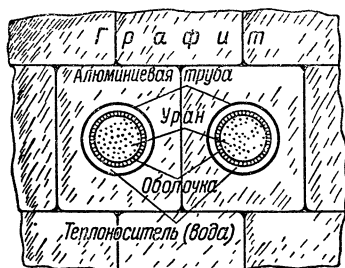


Рис. 47. Разрез участка рабочей части урано-графитового реактора. В зазоре между стенкой трубы и алюминиевой оболочкой уранового блока протекает вода, отбирающая тепло от ядерного реактора

чески нельзя получить атомную энергию для промышленных целей. Поэтому такой теплоноситель может быть применен только в первичных реакторах, где природный уран используется для получения искусственного ядерного горючего — плутония²³⁹ и радиоактивных изотопов. Положение могло бы измениться, если бы заставить воду проходить в реакторе под большим давлением. Как известно, под большим давлением вода кипит при более высокой температуре, но тогда стенки труб надо делать более прочными и толстыми, а это приведет к поглощению ими большого количества нейтронов. При использовании природного урана такая потеря нейтронов исключает осуществление цепного процесса.

Как мы уже видели на примере реактора РФТ при работе с обогащенным ураном, вода может быть использована в качестве теплоносителя более эффективно. В этом случае слой охлаждающей воды может быть значительно толще. Потеря нейтронов в воде не имеет здесь решающего значения. Вода является здесь также и замедлителем нейтронов. При конструировании таких реакторов это учитывается, и количество другого замедлителя, например графита, в этих реакторах берется меньше обычного.

Необходимо учесть, что вода, проходя через ядерный реактор, вследствие захвата нейтронов кислородом и различными примесями становится радиоактивной. Перед спуском ее в водную систему она должна три — четыре недели находиться в отстойнике. За это время ее радиоактивность становится ничтожно малой.

Для того чтобы уменьшить поглощение нейтронов и избежать засорения охлаждающих каналов, обычно используют дистиллированную воду.

Очень выгодно применять в качестве теплоносителя некоторые расплавленные металлы (рис. 48), слабо поглощающие нейтроны. Для тепловых нейтронов таким металлом является висмут. Расплавленный металл можно перекачивать в трубах через зазоры между урановыми блоками и алюминиевыми трубами, как воду. Поскольку поглощение нейтронов в висмуте в сотни раз меньше, чем в воде, зазоры могут быть значительно шире. Такой теплоноситель позволяет получать температуру порядка 500—600 градусов, что дает возможность

построить энергетическую установку с большим коэффициентом полезного действия.

Нейтральный, не участвующий в цепном процессе теплоноситель может быть использован также для отвода тепла из центральной части размножающего реактора. Расплавленный металл попадает в теплообменник, на-

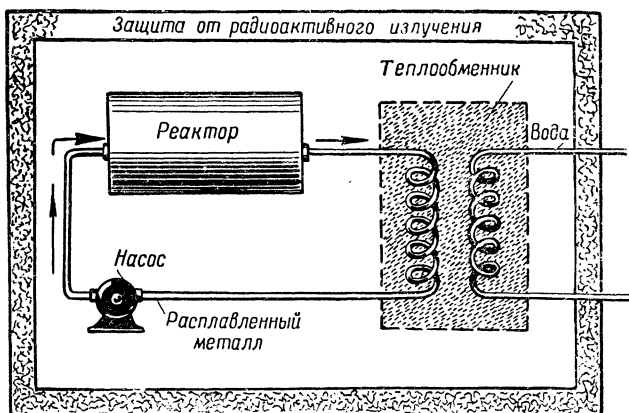


Рис. 48. Отвод тепла от ядерного реактора с помощью расплавленного металла. Урановые блоки омываются расплавленными металлами, которые отбирают энергию от реактора и передают ее вторичному теплоносителю (воде) в теплообменнике

пример в паровой котел, где отдает свое тепло вторичному теплоносителю (воде). Вторичный теплоноситель уже не обладает радиоактивностью.

Для отвода тепла от реактора могут применяться свинец, висмут, натрий и калий.

В качестве теплоносителя может быть использован и замедлитель, как это сделано, например, в описанном раньше советском ядерном реакторе на тяжелой воде.

В ядерном реакторе Зоé, построенном известным французским физиком Фредериком Жолио-Кюри (рис. 49), охлаждение урановых стержней тоже производится тяжелой водой, которая служит одновременно и замедлителем. Тяжелая вода перекачивается с помощью насоса через алюминиевый бак, в который опущены урановые металлические стержни. Омывая урановые стержни,

она отбирает от них тепло, нагревается и попадает в теплообменник, где охлаждается простой водой.

Очень эффективно может быть использована тяжелая вода в качестве теплоносителя в гомогенных реакторах типа «водяной котел». Такой ядерный реактор (рис. 50) представляет собой котел, заполненный раствором урановых солей в тяжелой воде. Когда коэффициент размножения нейтронов достигнет значений несколько выше единицы, в котле развивается цепной процесс, скорость которого регулируется кадмиевым стержнем. Почти вся выделяемая мощность здесь расходуется на нагревание воды. Это по существу паровой котел, непосредственно использующий атомную энергию. Температура тяжелой воды, а следовательно, и давление паров в таком котле определяются прочностью бака и трубопроводов. Пар, получающийся в таком ядерном реакторе, обладает большой радиоактивностью, но, применяя защиту и антикоррозийные покрытия, его можно использовать в паровой турбине. Проще, однако, получить вторичный пар в специальном теплообменнике: этот вторичный пар уже не радиоактивен. Ядерные реакторы с тяжелой водой обладают очень большим отрицательным температурным коэффициентом. Это значит, что при увеличении температуры реактивности реактора или коэффициент размножения нейтронов падает. Очень часто температура реактора с тяжелой водой и природным ураном не может подняться выше 90—120 градусов. Такой котел совершенно безопасен в эксплуатации, но не имеет промышленного значения, так как его пар обладает слишком малым давлением.

Очевидно, что для промышленного использования «водяные котлы» надо строить с обогащенным ураном.

Как уже говорилось, можно изготовить совсем маленький реактор — «водяной кипятильник», применяя обогащенное ядерное горючее и простую воду. Сейчас существуют ядерные реакторы, состоящие из 800—900 граммов урана²³⁵ (в виде урановой соли) и 12—15 литров простой воды. В них простая вода является и замедлителем и теплоносителем. Потеря тепловых нейтронов при их поглощении водородом воды восполняется высокой реактивностью системы, работающей на почти чистом расщепляющемся материале — уране²³⁵. Такой маленький

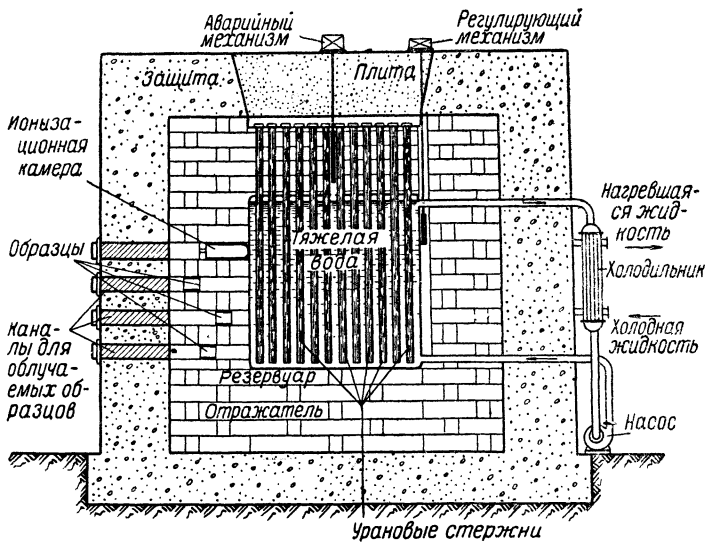


Рис. 49. Ядерный реактор Жолио-Кюри

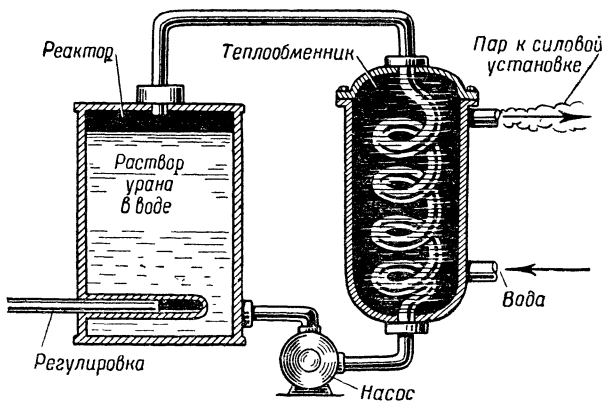


Рис. 50. Схема работы ядерного реактора типа «водяной котел». Это по существу паровой котел, непосредственно использующий атомную энергию

реактор может дать достаточную мощность для вращения небольшой турбины.

Пожалуй, наиболее перспективным является использование в качестве теплоносителя жидкого ядерного горючего. Применение, например, жидкой смеси урана²³⁵ с каким-либо другим веществом (разбавителем) устраняет ряд трудностей, возникающих при работе ядерного реактора. Так как энергия деления урана переходит в тепло во всей массе ядерного горючего, то устраняются потери, которые сопровождают передачу тепла постороннему теплоносителю. Горючая смесь, проходя по трубам теплообменника (парового котла), отдает это тепло вторичному теплоносителю, например воде или пару.

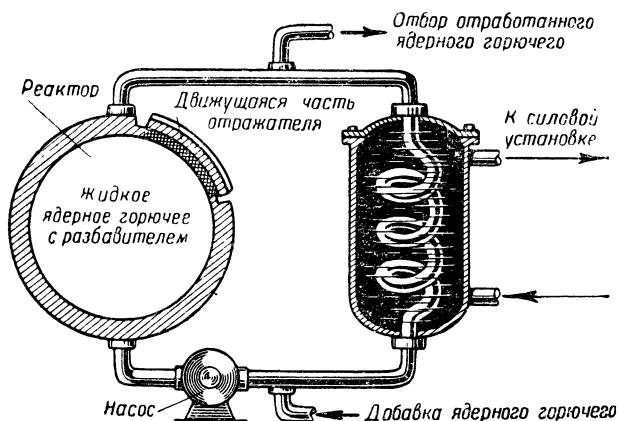


Рис. 51. Схема гомогенного ядерного реактора с жидким ядерным горючим. Жидкая горючая смесь циркулирует между реактором и теплообменником (паровым котлом). Цепной процесс идет только в шаровой камере, где горючая смесь разогревается до высокой температуры. В таком реакторе чрезвычайно облегчается непрерывная замена части ядерного горючего

Цепной процесс может осуществляться только в шаровой камере, так как только в ней ядерное горючее имеет вес, близкий к критическому (рис. 51). Для того чтобы довести коэффициент размножения до значений, превышающих единицу, надо уменьшить выход нейтронов через шаровую поверхность. Поэтому активную зону

реактора окружают слоем отражателя нейтронов. Регулировку мощности реактора можно производить, уменьшая или увеличивая выход нейтронов из шаровой камеры передвижением некоторой части отражателя нейтронов. Тем самым мы будем изменять коэффициент размножения.

Применение в качестве теплоносителя жидкой горячей смеси чрезвычайно облегчает ее замену и удаление из нее продуктов деления во время работы реактора. Можно время от времени часть ядерного горючего отбирать и направлять на обрабатывающие химические и металлургические заводы для отделения от него «осколков». Очищенное ядерное горючее с добавлением некоторого количества свежей смеси в расплавленном состоянии опять направляют в работающий ядерный реактор.

Как было указано, управление цепным процессом может производиться только за счет запаздывающих нейтронов, которые вылетают из «осколков» ядер через 60—80 секунд после деления. Если применять в качестве теплоносителя циркулирующее ядерное горючее, то часть запаздывающих нейтронов будет выделяться уже вне рабочего объема реактора; доля запаздывающих нейтронов, участвующих в цепном процессе, таким образом, уменьшается, а это затрудняет управление ядерным реактором. Однако если объем труб, насосов и теплообменника мал по сравнению с шаровой камерой, то доля запаздывающих нейтронов, выбрасываемых «осколками» вне активной зоны реактора, будет также невелика.

Запаздывающие нейтроны, выделяющиеся в теплообменнике, производят ядерные реакции, а следовательно, вызывают радиоактивность уже вторичного теплоносителя. Большая интенсивность радиоактивных излучений вторичного теплоносителя может иногда вызвать необходимость установки второго теплообменника. Теплоноситель, нагревающийся во втором теплообменнике, уже не будет радиоактивным.

Подобным же образом может быть построен гетерогенный ядерный реактор на медленных нейтронах (рис. 52). Ядерное горючее, которым является природный или обогащенный легким изотопом уран, в расплавленном виде пропускают через каналы твердого замедлителя. Тем самым в активной зоне реактора создаются условия, необходимые для осуществления цепного процесса.

Управление процессом производится с помощью тугоплавких стальных стержней, содержащих бор и жадно поглощающих медленные нейтроны.

Жидкая горючая смесь, содержащая радиоактивные «осколки» деления, требует дополнительных мер защиты обслуживающего персонала от излучений. Окружать защитным слоем в этом случае надо не только сам ядерный реактор, но также трубопроводы с теплоносителем, насосы и первичные теплообменники.

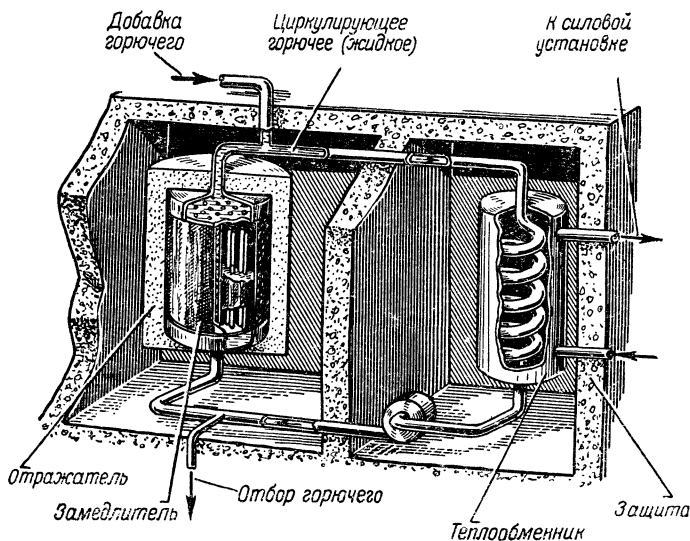


Рис. 52. Схема гетерогенного ядерного реактора на жидком ядерном горючем. Ядерное горючее в расплавленном виде проходит через каналы твердого замедлителя (графит). Здесь создаются условия для возникновения цепного процесса, и горючая смесь разогревается до высокой температуры

В качестве теплоносителя могут быть использованы и газы. Проходя через реактор, они нагреваются и, имея большие давления, могут приводить во вращение турбины или осуществлять реактивное движение. Горячие газы можно пропускать через трубы парового котла и образующийся там пар высокого давления направлять на лопатки паровой турбины.

Тепловая энергия ядерного реактора с газовым теплоносителем может быть применена для отопления зданий.

Таким образом частично был использован уже упомянутый в предыдущей главе английский реактор ВЕРО.

Этот реактор имеет мощность 4 тысячи киловатт и используется как мощный источник нейтронов для физических исследований и производства радиоактивных изотопов. Замедлителем в нем служат 850 тонн графита, а ядерным горючим — 40 тонн природного урана. Общий вид этого реактора и схема использования его тепла для отопления зданий приведены на рис. 53.

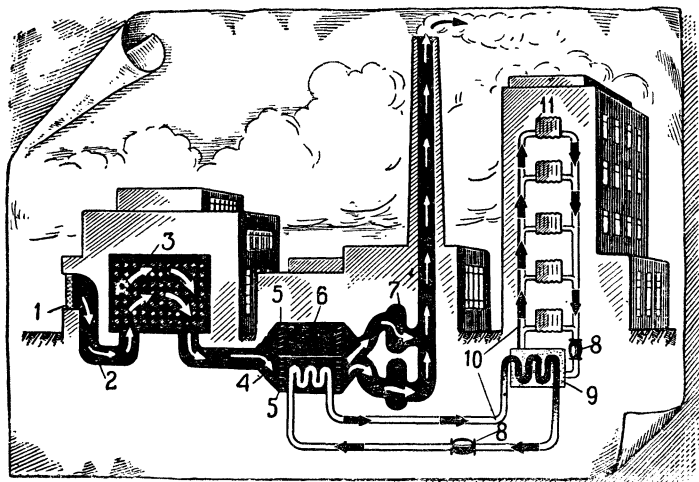


Рис. 53. Схема использования тепла ядерного реактора для отопления зданий:

1 — воздушный фильтр; 2 — холодный воздух; 3 — реактор; 4 — горячий воздух; 5 — заслонки первого теплообменника; 6 — первый теплообменник; 7 — насосы; 8 — вентиль; 9 — второй теплообменник; 10 — схема отопления здания; 11 — радиаторы

Для охлаждения реактора 3 через каналы, пронизывающие графитовый замедлитель, продувается воздух в количестве 5400 кубических метров в минуту. Воздух нагревается до температуры 100 градусов и направляется в теплообменник 6. Горячая вода из теплообменника при 70 градусах проходит через второй теплообменник 9, представляющий собой часть схемы отопления здания 10. Эта схема состоит из системы труб и радиаторов 11, где циркулирует горячая вода. В установке используется только 25 процентов всей энергии ядерного реактора,

то есть 1000 киловатт. Показанные в схеме отопления заслонки первого теплообменника 5 служат для переключения горячего газа. Когда открыты нижние заслонки, горячий газ нагревает воду отопительной системы. Часть горячего газа можно пустить прямо в вытяжную трубу, открыв верхние заслонки.

Использование ядерного горючего для получения электрической энергии. Если ядерный реактор дает тепловую энергию, то нельзя ли это тепло известными нам способами превратить в механическую и электрическую энергию?

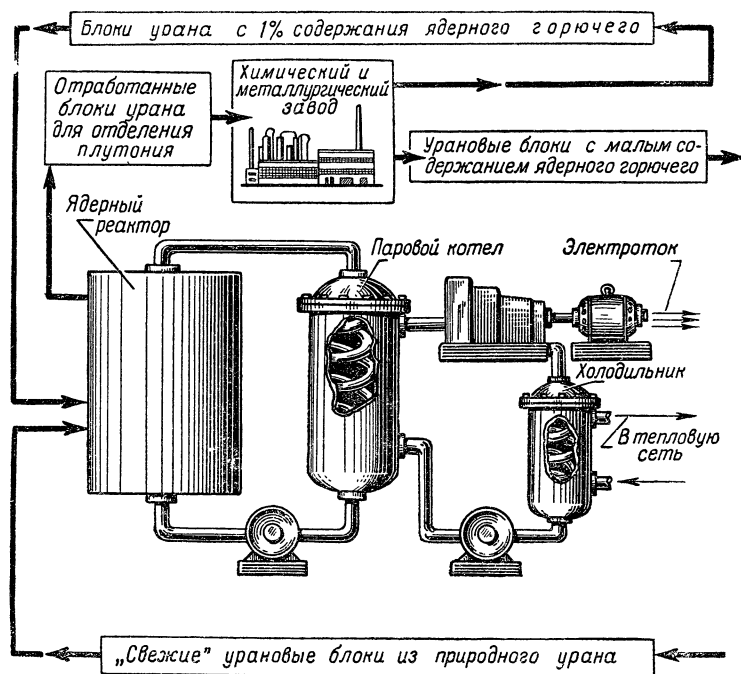


Рис. 54. Принципиальная схема атомной электростанции, работающей на природном уране

Одна из возможных схем превращения атомной энергии в электрическую приведена на рис. 54.

Расплавленный висмут (температура плавления 271 градус), играющий роль теплоносителя, пропускают через ядерный реактор, где он нагревается до 600 граду-

сов. Затем горячий металл, проходя через паровой котел, отдает свое тепло на парообразование и возвращается в реактор при температуре 275 градусов. Выходящий из парового котла пар, имеющий температуру до 260 градусов и давление 40 атмосфер, поступает в паровую турбину, где и приводит в движение вал, связанный с электрическим генератором. При таком давлении и температуре пара коэффициент полезного действия установки равен 20—25 процентам. Отработанный пар пропускают через холодильник, где он конденсируется и перекачивается насосом обратно в паровой котел. Вода, охлаждающая пар, нагревается и может быть применена для отопления жилых или производственных помещений.

В схеме применяется реактор, работающий на медленных нейтронах, и используется уран с содержанием ядерного горючего около одного процента. Замедлителем служит графит. Во время пускового периода реактор работает на природном уране, содержащем всего 0,7 процента урана²³⁵. При таких условиях урановые тепловыделяющие элементы реактора приходится довольно часто заменять. Но в этих блоках накапливается плутоний, который после отделения и химической очистки добавляют в освобожденные от «осколков» урановые блоки. Содержание ядерного горючего (урана²³⁵ и плутония²³⁹) в этих блоках увеличивается, и постепенно среднее содержание расщепляющегося материала в урановом котле доводится до одного процента.

По истечении некоторого времени в реакторе устанавливается такой режим, при котором только частично используется природный уран, добавляемый в котел в виде «свежих» урановых блоков. Основное же количество урана поступает в реактор с химического и металлургического заводов после обработки и имеет повышенное содержание ядерного горючего. Но в этой установке нет полного восстановления ядерного горючего. Около 50 процентов урана²³⁸ не используется и поступает на склад. Этот уран может быть использован в размножающем реакторе.

Более совершенной является схема атомной электростанции, показанная на рис. 55. В этой схеме используются два размножающих реактора, работающие на быстрых нейтронах. Теплоносителем здесь служит сплав плутония с висмутом. Расплавленное ядерное горючее из

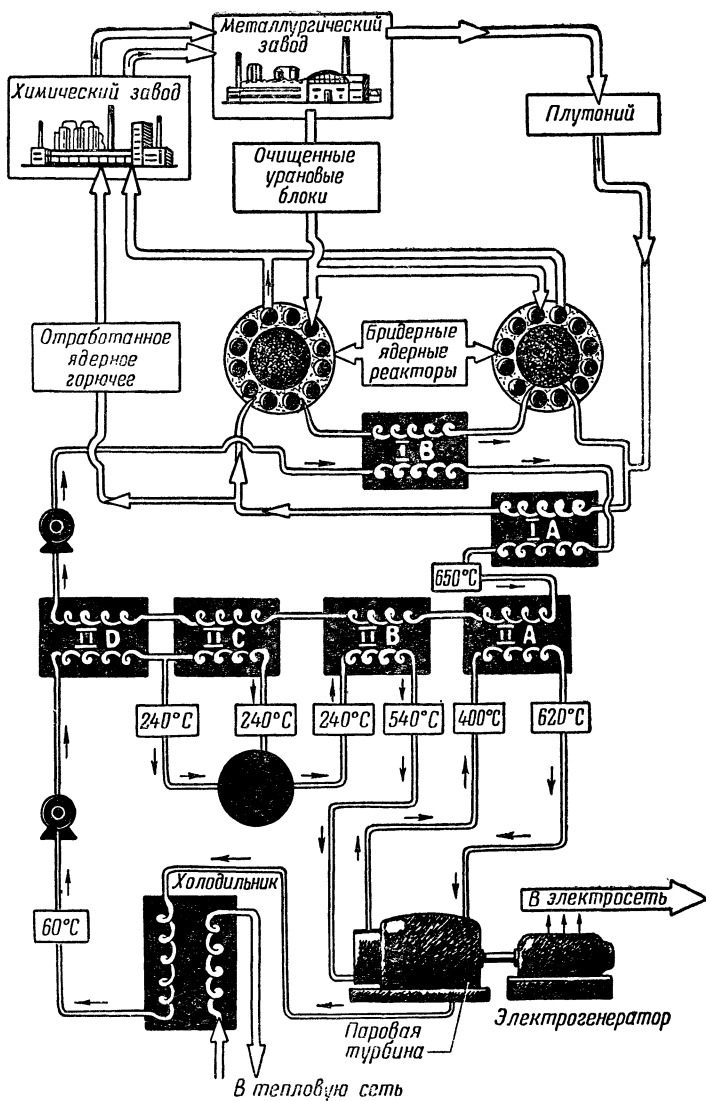


Рис. 55. Схема использования размножающих (бридерных) реакторов для получения электрической энергии

первого реактора перекачивается в один из первичных теплообменников *IA* и попадает во второй реактор. Здесь смесь вновь участвует в цепной реакции, нагревается, отдает свое тепло в другом теплообменнике *IB* и попадает обратно в центральную часть первого реактора.

Вторичным теплоносителем является газ гелий. Он проходит через теплообменники *IA* и *IB* и нагревается до температуры 650 градусов. Свое тепло гелий отдает целому ряду теплообменников *IIA*, *IIB*, *IIC* и *IID* и затем возвращается обратно. Один из вторичных теплообменников *IIC* является паровым котлом. Вся получаемая им тепловая энергия расходуется на образование большого количества пара с температурой 240 градусов. Однако для эффективного использования пара в турбине нужно давление и температуру его повысить. Для этого пар поступает в пароперегреватель, которым является теплообменник *IIB*. Там температура его повышается до 540 градусов, и он подается в одну из ступеней паровой турбины высокого давления. В турбине перегретый пар отдает часть своей энергии, охлаждается и затем проходит второй пароперегреватель *IIA*. Здесь уже он приобретает свою конечную температуру 620 градусов и поступает в основную ступень паровой турбины.

Отработанный пар конденсируется в холодильнике, и вода перекачивается через последний теплообменник *IID*, где нагреваясь до 240 градусов, поступает снова в паровой котел *IIC*. Тепло, выделяемое в холодильнике при конденсации паров, может быть использовано в различных отопительных системах.

Подобная схема обладает лучшими, чем в первом случае, экономическими показателями. Коэффициент полезного действия здесь значительно выше и достигает 30—35 процентов. Кроме того, в этой схеме полностью используется весь уран²³⁸.

Природный уран, находящийся во внешней части размножающих реакторов, время от времени поступает на обрабатывающие химические и металлургические заводы, где от него отделяется плутоний. Этот плутоний сплавляется с висмутом и добавляется в циркулирующую горючую смесь реакторов. Очищенные урановые блоки вновь направляются во внешнюю часть реактора. Отработанное ядерное горючее частично отбирается из цен-

тральной части реактора и после химической переработки снова направляется в реактор.

Необходимо отметить, что в этой схеме для получения энергии легкий изотоп урана не используется: в цепном процессе участвует только плутоний. Материал внешней части реактора обогащается ураном²³⁵, который здесь практически не вступает в ядерную реакцию. Обогащенный уран может быть успешно использован в реакторе на медленных нейтронах, как это показано на первой схеме атомной электростанции. Там уран²³⁵ используется полностью.

В малых установках для превращения атомной энергии в электрическую может быть использована также и газовая турбина. Подобная установка может работать так, как показано на рис. 56. С помощью компрессора

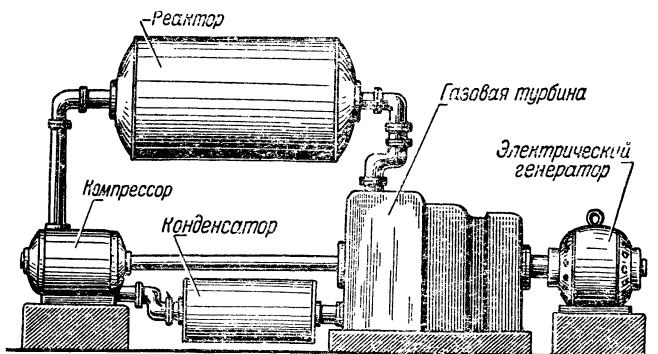


Рис. 56. Использование газовой турбины в атомной электростанции. Воздух нагнетается компрессором в реактор, где нагревается до высокой температуры. Горячие газы имеют большое давление и приводят в движение газовую турбину, находящуюся на одном валу с компрессором и электрическим генератором

воздух прогоняется по трубам ядерного реактора, где нагревается до высокой температуры. Горячие газы, обладающие большим давлением, поступают на лопатки газовой турбины, которая приводит в движение и компрессор и электрический генератор. Газ, выходящий из турбины, направляется обратно в компрессор. Все три агрегата находятся на одном валу.

Советская атомная электростанция. С 27 июня 1954 года в Советском Союзе работает первая в мире

электрическая станция, использующая атомное горючее. В ней используется гетерогенный ядерный реактор с графитовым замедлителем (рис. 57). Тепловая мощность реактора — 30 тысяч киловатт. Он представляет собой графитовый цилиндр диаметром 1,5 и высотой 1,7 метра, вокруг которого расположен отражатель. В цилиндре помещены 128 рабочих каналов, окруженных графитовой

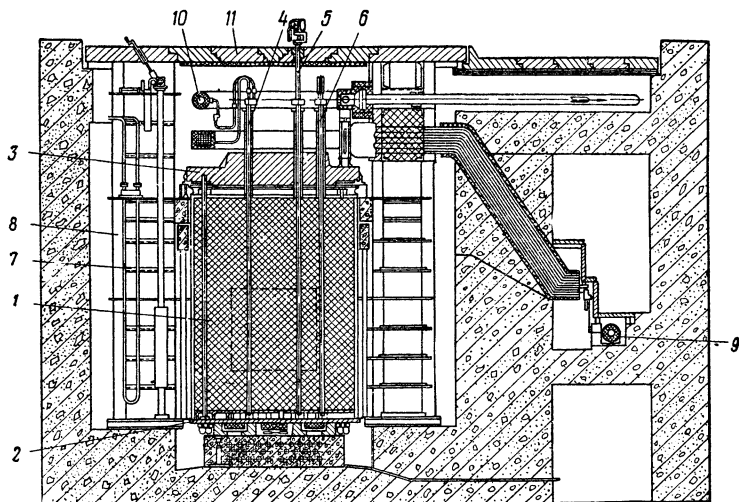


Рис. 57. Ядерный реактор советской атомной электростанции:
 1 — графитовая кладка реактора; 2 — нижняя опорная плита; 3 — верхняя плита; 4 — рабочий канал; 5 — аварийная защита; 6 — автоматическое регулирование; 7 — ионизационная камера; 8 — боковая защита (вода); 9 — распределение охлаждающей воды, поступающей в рабочие каналы; 10 — отвод воды от рабочих каналов; 11 — верхняя защита (чугун)

оболочкой. Эти каналы по своей конструкции напоминают каналы реактора РФТ. Уран, находящийся в рабочих каналах, пронизан системой труб, по которым протекает охлаждающая вода под высоким давлением. Эта вода отбирает тепло, получающееся при делении урана. На атомной станции применяется уран с пятипроцентным содержанием легкого изотопа. Всего загружено в реактор около 550 килограммов урана.

Тело реактора вместе с графитовым отражателем помещается в герметическом стальном цилиндре. В этот цилиндр нагнетается инертный газ, и тем самым создаются внутри реактора благоприятные условия для

работы деталей установки. В инертном газе процесс окисления не происходит даже при высокой температуре.

Защита обслуживающего персонала осуществляется с помощью метрового слоя воды и трехметровой бетонной стены. Кроме того, верхняя часть реактора прикрыта чугунной плитой толщиной в 250 миллиметров. Эта плита видна на рис. 58, где приведена верхняя часть реактора.

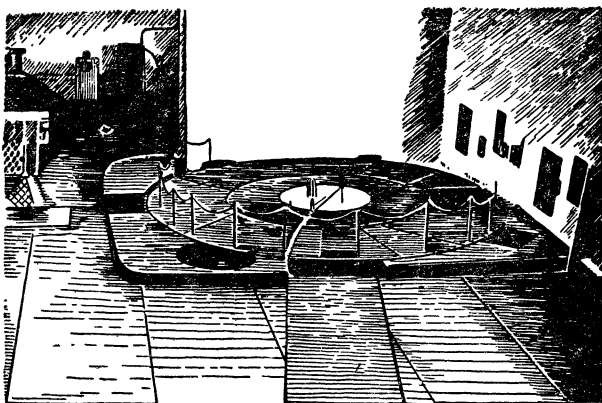


Рис. 58. Верхняя часть реактора электростанции.
Видна чугунная плита, закрывающая реактор

Реактор снабжен 22 регулирующими стержнями. Из них 4 стержня поддерживают мощность реактора на нужном уровне и 18 предназначены для компенсации постепенного выгорания урана²³⁵. Регулирующие стержни подвешены на тросах и перемещаются с помощью устройств, управляемых из центрального пульта электростанции. Автоматическое управление реактором осуществляется при помощи механизма, передвигающего стержни и связанного с ионизационными камерами. Камеры расположены вблизи активной зоны реактора. Аварийных стержней для быстрого прекращения цепной реакции — два. Они падают в активную зону реактора, когда появляется аварийный сигнал. Это может быть, например, при остановке насосов из-за аварии в электросети и при других неисправностях. На рис. 59 показана верхняя часть реактора без наружной чугунной плиты. Видны два стержня

аварийной защиты с моторами и трубопроводы для подачи охлаждающей воды.

При замене какого-нибудь рабочего канала последний отсоединяется от охлаждающей системы, с помощью крана поднимается и отвозится в специальное хранилище. На его место устанавливается новый.

Принципиальная схема атомной электростанции приведена на рис. 60.

Для отвода тепла от рабочих каналов реактора 1 используется дистиллированная вода, которая под давлением 100 атмосфер омывает урановые трубы.

Движение дистиллированной воды в первичном замкнутом контуре можно проследить на рисунке. Нагреваясь в реакторе 1 до 260 градусов, она поступает в теплообменники 4 (которых в контуре четыре) и там, охладившись до 190 градусов, перекачивается мощными насосами 3 по трубопроводу 2 опять в реактор. Так заканчивается цикл обращения первичного теплоносителя (дистиллированной воды).

Скорость обращения воды в первичном контуре обеспечивает отвод тепла из ядерного реактора в количестве, эквивалентном 30 тысячам киловатт. Первичный контур снабжен так называемыми компенсаторами 10, воздушный и водяной объем которых предохраняет трубопроводы и рабочие каналы реактора от сильных колебаний давления при изменении температуры воды. В компенсаторах объема с помощью сжатого воздуха, поступающего из газовых баллонов 11, поддерживается давление в 100 атмосфер.

Дистиллированная вода при работе станции загрязняется. Кроме того, существуют небольшие утечки воды через различные соединения и сальники насосов. Замена и добавление воды в первичном контуре производятся из бака 13 с помощью вспомогательного насоса 12. Чтобы предупредить возможность попадания в реактор случайных взвешенных твердых частиц, на трубопроводе первичного контура поставлен фильтр 14. В теплообменниках 4 образуется пар с давлением 12,5 атмосферы при температуре 255 градусов.

Вода первичного контура, проходя через реактор, приобретает некоторую активность. А в случае разрушения оболочек рабочего канала вода вступает в контакт с ураном и радиоактивность ее может стать очень боль-

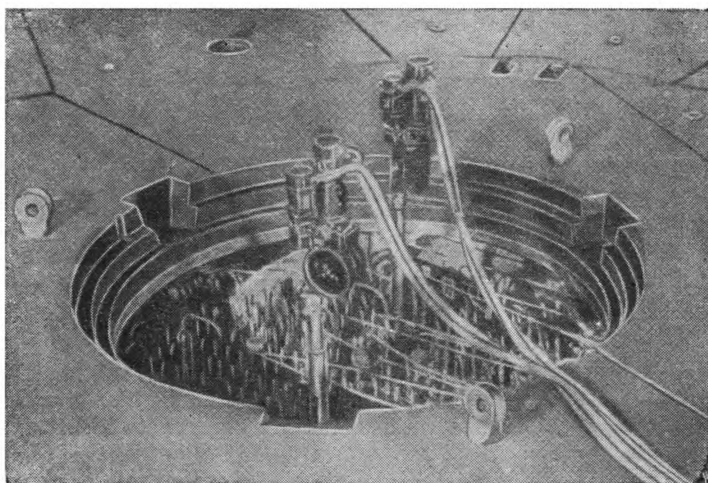


Рис. 59. Верхняя часть реактора без наружной плиты. Видны стержни аварийной защиты с мотором, рабочие каналы и трубы с охлаждающей водой

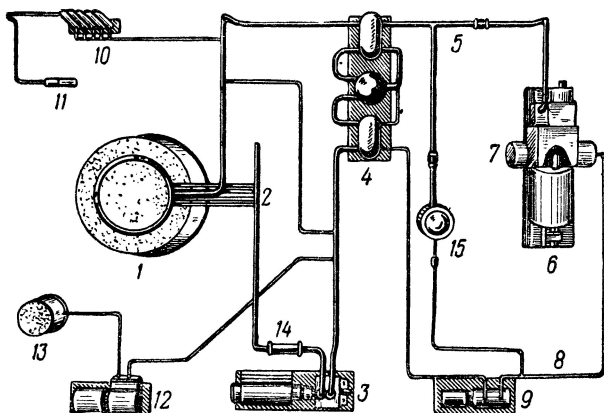


Рис. 60. Принципиальная схема советской атомной электростанции:

1 — ядерный реактор; 2 — трубопровод с охлаждающей водой; 3 — питающие насосы первичной воды; 4 — теплообменники; 5 — трубопровод с паром при давлении 12,5 атмосферы; 6 — паровая турбина; 7 — конденсатор; 8 — трубопровод с вторичной водой; 9 — насос вторичной воды; 10 — компенсаторы объема первичного контура; 11 — баллоны со сжатым воздухом; 12 — вспомогательный насос для замены дистиллированной воды первичного контура; 13 — бак с запасной водой; 14 — фильтр; 15 — пусковой конденсатор

шой. Для защиты обслуживающего персонала от возможных сильных облучений все элементы схемы станции, связанные с первичным контуром, установлены в помещениях с толстыми бетонными стенами.

Вторичный контур состоит из двух участков. По трубопроводу 5 пар подается в турбину 6, где, отдавая свою энергию, охлаждается. В конденсаторе 7 пар превращается в воду, а затем эта вода по участку трубопровода 8 с помощью насоса 9 перекачивается в теплообменник 4 для испарения.

Во вторичном контуре есть ответвление, с помощью которого пар можно направлять не в турбину, а в специальный пусковой конденсатор 15. Это устройство дает возможность отбирать от реактора значительную тепловую мощность даже и в том случае, если турбина 6 по каким-нибудь причинам не может работать. Охлаждение пара в конденсаторах 7 и 15 осуществляется с помощью речной воды.

Первая атомная электростанция Советского Союза размещается в трех зданиях. В главном здании (рис. 61) находится ядерный реактор, парогенераторы, насосы и оборудование для обслуживания станции. Там же размещается и пульт управления станцией. Во втором здании установлены паровая турбина с электрическим генератором, электрическое распределительное устройство, конденсатор и другое оборудование, относящееся к схеме движения пара и вторичной воды. Наконец, в третьем здании размещаются вентиляционные устройства, необходимые для выброса в трубу радиоактивных газов, выделяющихся при работе ядерного реактора.

Посмотрим на разрез главного здания атомной электростанции (рис. 62).

В центральном зале главного здания помещается «сердце» атомной электростанции — ядерный реактор 1. Его верхняя часть находится на уровне пола, что облегчает замену рабочих каналов. В этом зале находится чугунная кабина с тремя толстыми стеклянными иллюминаторами, из которой машинист управляет движением подъемного крана 5 при выемке рабочего канала из реактора. Отработанный канал переносится тем же краном в хранилище, где он будет выдерживаться до тех пор, пока его радиоактивность не станет сравнительно

безопасной. Стены кабины защищают машиниста от вредного излучения.

К главному залу слева примыкает помещение с компенсаторами объема 4. Справа находятся помещения, где размещена основная часть оборудования станции.

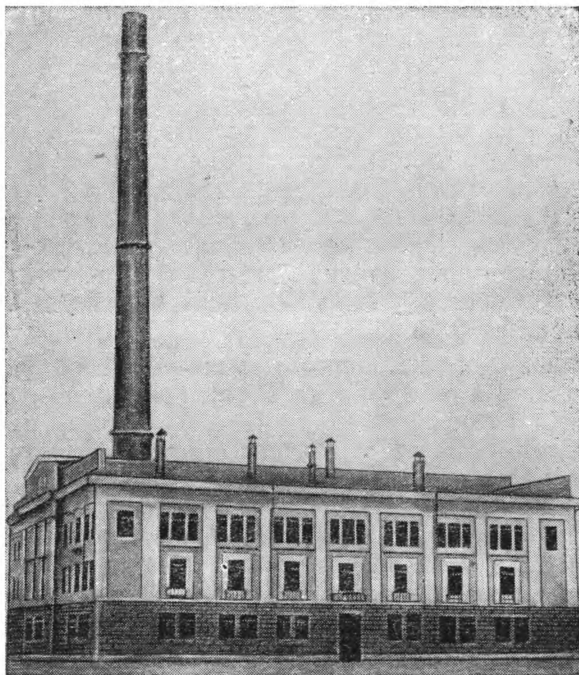


Рис. 61. Главное здание советской атомной электростанции

В самом нижнем этаже расположены насосы первичного контура 2. Из рисунка видно, что они отделены от электродвигателя 6 стеной и помещаются в отдельной кабине. Такое устройство облегчает обслуживание электродвигателя и защищает обслуживающий персонал от действия лучей радиоактивной воды.

Теплообменники 3 расположены в крайнем правом помещении второго этажа. В верхнем этаже расположен главный пульт и щит управления атомной электростан-

цией 7. Кроме того, на особый щит 8 выведены сигналы, предупреждающие о возникновении опасной радиоактивности в различных помещениях станции.

Автоматизация управления всеми элементами процесса на первой атомной электростанции Советского

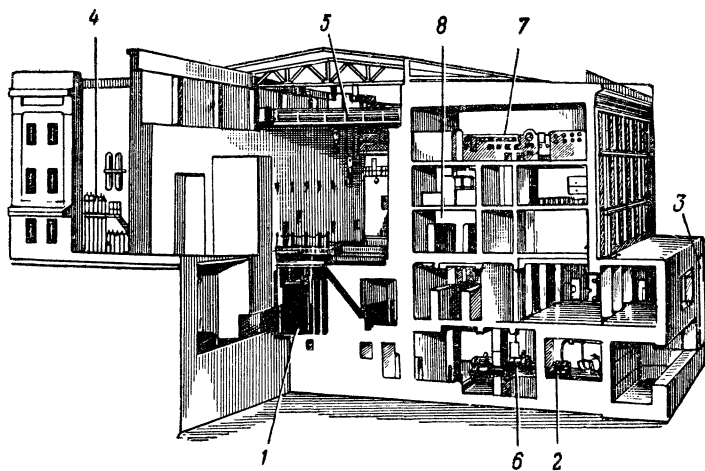


Рис. 62. Разрез главного здания атомной электростанции:

1 — ядерный реактор; 2 — насосы первичного контура; 3 — теплообменники; 4 — компенсаторы объема первичного контура; 5 — подъемный кран; 6 — электродвигатель насосов первичного контура; 7 — пульт управления атомной электростанцией; 8 — щит, регистрирующий радиоактивность в помещениях

Союза доведена до высокого уровня. На пульте управления станцией оператор может по приборам следить за работой всех агрегатов электростанции (рис. 63). Перед глазами дежурного инженера находятся измерители мощности и положения регулирующих стержней, приборы, отмечающие температуру, давление и количество воды, протекающей в каждом из 128 рабочих каналов реактора. Здесь же оператор получает сведения о давлении пара, идущего в турбину, о работе всех насосов и парогенераторов.

Наблюдая за показаниями соответствующих приборов, инженер, находясь у пульта, может устранить различные неполадки. Но даже в том случае, если оператор не примет необходимых мер, авария не произойдет, так как при нарушении режима в работе аварийный стер-

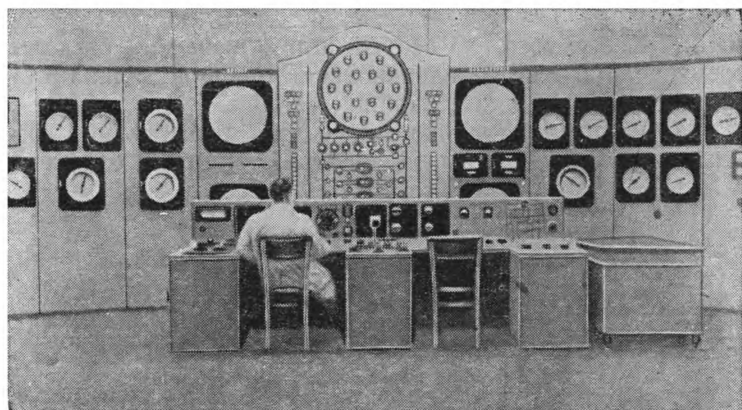


Рис. 63. Пульт управления первой советской атомной электростанции

жень сам опустится в реактор и остановит цепной процесс, то есть выделение атомной энергии.

Работа атомной электростанции совершенно безопасна. На особом пульте находятся дозиметры — приборы, сигнализирующие о наличии опасных радиоактивных излучений в различных помещениях электростанции. Оператор всегда видит, в каком помещении излучение превышает норму. Кроме того, в этом помещении автоматически вспыхивает красная лампа и дается звуковой сигнал. Получив такое предупреждение, люди удаляются из зоны радиоактивного заражения. Подобные случаи бывают очень редко. Мощные вентиляторы удаляют радиоактивную пыль и газ из помещений электростанции через высокую дымовую трубу, где они и рассеиваются на большой высоте. Управление работой всей атомной электростанции производится с главного пульта двумя инженерами. У машин находится несколько механиков и электриков.

Питание всех агрегатов станции производится за счет электроэнергии, вырабатываемой ею же. Однако в случае аварии в электрической сети питания все механизмы и приборы автоматически переключаются на аккумуляторную батарею.

Электрическая энергия атомной электростанции подается на трансформаторную подстанцию, включенную в общее высоковольтное кольцо района.

Первая атомная электростанция СССР построена с целью накопления научного и инженерного опыта, необходимого для проектирования и строительства крупных атомных электростанций. Для этого при сооружении станции были предусмотрены различные устройства и приспособления, позволяющие физикам и техникам проводить необходимые исследования.

Используя опыт работы первой атомной электростанции, наши ученые и инженеры разрабатывают мощные энергетические установки. Пройдет немного лет, и в строй войдут атомные электростанции мощностью 400—600 тысяч киловатт.

Пути развития ядерной энергетики. Опыт работы промышленной атомной электростанции СССР мощностью 5 тысяч киловатт позволяет ученым произвести некоторую оценку ядерной энергетики ближайшего будущего.

Электроэнергия, вырабатываемая первой атомной электростанцией, пока еще дороже электроэнергии, даваемой крупными тепловыми станциями в СССР, но сравнима со стоимостью энергии тепловых электростанций той же мощности.

Высокая себестоимость электроэнергии объясняется в первую очередь малыми размерами станции, что вызывает повышенный расход урана²³⁵ на единицу мощности, и большими затратами на изготовление тепловыделяющих урановых элементов. Дорого стоит и дополнительное оборудование, повышающее надежность работы электростанции. Но опыт эксплуатации уже показал, что от многих приспособлений такого рода можно отказаться.

На Международной конференции в Женеве в 1955 году советскими учеными был представлен вариант атомной электростанции мощностью 100 тысяч киловатт. Эта станция будет оборудована двумя реакторами с тепловой мощностью по 200 тысяч киловатт каждый.

Увеличение размеров реактора позволяет снизить содержание урана²³⁵ в урановых блоках реактора. Расчеты показывают, что такая станция требует до 200 тонн урана в год с содержанием 2,5 процента легкого изотопа, то есть в год такая станция будет расходовать всего

500 килограммов урана²³⁵ *. Это обстоятельство, а также ряд усовершенствований, вводимых на новой станции, значительно удешевит стоимость киловатт-часа вырабатываемой электроэнергии. Она станет близкой к стоимости электроэнергии тепловой станции на высокосортном угле.

Сравнение количества оборудования, материалов и некоторых работ, необходимых для сооружения электростанций разных типов мощностью по 100 тысяч киловатт, приведенное в табл. 3, говорит в пользу атомных электростанций.

Таблица 3

Сравнение материальных затрат атомной и угольной электростанций мощностью 100 тысяч киловатт

Части сооружения	Электростанции	
	угольная	атомная
Вес машины и механизмов	2 700 т	700 т
Вес металлоконструкций	1 250 „	900 „
Вес трубопроводов	300 „	200 „
Вес обмуровки и кладки (для атомной электростанции — графитовая кладка)	1 500 „	500 „
Вес механизмов топливного склада	2 500 „	—
Вес подвижного состава	300 „	—
Объем бетонных и железобетонных работ	400 куб. м	9 000 куб. м
Объем здания (без турбинного зала и электрических устройств)	75 000 „	50 000 „
Площадь застройки	15 га	5 га
Расходы мощности на собственные нужды	8 000 квт	5 000 квт

Таблица убедительно показывает, что материальные затраты на оборудование атомной электростанции значительно меньше, чем для угольной. Это объясняется прежде всего тем, что атомной станции не нужны большие топливные склады, сложные системы подачи топ-

* Урановые блоки, в которых «выгорел» уран²³⁵, содержат большое количество тяжелого изотопа урана. Эти блоки могут быть использованы для получения искусственного ядерного горючего — плутония.

лива, углеразмольные мельницы, золоудаляющие и другие сооружения, характерные для угольных электростанций.

Атомная электростанция уже сейчас более экономична, чем тепловая, удаленная от месторождения угля или работающая на низкосортном топливе. Для того чтобы обеспечить атомную станцию мощностью 100 тысяч киловатт горючим на один год, требуется всего один рейс грузового самолета. Для угольной же станции той же мощности необходимо ежедневно подавать 20—30 вагонов угля.

Сравнение характеристик атомной и угольной электростанций мощностью по 100 тысяч киловатт указывает на рентабельность строительства электростанций, аналогичных первой промышленной атомной электростанции в СССР. Разработанный советскими учеными вариант мощной атомной электростанции имеет неоспоримое преимущество перед другими возможными вариантами, так как он основывается на опыте действующей электростанции.

Однако, как мы видели, тип реактора, избранный в атомной станции Академии наук, не является единственным. Разнообразие реакторов, которые могут быть применены для энергетических целей, весьма велико.

Так, например, если взять тот же гетерогенный реактор с замедлителем из графита, то в качестве теплоносителя может быть использована не только вода, но и различные газы и металлы. Если отводить тепло водой под высоким давлением, как это сделано в реакторе первой атомной электростанции СССР, то сравнительно низкая температура теплоносителя (260 градусов) не позволяет получить высокий коэффициент полезного действия турбогенератора. Это большой недостаток схемы подобного типа.

Для получения пара с температурой 375 градусов давление в первичном контуре придется поднять выше 225 атмосфер. При этом необходимо увеличить прочность конструкций рабочих каналов и реактора, а это требует введения в активную зону дополнительного количества поглощающих нейтроны материалов (стали). Для осуществления устойчивой цепной реакции нужно будет увеличить содержание урана²³⁵ в тепловыделяющих элементах реактора. Увеличение стоимости ядерного горю-

чего не будет компенсировано улучшением коэффициента полезного действия электростанции. Тем не менее, как это показано на примере работы первой атомной электростанции СССР и расчета советских ученых, строительство атомных электростанций на реакторах такого типа экономически вполне оправдывается.

При использовании газового охлаждения нет нужды создавать в каналах реактора очень большие давления. Но так как газ обладает очень малой теплоемкостью, то для отвода тепла нужно очень большое его количество продувать через реактор. Это вызывает значительные затраты энергии и является существенным недостатком газового охлаждения энергетических ядерных реакторов.

Примером может служить описанный раньше английский реактор ВЕРО, где для отвода тысяч киловатт тепловой мощности требуются воздуходувки, продувающие 5400 кубометров воздуха в минуту.

Охлаждение жидким металлом совмещает в себе достоинства газового и водяного охлаждения. Расплавленные металлы обладают высокой температурой кипения и поэтому позволяют избежать высоких давлений в первичном контуре реактора. Большая по сравнению с газами теплоемкость металла не вызывает необходимости прогонять через реактор большие массы теплоносителя. Одним из самых приемлемых теплоносителей такого типа является легкоплавкий металл натрий.

Если в графитовом реакторе заменить воду натрием, то при давлении теплоносителя 5—10 атмосфер можно значительно поднять температуру в первичном контуре и получить коэффициент полезного действия атомной электростанции, превышающий 30 процентов.

Натрий сравнительно слабо поглощает нейтроны, и поэтому в больших реакторах такого типа можно обойтись ураном с малым обогащением (около одного процента). Если же применять урановые элементы, покрытые цирконием или слоем очень тонкой стали, то можно работать и на природном уране. Графито-натриевые реакторы в ближайшее время будут применяться в энергетических установках. Недостатком натриевого охлаждения является довольно высокая радиоактивность натрия. Вследствие этого первичный контур, выполненный с расплавленным натрием, трудно обслуживать.

В атомных электростанциях вполне возможно также применение гомогенных и гетерогенных реакторов, где в качестве замедлителя используется тяжелая или простая вода.

Общий недостаток всех описанных выше реакторов заключается в том, что вырабатываемая в них энергия получается в основном за счет урана²³⁵. В будущей атомной энергетике, по всей вероятности, главную роль будут играть размножающие реакторы, в которых атомная энергия выделяется из природного урана и тория. В этом направлении и работают советские ученые. Так, академик А. И. Алиханов с сотрудниками разработали схему гомогенного размножающего реактора с кипящей водой, о которой было рассказано в предыдущем разделе.

Значение развития ядерной энергетики огромно. Дело не только в стоимости электроэнергии. Перевод тепловых электростанций на ядерное топливо даст возможность передать огромные количества угля и нефти химической промышленности. При их химической переработке получается много весьма ценных и необходимых нам материалов. Запасы угля и нефти на земле не так уж велики, и, вероятно, через 30—40 лет будет считаться варварством сжигать химическое сырье в топке паровых котлов. Вся потребность человечества в электрической энергии будет обеспечена гидроэлектрическими и ядерными станциями.

Имеется у ядерных электростанций и ряд других преимуществ.

В приведенной на рис. 64 сравнительной диаграмме видна работа тепловой и атомной электростанций. Слева размещено сырье, необходимое для выработки электроэнергии, справа — продукция электростанций.

Тепловая электростанция требует для своей работы большое количество топлива, воды и воздуха. При ее эксплуатации получают газообразные отходы в виде дыма, содержащего большое количество золы и несгоревшего угля. Этот дым загрязняет атмосферу городов и поселков.

Для работы атомной электростанции не нужен воздух. Она потребляет ничтожные количества ядерного топлива — урана или тория. По весу они в два с половиной миллиона раз меньше, чем соответствующие по запасу энергии количества угля. Атомная электростанция не дает

дыма. Получающееся некоторое количество радиоактивных «осколков» может быть использовано для изготовления радиоактивных препаратов. Ядерный реактор электростанции излучает большое количество нейтронов и радиоактивных излучений, которые в основном поглощаются бетонной защитой. Но часть нейтронов может

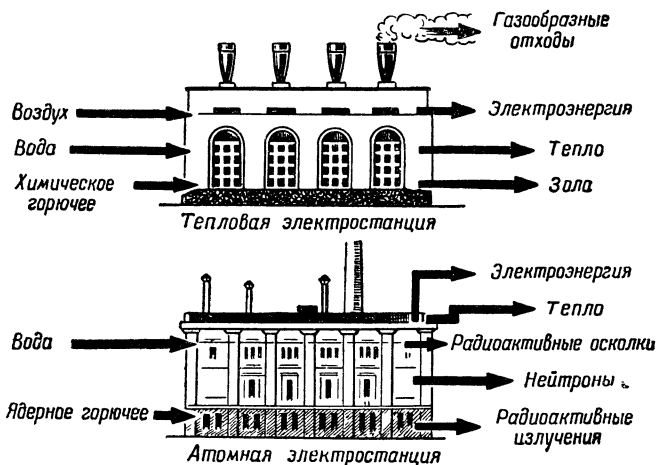


Рис. 64. Сравнительная диаграмма работы атомной и тепловой электростанций

быть использована для облучения различных элементов с целью получения радиоактивных изотопов, которые используются в народном хозяйстве.

Атомный двигатель. Атомная энергия может быть использована не только для получения электричества.

Сейчас вполне возможна установка атомного двигателя на больших морских судах (рис. 65). Теплоноситель, выходящий из ядерного реактора, нагревает воду паровых котлов. Пар может быть использован обычным способом: либо для работы паровых машин, связанных с гребным валом, либо (что энергетически значительно выгоднее) для вращения паровой турбины. Паровая турбина имеет очень большое число оборотов, поэтому ее нельзя связывать прямо с гребным валом. Между турбиной и гребным валом устанавливается редуктор — прибор, позволяющий получать уменьшенное число оборотов вала.

Расчеты показывают, что для кругосветного плавания морского судна водоизмещением 15—20 тысяч тонн необходимо всего 800—900 граммов урана²³⁵.

Такое судно практически не связано с топливной базой. Оно может плавать месяцы и даже годы без пополнения запасов горючего. Отработанное, нуждающееся в химической обработке ядерное горючее может складываться в больших свинцовых ящиках. После нескольких месяцев хранения большая часть радиоактивных веществ

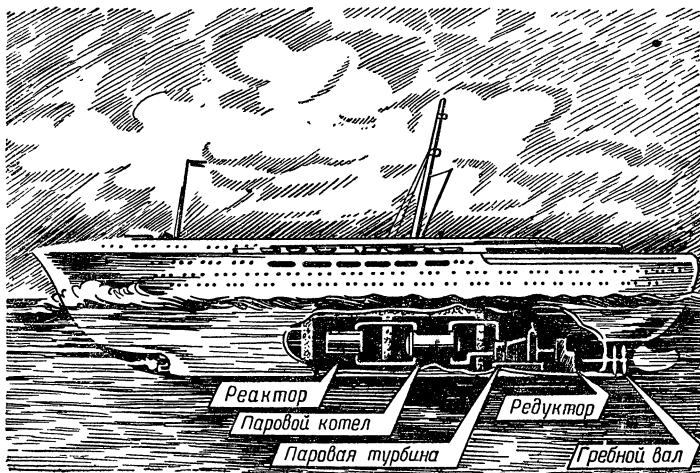


Рис. 65. Схема использования атомного двигателя на морском судне

в основном распадется, и восстановление ядерного горючего можно будет произвести на находящемся на берегу предприятии.

Уже сейчас при недостаточно совершенной еще ядерной технике эксплуатация атомных двигателей на больших судах обойдется не дороже, чем эксплуатация тепловых машин, использующих химическое топливо.

Атомный двигатель не требует для своей работы воздуха и поэтому может быть вполне успешно использован на подводной лодке (рис. 66). Такая лодка является уже в полном смысле подводной. Она может двигаться под водой неограниченное время. Ей не нужно, как это при-

ходится делать современной лодке, время от времени подниматься на поверхность воды для зарядки аккумуляторов. Атомная подводная лодка может действовать под водой длительное время. Необходимый для дыхания команды кислород может запасаться в конденсированном виде в баллонах или извлекаться при помощи электролиза прямо из морской воды. Сейчас подводные лодки используются в основном для военных целей. Атомные

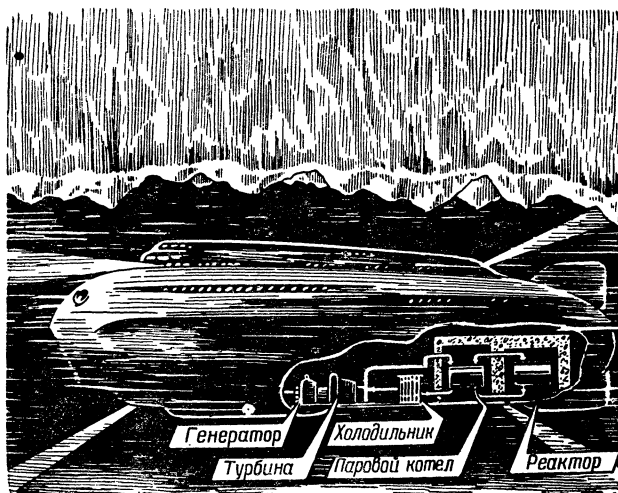


Рис. 66. Схема атомной подводной лодки

подводные лодки могут быть использованы и для пассажирских и грузовых перевозок. В любую погоду, и зимой, и летом, они смогут плавать от Мурманска до Владивостока вдоль нашего северного и восточного побережья. Им не страшны мощные ледяные поля, преграждающие путь надводным кораблям: они пройдут подо льдами.

Можно, как мы уже указывали, построить совсем маленький ядерный реактор, состоящий из 15 литров простой воды и 700—800 граммов урана²³⁵ или другого расщепляющегося материала. Пар этого котла может быть использован для вращения небольшой турбины. Казалось бы, такой маленький реактор можно установить

на любой транспортной установке, даже на легковом автомобиле. Однако этот реактор, так же как и любой другой, излучает очень большое количество нейтронов и гамма-лучей. Для того чтобы оградить водителя, пассажиров и даже прохожих от этих опасных излучений, надо окружить пятнадцатилитровый реактор слоем бетона или другого равноценного по поглощению материала толщиной не менее полутора — двух метров.

Нечего, конечно, и думать об установке такого реактора на легковом и даже на грузовом автомобиле. Применение атомных двигателей на малых транспортных установках является пока делом будущего. Не следует

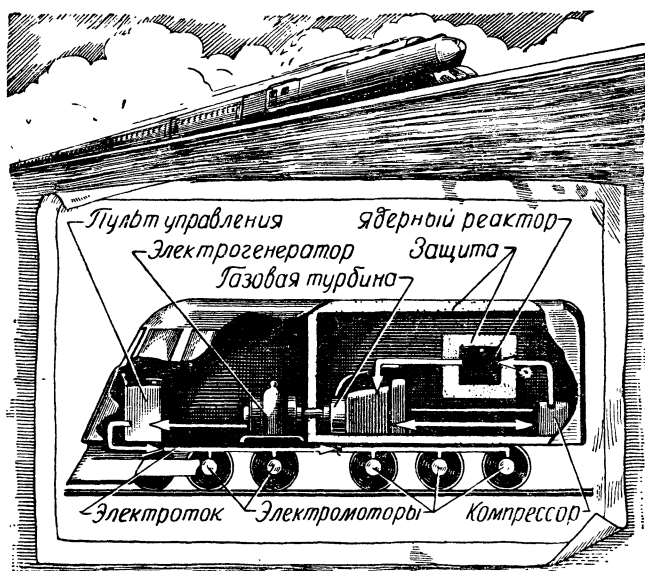


Рис. 67. Атомный теплоэлектровоз

обольщаться надеждой на то, что удастся когда-нибудь найти легкий материал, тонкий слой которого сможет поглотить излучения реактора. Таких материалов в природе не существует. Надо искать другие пути получения и использования атомной энергии.

Имеется реальная возможность построить атомный теплоэлектровоз (рис. 67). Такое сооружение будет пред-

ставлять собой небольшую атомную электростанцию на колесах, в которой газовая турбина приводится во вращение горячими газами, выходящими из труб ядерного реактора. На одном валу с турбиной находится компрессор, нагнетающий газ в ядерный реактор, а также электрический генератор, питающий электромоторы тепловоза.

Коэффициент полезного действия такого тепловоза может достигать 30—35 процентов. Необходимо только учесть, что газ, проходящий через реактор, становится радиоактивным и выпускать его в атмосферу нельзя.

Газ, выходящий из газовой турбины, нагнетается компрессором обратно в реактор, где он вновь нагревается, и цикл повторяется.

Такой тепловоз, увлекая за собой большой состав вагонов, будет, вероятно, в ближайшем будущем пересекать огромные пространства нашей страны.

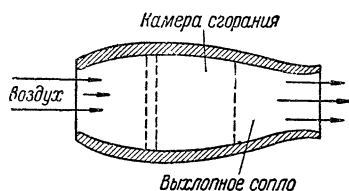


Рис. 68. Схема обычного реактивного двигателя. Воздух попадает в камеру сгорания, где происходит сжигание топлива, и раскаленные газы направляются в выхлопное сопло. Реактивный снаряд движется за счет отдачи, происходящей при выхлопе газов

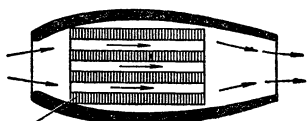
Надо полагать, что недалеко то время, когда атомные двигатели начнут применяться и для воздушных сообщений. Самое удивительное заключается в том, что атомный авиационный двигатель будет незначительно отличаться от реактивного двигателя современных самолетов.

Реактивный двигатель (рис. 68) содержит два основных элемента: камеру сгорания, где происходит сжигание топлива, и выхлопное

сопло, куда направляются раскаленные газы. Так же как и двигатель внутреннего сгорания, реактивный двигатель превращает тепловую энергию в механическую. Только тяга здесь создается не за счет винта, а за счет реакции отбрасываемого двигателем потока газов. Чем выше температура газа, тем больше скорость его истечения, тем больше скорость ракеты, снаряда или самолета.

Очевидно, что при использовании атомной энергии для осуществления реактивного движения роль камеры сгорания должен играть ядерный реактор. Простейшая схема

такого прямооточного реактивного двигателя изображена на рис. 69. Воздух нагнетается здесь в каналы реактора благодаря быстрому поступательному движению самолета. В каналах реактора воздух нагревается и с большой скоростью вытекает через выхлопное сопло. Такая схема может быть осуществлена только при очень больших скоростях самолета, когда создается высокое давление воздуха в каналах ядерного реактора.



Реактор с защитой от радиоактивного излучения

Рис. 69. Схема прямооточного реактивного двигателя на атомном горючем. Здесь камера сгорания заменена ядерным реактором. Воздух попадает в трубы ядерного реактора, где нагревается до высокой температуры. Горячие газы попадают в выхлопное сопло

создается высокое давление воздуха в каналах ядерного реактора.

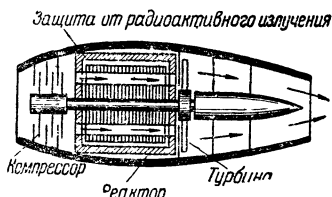


Рис. 70. Схема атомного турбореактивного двигателя

Более совершенным является турбореактивный двигатель (рис. 70). Здесь высокое давление воздуха создается компрессором независимо от скорости самолета. Часть энергии нагретого газа расходуется на вращение газовой турбины, приводящей в движение компрессор. Основная же энергия тратится на тяговое усилие, создаваемое реакцией выхлопных газов.

Возможна также постройка винтового атомного самолета, где будет применена уже знакомая нам схема с замкнутым циклом компрессор — реактор — газовая турбина (рис. 71).

Основным препятствием к использованию ядерной энергии в самолетах является большой вес бетонной защиты для предохранения экипажа и пассажиров от вредных излучений реактора. Она весит примерно

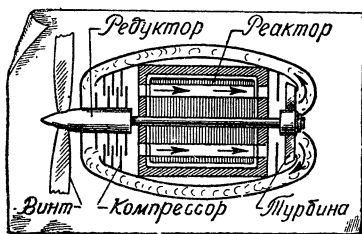


Рис. 71. Атомный турбовинтовой двигатель

100 тонн. Если бы удалось снизить этот вес до 40 тонн, то, как показывают расчеты, в настоящее время была бы вполне реальна постройка самолета грузоподъемностью 15 тонн, предназначенного для перевозки 180 пассажиров со скоростью 1600 километров в час. Стоимость подобного самолета, по приближенным оценкам, только в 15 раз превысила бы стоимость современного крупного реактивного самолета, предназначенного для пассажирских перевозок.

Следует напомнить, что ядерное горючее обладает колоссальной концентрацией энергии: один килограмм урана эквивалентен 1800 тоннам бензина. Поэтому такой самолет будет иметь практически неограниченную дальность полета. Имея на борту тысячу килограммов ядерного горючего, атомный самолет фактически будет обладать запасом топлива, равноценным примерно двум миллионам тонн бензина. Это позволяет надеяться, что овладение атомной энергией даст возможность в скором времени осуществить давнишнюю мечту ученых — межпланетные путешествия. Ракета подобного рода должна быть рассчитана на полет в безвоздушном пространстве и поэтому для осуществления реактивного движения должна иметь с собой достаточный запас газа в жидком виде. Таким газом может быть, например, водород.

На пути к решению этой задачи есть еще очень много трудностей, связанных с выбором газа, его хранением, теплостойкостью применяемых материалов и т. д. Но эти затруднения преодолимы. Только ракета с ядерным горючим разовьет такую большую скорость, что сможет пройти область действия сил земного тяготения и выйти в безбрежные просторы вселенной.

Атомная энергия наших дней. Если бы лет восемнадцать — двадцать назад кто-нибудь написал увлекательную научно-фантастическую книгу о нашем будущем, в которой рассказывалось бы о том, как советские люди в 1954 году построили первую промышленную атомную станцию, а уже в 1960 году атомная энергетика заняла видное место в нашей стране; если бы смелый автор предположил, что общая мощность введенных в эксплуатацию атомных станций превысила два миллиона киловатт, описал бы созданные в труднодоступных районах страны, где нет топлива и рек, гиганты индустрии и даже подсчитал, что для годичного обеспечения всех атомных

станций «топливом» понадобится всего один рейс грузового самолета,— ему сказали бы: «Уж слишком наивно, это не научная фантазия».

А сейчас...

Конечно, наше предположение о точном научном предвидении автора фантастического романа тоже фантазия. Бессмысленно было бы требовать даже от самого гениального ученого, чтобы он достаточно полно описал в 1938 году то, что мы будем иметь в 1958 году. В 1938 году ни один физик даже не имел представления о том, как подойти к проблеме использования атомной энергии. Но в 1939 году все изменилось. Открытие деления урана и связанная с этой реакцией возможность получения цепного процесса открыли путь получения атомной энергии. Сейчас мы знаем значительно больше и можем увереннее говорить о ядерной энергетике.

В нашей стране построено много ядерных реакторов, в которых происходит цепной процесс с освобождением атомной энергии. Кроме того, в них образуется ядерное горючее для мощных промышленных установок и производятся радиоактивные вещества, используемые в промышленности, сельском хозяйстве и медицине. А в 1954 году в Советском Союзе пущена первая атомная электростанция мощностью в пять тысяч киловатт.

Пять тысяч киловатт! Мы, советские люди, прекрасно знаем, что при современном уровне энергетики, когда у нас в стране входят в строй гидростанции мощностью в миллионы киловатт, это немного. Но мы понимаем также, что из этого малого рождается великое — новая ядерная энергетика. Первый раз за период существования человечества для облегчения труда была использована энергия атомного ядра.

Строительство первой промышленной атомной электростанции было делом большого коллектива физиков, конструкторов, теплотехников, технологов и других специалистов. Не все шло гладко, были трудности, а иногда и частичные неудачи. Потребовалось глубокое и смелое решение новых задач, настойчивое преодоление серьезных препятствий. К созданию электростанции Советское правительство привлекло различные институты и предприятия, которые вели свою работу на основе широкой кооперации и творческого сотрудничества.

Теперь строительство атомных электростанций у нас

настолько реально, что по шестому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1956—1960 годы предусмотрено создание атомных электростанций общей мощностью 2—2,5 миллиона киловатт.

В нашей стране довольно много районов, значительно удаленных от месторождений угля и нефти. Топливо приходится возить за тысячи километров. Если в этих районах построить угольные станции общей мощностью 2,5 миллиона киловатт, то это повлечет за собой колоссальное увеличение железнодорожных перевозок. В год к этим станциям придется доставлять около 10 миллионов тонн высокосортного угля — примерно 10 тысяч железнодорожных составов!

А годовое потребление ядерного горючего — урана²³⁵ и плутония²³⁹ — атомными станциями той же мощности не превышало бы 3,5 тонны. Таким образом, проблема транспортировки топлива совершенно отпадает.

В районах Сибири богатые водные ресурсы и мощные угольные месторождения позволяют получать дешевую электрическую и тепловую энергию. Однако Европейская часть СССР не так богата энергетическими ресурсами, и в несколько более отдаленном будущем атомная энергия может оказаться весьма существенным и практически неисчерпаемым источником, который в изобилии будет обеспечивать нужды промышленности этой части страны.

Советские ученые создают атомную энергетику, которая, по крайней мере в условиях Европейской части СССР, будет более выгодной, нежели энергетика, основанная на обычном топливе.

В шестом пятилетии (1956—1960 годы) намечается построить пять больших атомных электростанций мощностью 400—600 тысяч киловатт каждая. По-видимому, только такие крупные атомные электростанции способны дать достаточно дешевую энергию. Эти электростанции будут использовать реакторы на медленных нейтронах. В качестве замедлителя будут применяться простая вода и графит.

В реакторах, где простая вода будет служить для замедления нейтронов, топливными элементами являются стержни из двуокиси природного и обогащенного урана с защитной оболочкой. Реактор заключается в стальной толстостенный цилиндр, способный выдержать большое давление. Вода под давлением 100 атмосфер поступает

в реактор, где нагревается до 270—275° С и входит в парогенератор. В парогенераторе первичная вода отдает свое тепло вторичной воде, охлаждается до температуры 250° С и с помощью насосов перекачивается обратно в реактор. Таким образом, первичная вода, двигаясь по замкнутому циклу, образует в парогенераторе пар с давлением 30 атмосфер. Этот пар приводит в действие специальные турбогенераторы по 70 тысяч киловатт каждый. Один реактор будет приводить в действие три турбогенератора.

Одна электростанция будет использовать ядерные реакторы типа аппарата, использованного на первой атомной электростанции СССР. В качестве замедлителя здесь используется графит. Делящимся материалом является обогащенный уран в виде специального сплава. Урановые блоки представляют собой полые цилиндры с внутренней и внешней стальными трубами. Рабочий канал состоит из системы таких блоков, охлаждаемых водой и паром.

В большинстве рабочих каналов тепло отводится водой высокого давления, которая нагревается, кипит и образует насыщенный пар. Этот пар пропускают через остальные каналы, где он отбирает тепло и нагревается до температуры 500° С. Перегретый пар поступает в парогенератор и отдает тепло воде, образуя пар с давлением 90 атмосфер и температурой 480—500° С. На этой атомной электростанции будут работать две турбины мощностью по 100 тысяч киловатт каждая.

Третий тип атомных электростанций, которые будут построены в шестом пятилетии, использует реакторы с замедлением нейтронов тяжелой водой. Рабочие каналы содержат прутки из природного урана, служащего ядерным топливом, и охлаждаются углекислым газом. Углекислый газ передает свое тепло паротурбинному циклу.

В 1959—1960 годах будет введено также в действие несколько экспериментальных атомных электростанций мощностью по 50 тысяч киловатт каждая.

Одна станция будет состоять из реактора на тепловых нейтронах с замедлением кипящей простой водой. Турбина будет работать на слаборадиоактивном паре, идущем прямо из реактора. Эта установка будет обладать более высоким коэффициентом полезного действия и даст возможность значительно снизить рабочее давление

в реакторе по сравнению с обычным реактором, охлаждаемым простой водой.

Будет построена также электростанция, использующая реактор с графитовым замедлителем и с отводом тепла с помощью жидкого натрия. Как уже указывалось, такой теплоноситель позволяет, не прибегая к высокому давлению в реакторе, получить большие температуры в парогенераторе и пар высоких давлений.

Наконец, предполагается сооружение двух станций с размножающими реакторами. Один реактор гомогенного типа, в котором горючее находится в виде тонкого порошка, взвешенного в тяжелой воде. Активная зона реактора будет окружена взвесью порошка тория²³². Второй размножающий реактор будет использовать быстрые нейтроны. Нейтроны, выходящие из активной зоны, будут образовывать во внешней оболочке из урана²³⁸ искусственное ядерное горючее — плутоний²³⁹.

Такова обширная программа ближайших лет по развитию советской атомной энергетики.

При освоении Арктики большую роль играют морские суда особого типа — ледоколы. Редко какой-нибудь пароходный рейс у наших северных берегов обходится без помощи ледокола. Ледокол обычно по нескольку месяцев находится далеко от топливной базы, встречает караваны судов в наиболее опасных местах и прокладывает им путь в тяжелом, а подчас и в сплошном льду. За это время мощный двигатель ледокола поглощает огромное количество топлива, которое доставляется ему специальными грузовыми судами.

В шестом пятилетнем плане развития народного хозяйства СССР предусмотрено строительство ледокола с атомным двигателем.

Советские ученые и судостроители разработали технический проект и завершили сооружение такого корабля, предназначенного для работы в Арктике. Такой ледокол (рис. 72) позволит изменить условия ледового плазания, продлит сроки навигации в северных морях. Судходными станут трассы, проходящие в тяжелых льдах.

Значительно расширятся исследования в Полярном бассейне. И, как знать, может быть, этот ледокол достигнет Северного полюса. Ведь об этом мечтал еще знаменитый русский полярный мореплаватель С. О. Макаров.

Атомный двигатель даст ледоколу ряд преимуществ. При тех же размерах его мощность может превышать мощность ледоколов на химическом топливе в полтора — два раза. Он сможет плавать без захода в порты для бункеровки в десять — двенадцать раз дольше.

В обычных ледоколах около 30 процентов грузоподъемности судна составляют запасы топлива, исчисляемые тысячами тонн. Суточный расход топлива превышает сто тонн. А на атомном ледоколе суточный расход — это граммы «горючего». Поэтому район плавания атомного ледокола почти неограничен.

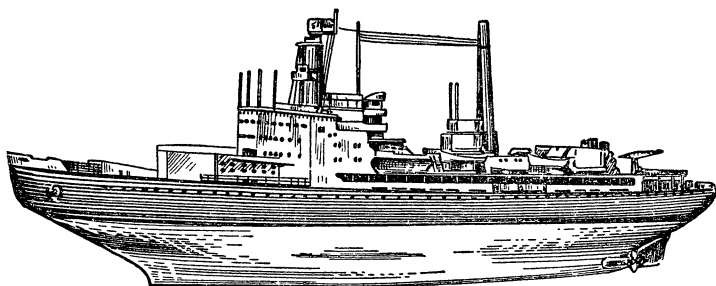


Рис. 72. Модель советского ледокола с атомным двигателем

Кроме того, часть корабля, которая раньше предназначалась для запасов топлива, может теперь использоваться под установку более мощных двигателей и для конструкций, увеличивающих прочность корпуса. Ледокол будет преодолевать льды, которые для обычных ледоколов считаются непроходимыми. Советский атомный ледокол будет иметь главные двигатели мощностью 44 тысячи лошадиных сил. Его водоизмещение составит 16 тысяч тонн.

Общие экспедиционные запасы, которые атомный корабль сможет взять на борт (ядерное топливо, продукты питания и прочее), достаточны, чтобы ледокол в течение года находился в плавании. Там будут созданы все условия для научной работы, труда и культурного отдыха.

Научные работники и экипаж разместятся в очень удобных одноместных и двухместных каютах. На корабле предусматривается кают-компания, салоны, клуб, кино-

установка, читальный зал и медицинские кабинеты, оснащенные современной лечебно-профилактической аппаратурой. Помещения корабля будут совершенно надежно защищены от радиоактивных излучений. Благодаря полной автоматизации управления тяжелый труд кочегаров заменится работой операторов у пульта управления.

В суровых условиях Арктики метеорологическая обстановка очень сложна. Ледоколу придется прокладывать путь в любую погоду: в туман, в снегопад, во мраке полярной ночи. Поэтому он будет снабжен самыми современными навигационными и радиолокационными устройствами и средствами связи. Два вертолета, находящиеся на судне, будут обеспечивать ледовую разведку.

Таким будет первый советский атомный ледокол.

В течение ближайших пяти лет всемерно разовьются работы по дальнейшему использованию радиоактивных изотопов в промышленности, сельском хозяйстве и медицине. Они будут использованы, в частности, для контроля за качеством материалов и изделий, для управления производственными процессами и их автоматического регулирования, а также для диагностики и лечения различных болезней. Метод меченых атомов найдет более широкое применение в промышленности и в научных исследованиях.

Таким образом, шестой пятилетний план предусматривает весьма существенное расширение использования атомной энергии в мирных целях. Атомная энергия будет играть значительную роль в народном хозяйстве Советского Союза.

Атомная энергетика за рубежом. В капиталистических странах развитие атомной энергетики в сильной степени тормозится тем, что оно противоречит интересам крупных нефтяных и угольных монополий. Эти компании, опасаясь снижения потребности в химическом топливе, естественно, всеми методами стараются задержать использование ядерного горючего для мирных, энергетических целей. В связи с этим буржуазные экономисты, ученые и инженеры пытаются обосновать нецелесообразность, например, в США широкого строительства атомных электростанций в ближайшие десятилетия. Этот промежуток времени США намерены использовать только для проведения экспериментов в области производства электрической энергии на атомном горючем. Поэтому доля электрической энергии,

получаемая от атомных электростанций, в общей выработке энергии в США даже в 1965 году будет мала.

В Англии положение несколько иное. Перед этой страной уже сейчас стоит угроза весьма значительного повышения стоимости электроэнергии. Ввиду того что добыча угля почти не увеличивается, цены на уголь растут, а ввоз топлива, естественно, обходится весьма дорого. Поэтому немедленное создание атомных электростанций вызывается экономическими соображениями, и такое строительство уже начато. Предполагается, что вследствие высокой цены на уголь в Англии стоимость энергии уже от этих первых атомных электростанций будет такого же порядка, что и стоимость энергии электростанций, работающих на угле. По намечаемой в Англии программе атомные электростанции должны стать весьма существенным добавлением к существующим источникам энергии. Очевидно, что повышение стоимости обычного топлива наряду со снижением капитальных расходов в электростанциях нового типа весьма скоро сделает атомные электростанции способными конкурировать с угольными электростанциями.

Эти обстоятельства привели к тому, что в Англии (Колдер-Холл) началось строительство первой английской атомной электростанции с двумя урано-графитовыми реакторами с газовым охлаждением. Первая очередь атомной электростанции вступила в строй 17 октября 1956 года. Энергия получается от двух урано-графитовых реакторов. Схема одного из колдер-холлских реакторов приведена на рис. 73. Активная зона реактора сложена из большого числа графитовых блоков, применяемых в качестве замедлителя. В графите имеются вертикально расположенные каналы, в которых помещаются тепловыделяющие урановые элементы и регулирующие стержни. Топливом является естественный уран в виде стержней в металлической оболочке. Реактор заключен в стальной герметический котел диаметром 12 метров, высотой 18 метров, изготовленный из стальных плит толщиной 50 миллиметров. Отвод тепла из реактора осуществляется с помощью углекислого газа, находящегося под давлением 7 атмосфер. Углекислый газ проходит через активную зону, нагревается и отдает свое тепло четырем теплообменникам. В теплообменниках образуется пар высокого давления, приводящий в движение турбины,

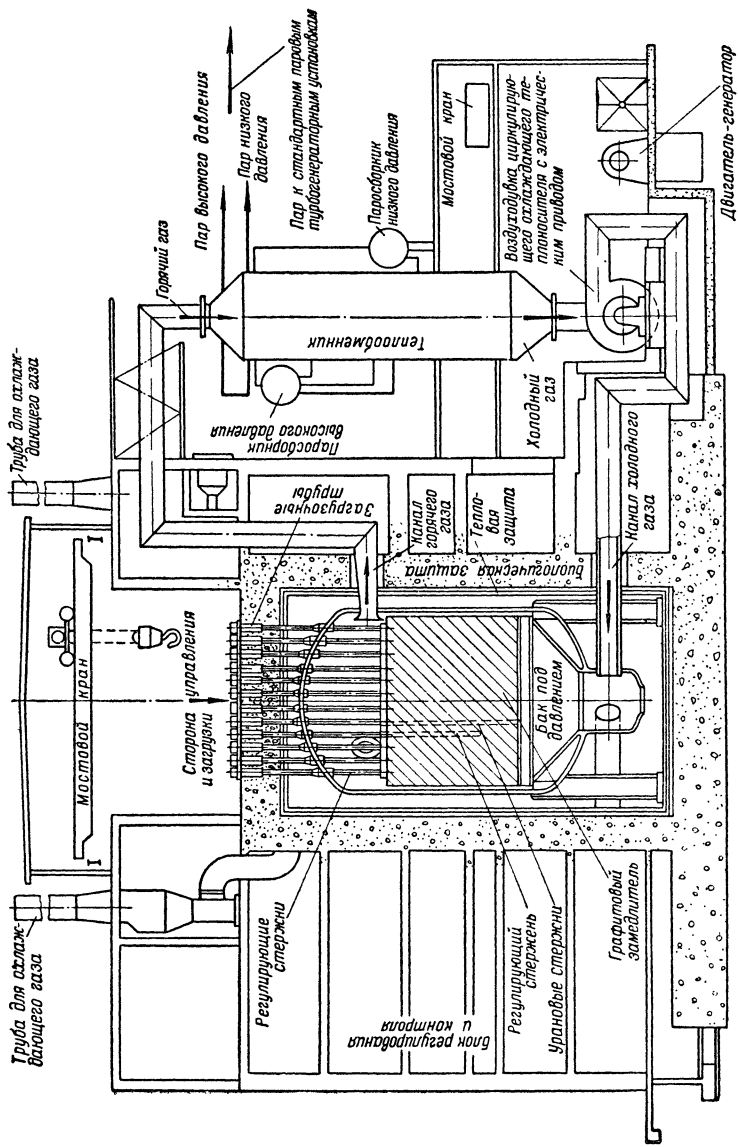


Рис. 73. Схема реактора английской атомной электростанции

связанные с генераторами электрического тока. Общий вид атомной электростанции приведен на рис. 74.

В Англии в районе Аннама в будущем будет построена еще одна атомная станция на четырех реакторах колдерхоллского типа. До 1965 года намечено построить несколько атомных электростанций такого типа общей мощностью 1200—1400 тысяч киловатт.

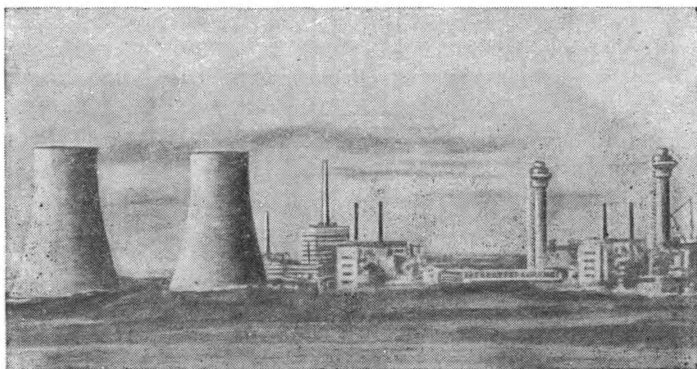


Рис. 74. Общий вид английской атомной электростанции

С марта 1955 года начато строительство второй английской атомной электростанции с реактором на быстрых нейтронах. Станция создается в Даунри, на Северном побережье Шотландии. Установка состоит из бака (рис. 75), в котором помещен реактор на быстрых нейтронах и находится наружная оболочка для воспроизводства ядерного горючего. Активная зона представляет собой цилиндр диаметром и высотой 0,6 метра. Через активную зону прокачивается теплоноситель в количестве, достаточном для отвода 60 тысяч киловатт тепловой мощности. В качестве теплоносителя выбран натрий с некоторым добавлением калия для понижения точки плавления. Контур охлаждения будет целиком выполнен из нержавеющей стали. В схеме предусмотрен теплообменник, в котором тепло первичного теплоносителя передается вторичному, также состоящему из натриево-калиевого сплава. Вторичный теплоноситель не должен быть радиоактивным, поэтому между реактором и теплообменником находится защита

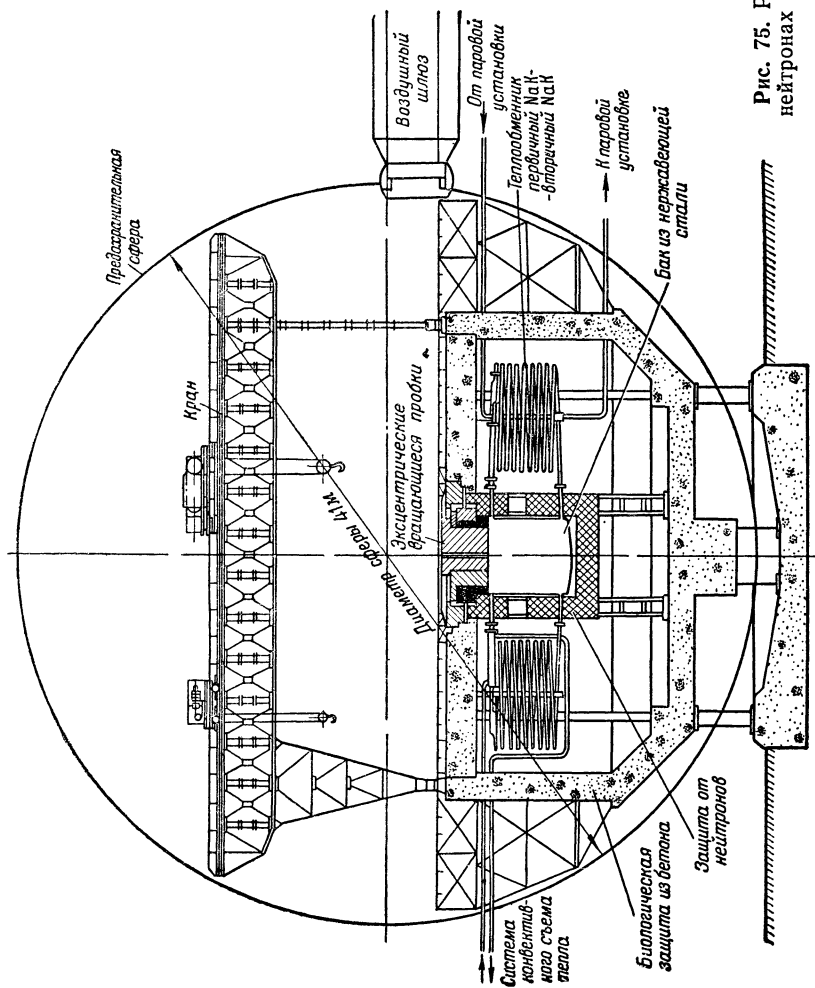


Рис. 75. Реактор на быстрых нейтронах английской станции в Даунри

от нейтронов, выполненная в виде графитовой стены толщиной 1,2 метра, окружающая бак с реактором. Графит содержит бор в количестве, достаточном для поглощения нейтронов после их замедления.

Графит и бак реактора расположены на стальной раме, установленной на бетонное основание, образующее часть биологической защиты. В целом защита представляет собой бетонный бак с внешним диаметром 27,5 метра и высотой 14 метров. Даунрийский реактор будет заключен в сферу диаметром 41 метр, изготовленную из стальных листов толщиной около 2,5 сантиметра. На рис. 76 приведена фотография строительства сферы второй английской атомной электростанции.

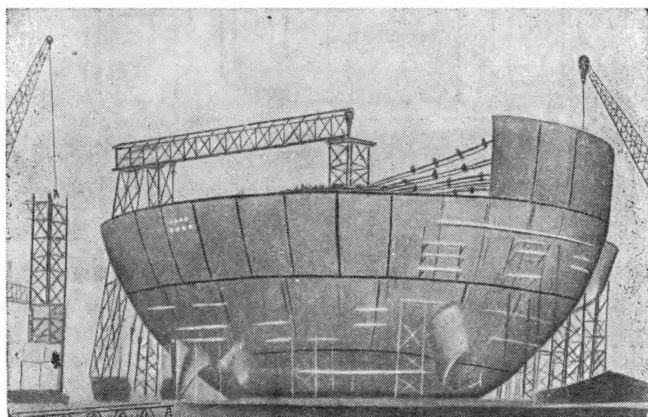


Рис. 76. Строительство сферы для второй английской атомной электростанции

В январе 1956 года во Франции, в Маркуле, был пущен первый в стране энергетический реактор G-1. Этот реактор имеет газовое охлаждение (рис. 77). Атомное горючее состоит из 100 тонн естественного урана, содержащегося в 2700 тепловыделяющих стержнях. Замедлителем служит графит. Кроме электроэнергии, реактор будет вырабатывать плутоний — около 13 килограммов в год. Тепловая мощность реактора — 40 тысяч киловатт, а электрическая — 5 тысяч киловатт. Малый коэффициент полезного действия объясняется низкой температу-

рой газового теплоносителя на выходе из реактора — всего около 220°C . Естественно, что реактор нельзя рассматривать как атомную электростанцию, поскольку ее мощность недостаточна, чтобы обеспечить потребление энергии циркуляционных газовых насосов (около 5,6 тысячи киловатт). Основное назначение этой станции состоит в том, чтобы приобрести технический опыт, на ко-

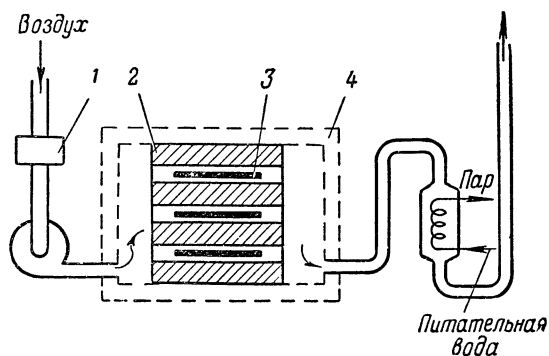


Рис. 77. Французский энергетический реактор G-1:
1 — фильтр; 2 — графит; 3 — уран; 4 — защита

тором можно было бы разработать проект промышленной атомной электростанции. Проект такой станции разрабатывается французским комиссариатом по атомной энергии; ее предполагается построить в Маркуле. В каждом из двух реакторов этой атомной электростанции в качестве горючего используется 100 тонн естественного урана. Замедлителем служит графит, теплоносителем — углекислый газ. Проектная электрическая мощность атомной электростанции — 40 тысяч киловатт. Кроме электроэнергии, два реактора электростанции будут производить около 100 килограммов плутония в год. Пуск станции предполагается в 1957 году.

В Канаде, в 150 милях от Оттавы, намечено построить первую канадскую атомную электростанцию. Схема реактора электростанции (реактор NPD) приведена на рис. 78. В качестве замедлителя и теплоносителя будет применена тяжелая вода под давлением. На территории, занимаемой станцией, будут размещены реактор с парогенератором и насосом, перерабатывающий ядерное горючее завод и турбогенераторы. Реактор и парогенера-

торы помещаются в бетонированном котловане. Отдельная защита ставится между реактором и парогенератором. Активная зона реактора заключена в цилиндрический сосуд с полусферическим дном. Тяжелая вода

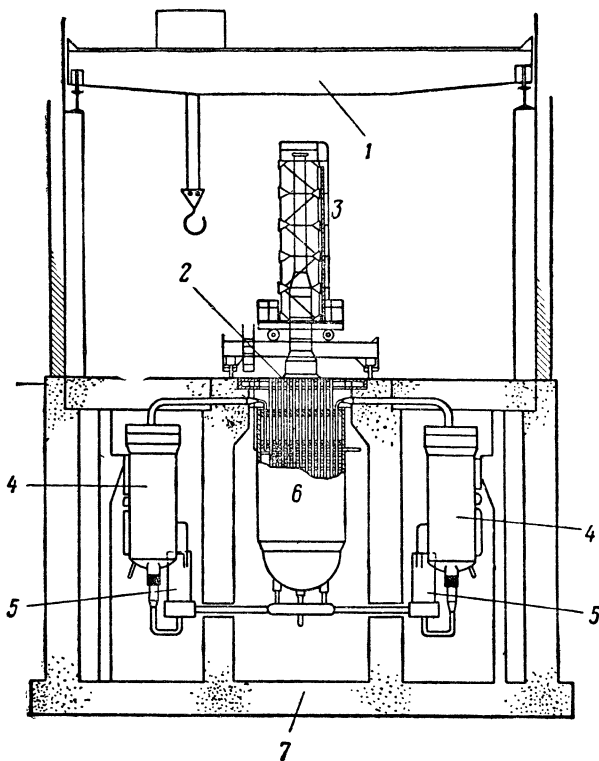


Рис. 78. Схема реактора NPD канадской атомной электростанции:

- 1 — мостовой кран; 2 — каналы для горючего; 3 — манипулятор;
 4 — парогенератор; 5 — насос для тяжелой воды; 6 — реактор;
 7 — бетонная защита

используется в реакторе в двух контурах: в контуре теплоносителя и контуре замедлителя. Теплоноситель из реактора поступает в парогенераторы, где отдает свое тепло, образуя сухой насыщенный пар. Замедлитель проходит через специальный теплообменник, где он охлаждается обычной водой. В реакторе NPD не будет регули-

рующих стержней. Реактивность аппарата будет поддерживаться на определенном уровне с помощью изменения количества замедлителя в системе. Строительство атомной станции в Канаде должно быть завершено в 1958 году.

В Соединенных Штатах Америки впервые преобразование ядерной энергии в электрическую было произведено на уже описанном в предыдущей главе опытном размножающем реакторе EBR. Основной целью сооружения этого реактора было экспериментальное исследование принципов системы размножающего реактора на быстрых нейтронах. Поэтому не было обращено внимание на получение достаточно высокого коэффициента полезного действия установки. Этот коэффициент был равен приблизительно 17 процентам, и от реактора с тепловой мощностью 1400 киловатт получалось не больше 200 киловатт электрической энергии. Схема реактора EBR приведена на рис. 79. Тепло от натриевого теплоносителя

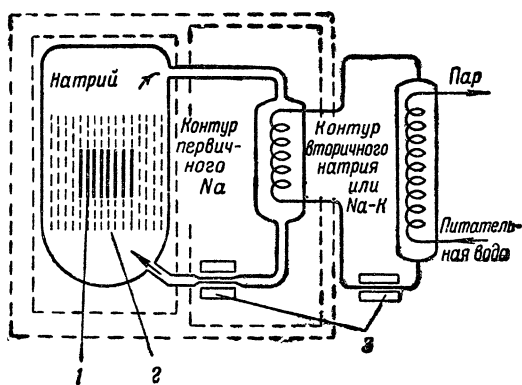


Рис. 79. Схема реактора EBR:

1 — активная зона из делящегося материала; 2 — зона воспроизводства; 3 — электромагнитные насосы

передается в теплообменнике вторичному, тоже натриевому, теплоносителю. Вторичный теплоноситель поступает в парогенератор, где образуется сухой пар при давлении 28 атмосфер. Циркуляция металла в первичном и вторичном контурах осуществляется с помощью специальных электромагнитных насосов. Общее расположение аппаратуры размножающего реактора EBR показано на схеме рис. 80.

Основываясь на опыте работы реактора EBR, американцы строят второй экспериментальный размножающий реактор — EBR-II тепловой мощностью 60 тысяч киловатт, который должен быть закончен в 1958 году. Как

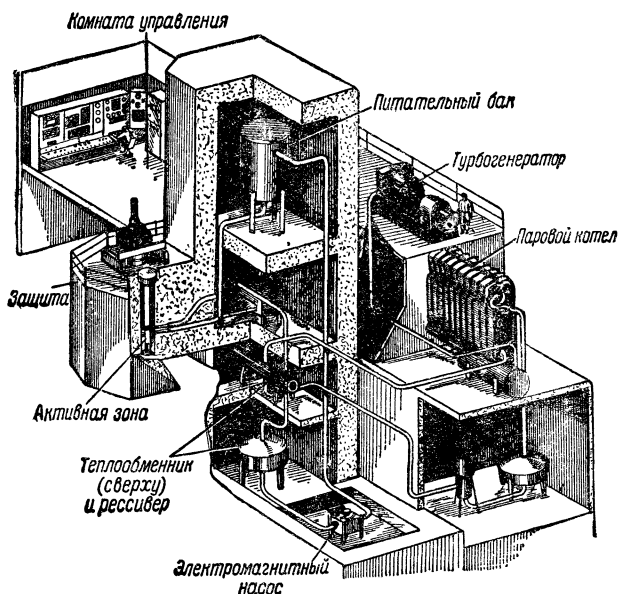


Рис. 80. Расположение аппаратуры реактора EBR

видно из рис. 81, весь реактор вместе с электромагнитным насосом первого контура, первичным теплообменником и хранилищем для тепловыделяющих элементов (на рисунке не показано) погружается в большой бак, наполненный жидким натрием. Ни при каких авариях уровень жидкого натрия не может падать ниже верхнего уровня активной зоны реактора. В случае аварии большая теплоемкость натрия, заполняющего бак, позволяет поглотить большое количество тепла и охладить реактор естественной конвекцией. В случае остановки реактора топливные тепловыделяющие элементы могут немедленно заменяться, так как во время перемещения из активной зоны реактора в хранилище они все время охлаждаются жидким натрием. Таким образом, гарантируется удаление значительного количества тепла, выделяющегося при

радиоактивном распаде продуктов деления, содержащихся в заменяемом топливном элементе. Хотя промежуточный теплообменник и расположен очень близко к реактору, но благодаря наличию защиты от нейтронов вокруг реактора натрий во вторичном контуре не становится радиоактивным. Таким образом, единственной частью установки, требующей защиты, является сам бак с натрием. Предполагается, что реактор EBR-II будет объединен с установкой для металлургической обработки старых топливных элементов. Установлено, что 90 процентов продуктов деления выходят в шлак при расплавлении ядерного горючего. Поэтому когда старые топливные элементы будут освобождены от оболочки и расплавлены, то после удаления шлака в топливе останется всего 10 процентов примесей. Эти примеси при работе реактора на быстрых нейтронах не так вредны, поскольку они слабо поглощают быстрые нейтроны. Когда вместо выгоревшего делящегося материала будет добавлено соответствующее количество плутония, из полученной смеси можно изготовить новые топливные элементы для использования в реакторе.

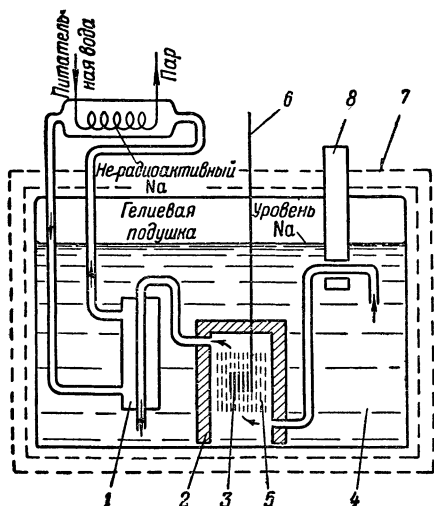


Рис. 81. Схема реактора EBR-II:

1 — первичный теплообменник; 2 — нейтронная защита; 3 — активная зона; 4 — герметический бак с натрием; 5 — зона воспроизводства; 6 — регулирующая стержень; 7 — защита от гамма-излучения; 8 — объединенный униполярный генератор и электромагнитный насос

Для электромагнитных насосов, перекачивающих жидкий натрий, необходим электрический ток огромной силы (до 250 000 ампер). Поэтому для реактора EBR-II разработан специальный агрегат, состоящий из особой конструкции генератора и непосредственно связанного с

с натрием. Предполагается, что реактор EBR-II будет объединен с установкой для металлургической обработки старых топливных элементов. Установлено, что 90 процентов продуктов деления выходят в шлак при расплавлении ядерного горючего. Поэтому когда старые топливные элементы будут освобождены от оболочки и расплавлены, то после удаления шлака в топливе останется всего 10 процентов примесей. Эти примеси при работе реактора на быстрых нейтронах не так вредны, по-

ним электромагнитного насоса постоянного тока, причем насос полностью погружен в натрий.

Интересный проект реактора с жидко-металлическим топливом (LMFR) был доложен делегацией США на Женевской конференции. Этот проект находится в настоящее время в стадии предварительного экспериментального и конструктивного изучения. В этом реакторе будет применяться в качестве ядерного горючего сплав висмута и урана в жидком состоянии. Схема реактора приведена на рис. 82.

Ядерный реактор состоит из активной зоны. Она включает графит в качестве замедлителя, сквозь который протекает сплав висмута с ураном 233 . Проходя через активную зону, жидкий сплав нагревается до температуры 550°C и отдает свое тепло в теплообменник вторичному натриевому теплоносителю. Натриевый теплоноситель, попадая в парогенератор, образует там сухой пар при давлении 88 атмосфер.

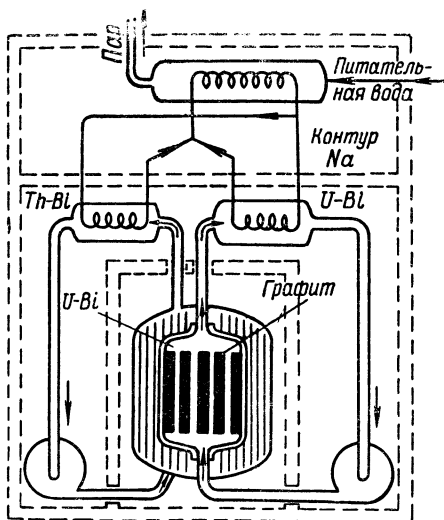


Рис. 82. Схема реактора LMFR

Активную зону окружает зона воспроизводства, по которой протекает жидкий сплав висмута с торием. При поглощении торием нейтронов образуется опять уран 233 . Горячий ториево-висмутовый сплав отдает свое тепло через натриевый теплоноситель во втором теплообменнике парогенератору. Преимущества жидкого ядерного горючего обсуждались нами в предыдущей главе. Это прежде всего непрерывная очистка горючего и возможная замена его без остановки реактора. Однако на этом пути имеется еще много трудностей. Основные технические затруднения связаны с коррозией металлов, из которых состоят конструкции, соприкасающиеся с жидким радио-

активным горючим. Кроме того, многие из новых предлагаемых технических вариантов оборудования не проходили испытаний в большом масштабе. Поэтому авторы проекта считают, что реактор LMFR сможет быть пущен не ранее 1960 года.

Военно-морской флот США пополнился первой атомной подводной лодкой, получившей название «Наутилус» (рис. 83). Водоизмещение лодки 2700 тонн.

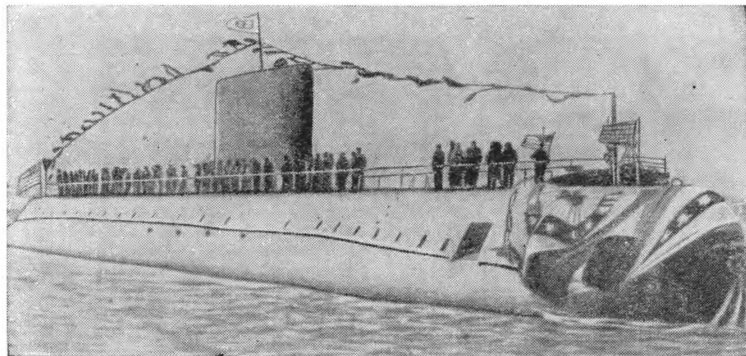


Рис. 83а. Американская подводная лодка «Наутилус»

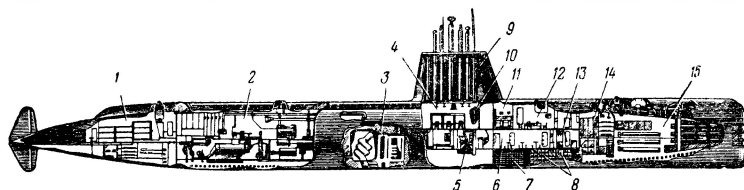


Рис. 83б. Разрез «Наутилуса»:

1 — кубрики для команды; 2 — машинное отделение; 3 — реактор; 4 — боевая рубка; 5 — рубка управления; 6 — столовая для команды; 7 — аккумуляторная; 8 — кладовые; 9 — мостик; 10 — перископная; 11 — каюта командира; 12 — офицерская кают-компания; 13 — камбуз; 14 — кубрики для команды; 15 — торпедный отсек

Источником энергии служит ядерный реактор на тепловых нейтронах типа STR, уже описанный нами в предыдущей главе. В качестве замедлителя и первичного теплоносителя используется обычная вода под высоким давлением. Вода проходит последовательно через активную зону реактора и теплообменник. Вторичная вода, находя-

щаяся в теплообменнике, превращается в пар, используемый для работы паровых турбин. Силовое оборудование подводной лодки размещено в двух отсеках. В одном отсеке установлены ядерный реактор и теплообменник. В машинном отделении находятся две паровые турбины, здесь же размещены турбогенераторы, снабжающие подводную лодку электроэнергией, и главный пульт управления механизмами машинного и реакторного отсеков. В случае аварии двигатель подводной лодки может работать от аккумуляторной батареи или от генератора, приводимого в движение дизелем. Безопасность команды при работе реактора обеспечивается специальной защитой. По рекламным сообщениям американской печати, эта защита якобы настолько эффективна, так снижает интенсивность излучения, что члены экипажа при непрерывном многолетнем плавании получают меньшую дозу излучения, чем они получают за свою жизнь в результате действия космических лучей и естественной радиоактивности земли. «Наутилус» снабжен специальными приборами, контролирующими радиоактивные излучения. Приборы реагируют на повреждение труб в теплообменнике, предупреждают о проникновении радиоактивного теплоносителя первичного контура в незащищенный паровой контур. Индикаторы радиоактивности могут обеспечить невозможность спуска радиоактивной воды во время стоянки в доке или других местах, где это создает опасность для людей.

21 июля 1955 года в США была спущена на воду вторая подводная лодка—«Морской волк»—с атомным двигателем. Водоизмещение лодки—3260 тонн, длина—около 100 метров и диаметр—9,15 метра. Реактор подводной лодки работает на промежуточных нейтронах. В качестве горючего используется обогащенный уран. Замедлителем служит графит, теплоносителем—жидкий натрий. США строят еще семь различных подводных лодок с атомным двигателем.

Создание атомных двигателей для транспортных установок—задача более трудная, нежели строительство стационарных энергетических установок. Эти трудности связаны главным образом с весом и размером биологической защиты реактора. Для крупных кораблей эти трудности вполне преодолимы, так как размеры судов довольно велики. Английская фирма «Роллс-Ройс» предло-

жила один из типов атомных двигателей для больших морских судов. Реактор охлаждается жидким натрием. Для превращения ядерной энергии в электрическую используется газовая турбина низкого давления. В качестве рабочего газа используется гелий. Гелий имеет значительные преимущества перед воздухом вследствие очень малого поглощения нейтронов и более высокой теплопроводности. Схема атомного двигателя приведена на рис. 84.

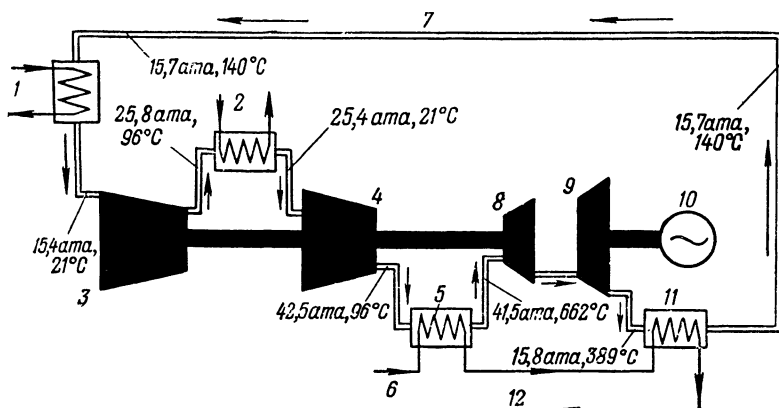


Рис. 84. Схема атомного двигателя для морских судов:

1 — предварительное охлаждение газа; 2 — промежуточное охлаждение газа; 3 — компрессор низкого давления; 4 — компрессор высокого давления; 5 — вторичный теплообменник; 6 — к первичному теплообменнику; 7 — гелиевый контур газовой турбины с замкнутым циклом; 8 — турбина компрессора; 9 — турбина низкого давления; 10 — нагрузка; 11 — теплообменник для возврата тепла в первичный контур; 12 — первичный натриевый контур

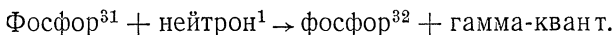
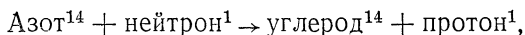
Гелий при температуре 21°C и давлении 15,4 атмосферы поступает в компрессор низкого давления, затем проходит через промежуточный холодильник, откуда попадает в компрессор высокого давления. Сжатый до 42,5 атмосферы при температуре 96° С гелий направляется во вторичный теплообменник, где нагревается до температуры 662° С. Нагретый газ проходит через две последовательно соединенные турбины. Часть энергии он отдает турбине, приводящей в движение компрессоры и турбину низкого давления, соединенную с валом — винтом корабля или генератором электрической энергии. Мощность на валу 11 000 киловатт. После главной турбины гелий

отдает свое остаточное тепло теплообменнику включенного в контур жидкого натрия, охлаждающего реактор. В конечном счете остаточная энергия газа после турбины используется во вторичном теплообменнике для нагревания рабочего газа.

За последнее время в ряде стран проводятся исследования, направленные на создание самолета с атомным двигателем. Задачи, возникающие при конструировании самолетов с атомным двигателем, являются, по-видимому, наиболее трудными за всю историю самолетостроения. Основные трудности связаны с отводом тепла от реактора и эффективным использованием его в различных двигателях: турбовинтовых, турбореактивных и ракетных, а также с необходимостью уменьшить вес и габариты биологической защиты. Вместо защиты, общей для реактора и двигателя, американцы, например, предполагают использовать раздельную защиту. США располагают опытным самолетом (В-36), на котором установлен экспериментальный ядерный реактор. Для обеспечения безопасности населения реактор работает только в то время, когда самолет пролетает над специально отведенной (безлюдной) территорией в штате Техас. Взлет и посадка совершаются с остановленным реактором. Приняты меры предосторожности, исключающие возможность взрыва реактора даже в случае аварии самолета. Кроме того, в США проходят стендовые испытания опытный реактор для самолетного двигателя. Тепловыделяющие элементы сделаны из окиси урана, заключенной в контейнеры из нержавеющей стали. Температура этих элементов при работе реактора достигает 1000°C . Замедлителем служит вода, теплоносителем — воздух, подаваемый непосредственно в газовую турбину. Преимуществами такого типа реактора являются: небольшой вес, высокая температура и относительно низкое давление теплоносителя. К недостаткам следует отнести: низкий коэффициент теплоотдачи, радиоактивность воздуха, делающая турбину недоступной для обслуживания, большое количество прокачиваемого воздуха. Исследования показывают, что нет пока полной уверенности в надежной работе реактора. Расходы, связанные с этими работами, в США достигают многих миллионов долларов. Аналогичные исследования проводятся в Англии, Франции и других странах.

ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Получение радиоактивных веществ в ядерных реакторах. Почти все химические элементы при облучении их в ядерном реакторе поглощают тепловые нейтроны и превращаются в радиоактивные изотопы. Так, например, могут быть получены радиоактивные углерод и фосфор:



Периоды полураспада углерода¹⁴ и фосфора³² соответственно равны 5700 лет и 14,3 дня.

Сильной радиоактивностью обладает кобальт⁶⁰, который может быть получен в больших количествах в работающем ядерном реакторе. Если положить в активную зону реактора средней мощности пластинку кобальта, имеющую площадь 10 квадратных дециметров, то через сутки в пластинке накопится около двух граммов радиоактивного кобальта. Надо иметь в виду, что два грамма кобальта⁶⁰ эквивалентны по своей радиоактивности примерно двум килограммам радия. Подобным путем можно получить радиоактивные изотопы железа, кальция, натрия и других веществ.

Шлак, получающийся при работе ядерного реактора («осколки» деления ядер урана), содержит также большое количество радиоактивных веществ. Эти продукты представляют собой смесь различных радиоактивных изотопов с различным временем жизни. Радиохимики научились их «сортировать», выделяя наиболее ценные компоненты смеси. Количество различных радиоактивных изотопов и их активность наглядно иллюстрированы табл. 4.

Остальные продукты деления составляют изотопы с очень малым периодом полураспада.

Таким образом, один грамм радиоактивного шлака эквивалентен по своей активности 44,4 килограмма радия.

Таблица 4

Продукты деления ядер урана с большим периодом полураспада
(долгоживущие), получающиеся в ядерном реакторе

Атомный номер	Радиоактивный изотоп	Символ	Выход изотопа при делении урана, %	Период полураспада	Максимальная энергия электронов, Мэв	Энергия гамма-лучей, Мэв	Один грамм радиоактивного изотопа эквивалентен по активности граммам радия
36	Криптон ⁸⁵	Kr ⁸⁵	0,24	9,4 года	0,74	—	460
38	Стронций ⁸⁹	Sr ⁸⁹	4,6	54,5 дня	1,463	—	27 700
	Стронций ⁹⁰	Sr ⁹⁰	5,0	25 лет	0,61	—	163
39	Иттрий ⁹¹	Y ⁹¹	5,9	61 день	1,537	—	24 200
40	Цирконий ⁹⁵	Zr ⁹⁵	6,4	65 дней	0,394	0,23	21 700
					1,0	0,73	
43	Технеций ⁹⁹	Te ⁹⁹	6,2	4,7 · 10 ⁵ лет	0,32	—	0,0078
44	Рутений ¹⁰³	Ru ¹⁰³	3,7	45 дней	0,3	0,56	28 800
					0,8		
	Рутений ¹⁰⁶	Ru ¹⁰⁶	0,5	290 дней	0,03	—	4 350
52	Теллур ¹²⁹	Te ¹²⁹	0,19	32 дня	1,8	0,3	32 500
					0,8		
53	Иод ¹³¹	I ¹³¹	2,8	8 дней	0,250	0,08	128 000
					0,605	0,284	
						0,364	
						0,637	
54	Ксенон ¹³³	Xe ¹³³	6,0	5,3 дня	0,3115	0,082	190 000
						0,084	
						0,095	
						0,236	
55	Цезий ¹³⁷	Cs ¹³⁷	6,0	10 лет	0,521	—	180
					1,19		
56	Барий ¹⁴⁰	Ba ¹⁴⁰	6,1	12,7 дня	0,48	0,529	75 000
					1,022		
58	Церий ¹⁴¹	Ce ¹⁴¹	6,0	30,6 дня	0,44	0,146	31 000
					0,56	0,315	
	Церий ¹⁴⁴	Ce ¹⁴⁴	5,3	275 дней	0,348	—	3 400
					2,97		
					3,07		
59	Празеодим ¹⁴³	Pr ¹⁴³	6,0	13,5 дня	1,0	—	69 000
60	Неодим ¹⁴⁷	Nd ¹⁴⁷	2,6	11,1 „	0,4	0,58	82 000
					0,9		
61	Прометий ¹⁴⁷	Pm ¹⁴⁷	2,6	3,7 года	0,223	—	675

Радиоактивность продуктов деления, полученных в ядерном реакторе, уменьшается со временем, однако, как показано в табл. 5, она остается высокой даже через два года после выгрузки шлама из ядерного реактора.

Таблица 5
Радиоактивность продуктов деления урана, образовавшихся в результате длительной работы ядерного реактора

Время после выгрузки продуктов деления из ядерного реактора, в днях	Относительная активность продуктов деления, %
10	100,0
50	33,0
100	16,0
150	11,0
200	8,0
250	6,3
300	5,3
350	4,3
400	3,8
450	3,3
500	3,0
550	2,8
600	2,6
650	2,4
700	2,2
750	2,0

За одну неделю даже маломощный ядерный реактор может произвести столько радиоактивных веществ, что их радиоактивность будет эквивалентна нескольким килограммам радия.

На службе человеку. Естественные радиоактивные вещества, такие, например, как радий, уже сравнительно давно находят применение в медицине и технике. Сейчас, когда мы имеем возможность получать радиоактивные препараты в очень больших количествах, они с каждым днем все шире используются в самых различных областях народного хозяйства: в промышленности, сельском хозяйстве, биологии, медицине и т. д.

Рассмотрим некоторые примеры использования радиоактивных изотопов.

Радиоактивный изотоп кобальт⁶⁰ испускает глубоко проникающие гамма-лучи, которые могут просвечивать толстые стальные детали. На рис. 85 приведен советский

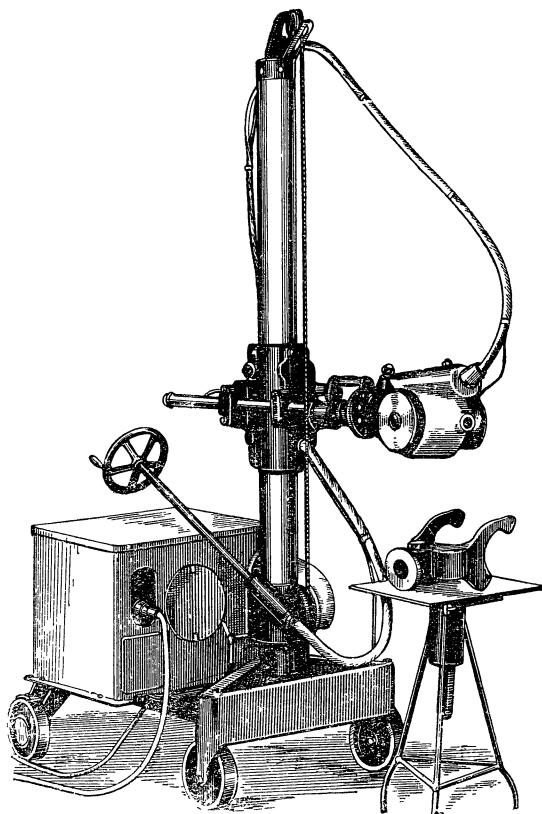


Рис. 85. Аппарат ГУП-Со-50 для просвечивания толстых металлических изделий. Маленькая ампула радиоактивного кобальта заменяет мощную рентгеновскую установку

аппарат для просвечивания ГУП-Со-50. Здесь используется препарат кобальта⁶⁰ с активностью, равноценной 50 граммам радия. Эта установка сейчас широко применяется для контроля качества выпускаемых изделий на

машиностроительных заводах. Она позволяет находить совершенно незаметные на глаз раковины и трещины в ответственных деталях. Эти дефекты, если их вовремя не обнаружить и не устранить, могут привести к серьезным авариям и поломкам станков и машин.

Маленькие ампулы кобальта⁶⁰ не только заменяют громоздкие рентгеновские установки, но и дают возможность исследовать внутреннее строение сложных конструкций. Ампулу с препаратом кобальта⁶⁰ можно поместить в канале толстостенных труб, в узком пространстве между стальными плитами и в других местах: ампула очень мала по сравнению с высоковольтной рентгеновской трубкой.

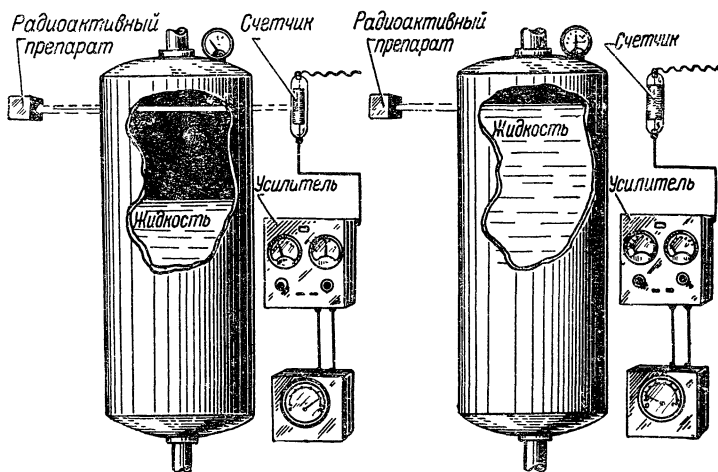


Рис. 86. Определение уровня жидкости в баке с помощью радиоактивного излучения. Поднявшаяся жидкость поглощает гамма-лучи, испускаемые кобальтом⁶⁰. Изменение интенсивности излучения регистрируется счетчиком

С помощью радиоактивного препарата можно не только находить изъяны в металлических изделиях, но и контролировать заполнение баков, цистерн, трубопроводов.

Можно, например, по поглощению гамма-лучей радиоактивного кобальта определить уровень заполнения большого бака (рис. 86). Счетчик Гейгера-Мюллера считает импульсы, вызываемые проходящими сквозь пустой бак

гамма-квантами. Как только бак заполнится выше определенного уровня, гамма-лучи будут поглощаться в веществе и число импульсов, регистрируемых счетчиком, сразу станет значительно меньше. Счетчик Гейгера-Мюллера можно связать с автоматическим устройством, которое будет прекращать подачу жидкости в бак после того, как он будет заполнен до определенного уровня.

По поглощению гамма-лучей можно также следить за уровнем жидкости в котле по мере ее расходования.

Сейчас строительство любой крупной гидроэлектростанции не обходится без землесосных снарядов. Эти мощные машины, заменяя труд сотен тысяч людей, добывают и перемещают грунт по трубам на очень большое расстояние. Производительность такой машины зависит от соотношения воды и грунта в смеси, идущей по трубам. Если в трубах будет больше воды, чем грунта, то землесосный снаряд будет работать непроизводительно, то есть мало отсасывать грунта. Если же будет больше грунта, то в трубах будут образовываться «забои» и «пробки», останавливающие движение смеси по трубам и вызывающие простой машины. Советскими учеными был разработан способ, позволяющий производить непрерывный контроль за содержанием в перекачиваемой земснарядом смеси грунта и воды, или плотностью так называемой пульпы.

На поверхности трубы (рис. 87) диаметром около метра, внутри которой мчится невидимый поток пульпы, помещается радиоактивный источник — кобальт⁶⁰. Испускаемые кобальтом гамма-лучи проникают сквозь толстые стальные стенки трубы и слой пульпы. Часть из них поглощается протекающей по трубе массой, а выходящие из трубы регистрируются счетчиком. По поглощению гамма-лучей в трубе определяется плотность пульпы. Если из трубы выходит слабый поток гамма-лучей, то, очевидно, плотность слишком велика, в пульпе излишнее количество грунта. При большом количестве воды поглощение будет слабым и счетчик будет считать очень интенсивно. Результаты этого непрерывного контроля передаются по проводам к пульту управления землесосного снаряда.

Иногда во время работы в трубах земснаряда образуется пробка из грунта. Для того чтобы ее обнаружить, не надо разбирать трубопровод. Передвигая радиоактив-

ный источник со счетчиком, можно по резкому изменению поглощения определить местонахождение пробки.

С помощью радиоактивных препаратов можно очень точно измерять и контролировать толщину изготавливаемых

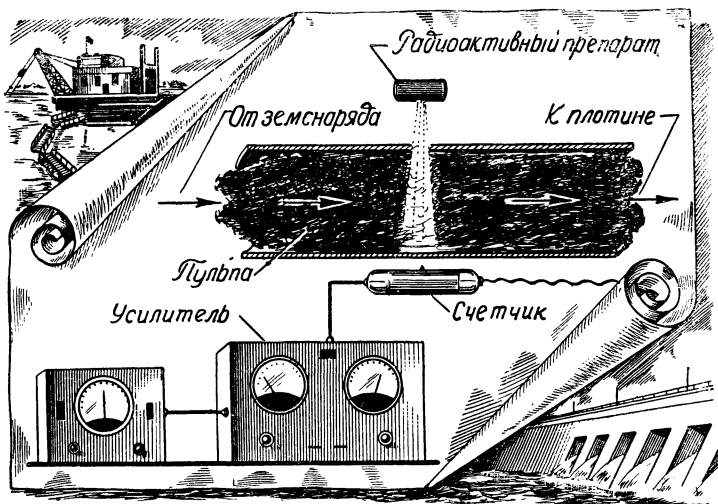


Рис. 87. Контроль плотности пульпы в земснаряде

пленок различного материала. Пленка перемещается между радиоактивным препаратом, излучающим электроны, и счетчиком Гейгера-Мюллера (рис. 88). Поглощаемая

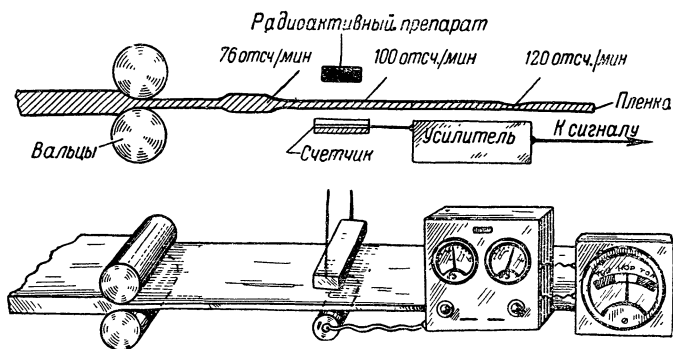


Рис. 88. Схема измерения толщины пленки радиоактивным препаратом

в пленке доля электронов зависит от ее толщины. Увеличение толщины приводит к уменьшению счета электронов счетчиком, так как увеличивается поглощение электронов в пленке. Ценным в этом методе является то, что измерение не приводит к порче поверхности пленки, так как пленка не соприкасается с измерительным прибором. Соединив счетчик Гейгера-Мюллера с радиотехнической схемой управления, можно автоматизировать производство пленок. Счетчик может управлять работой аппарата, изготовляющего пленку, и поддерживать заданную толщину.

Установлено, что большие дозы гамма- и бета-лучей убивают микроорганизмы. Это может быть с большим успехом использовано в пищевой промышленности для консервирования различных продуктов. Уничтожение микроорганизмов, вызывающих порчу продуктов, то есть стерилизация консервов, до сих пор производится в больших котлах (автоклавах) при высоком давлении и высокой температуре. Это ухудшает вкусовые и питательные свойства продуктов. Сейчас можно холодные консервы после герметизации подвергать интенсивному облучению радиоактивными веществами. Гамма-лучи, проникая через железную или стеклянную оболочку консервной банки, стерилизуют продукты. Так, можно сохранять в естественном виде мясо, овощи, фрукты. Для стерилизации консервов особенно целесообразно использовать отходы ядерных реакторов — «осколки» ядер расщепляющихся материалов.

Ежегодно миллионы тонн самых различных овощей поступают в овощехранилища. Эти огромные массы ценных продуктов надо хранить в течение всей зимы, весны и части лета, пока не будет получен новый урожай. Хранение овощей обходится очень дорого и не всегда проходит успешно. Надо не только уберечь, например, картофель от мороза и гниения, но и от прорастания. В ростки уходит все, что придает картофелю вкус и питательность. Уже довольно давно было известно, что задержать прорастание картофеля можно с помощью рентгеновских лучей. Но рентгеновские установки дороги, и вряд ли возможно облучить миллионы тонн картофеля рентгеновскими лучами.

И вот был найден источник облучения, который не требовал никакого ухода, был дешев и прост в обращении

нии. Этим источником оказался радиоактивный кобальт. Облученный гамма-лучами кобальта⁶⁰, картофель может храниться годы без прорастания. На рис. 89 приведены клубни картофеля, которые пролежали в хранилище полтора года. Клубни справа и посередине получили различные дозы радиоактивного облучения. Наилучшие результаты дало облучение, длившееся 60 дней.

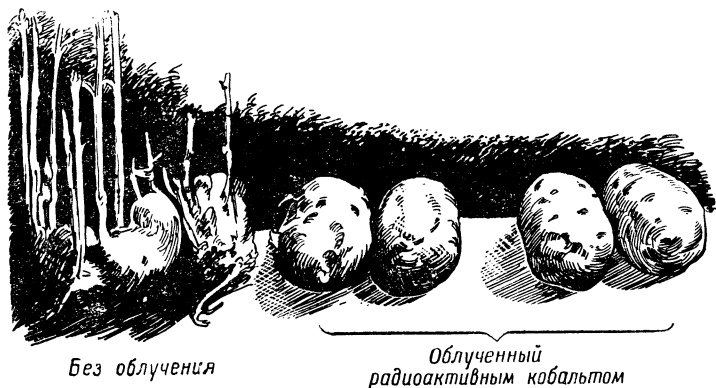


Рис. 89. Клубни картофеля, пролежавшие полтора года в овощехранилище

После такого облучения картофель сам не становится радиоактивным: гамма-лучи кобальта⁶⁰ не вызывают искусственной радиоактивности. Происходит лишь усыпление, задержка жизненных процессов в картофеле. Облученный картофель, высаженный весной в почву, прорастает с некоторым запозданием, но дает не меньший урожай, чем обычный картофель. Аналогичные результаты получаются при облучении лука.

Малые дозы радиоактивного облучения семян различных растений часто вызывают бурное развитие ростков, что может дать значительное повышение урожая, иногда достигающее 20 процентов.

Хорошо известно, какую большую роль в свое время сыграли рентгеновские лучи и лучи радия для лечения злокачественных опухолей. Получение искусственных радиоактивных веществ открыло перед медициной неизмеримо большие возможности. Малодоступный радий теперь заменяется дешевым и более эффективным кобальтом⁶⁰ и другими радиоактивными изотопами.

Для лучевой терапии в настоящее время применяют разработанные советскими учеными телерадиевые установки. Они представляют собой свинцовую камеру, в которую вложен препарат радиоактивного кобальта. Открытое отверстие свинцовой камеры может быть направлено на подлежащую облучению ткань. Специальный механизм позволяет передвигать и наклонять тяжелый аппарат, посылая гамма-лучи кобальта⁶⁰ в нужном направлении. На рис. 90 показано, как происходит облучение

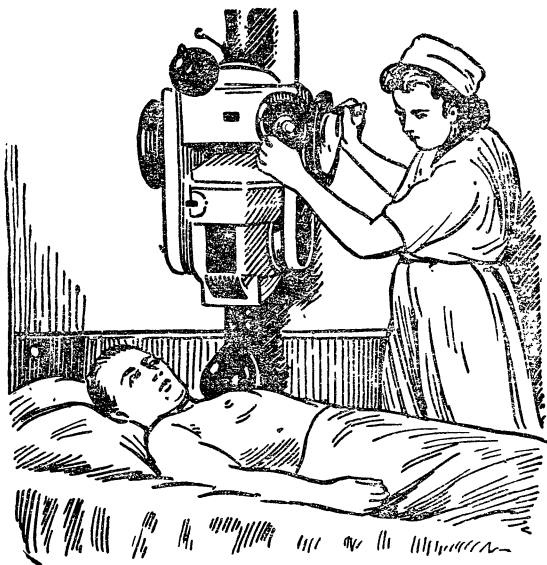


Рис. 90. Облучение больного телерадиевой установкой

больного телерадиевой установкой. Лучевое лечение является ценным средством борьбы против опухолевых заболеваний, облучение полезно и после операции, так как гамма-лучи уничтожают те опухолевые клетки, которые остались после операции. Во многих же случаях облучение избавляет больного от операции.

Внешнее облучение — не единственный метод лечения радиоактивными препаратами. Эти вещества могут вводиться и внутрь организма. Для этой цели естественные радиоактивные вещества не пригодны, так как, обладая

большим периодом полураспада и задерживаясь в организме уже после разрушения опухолей, могут сами произвести неизлечимые поражения тканей. В медицинской практике для введения внутрь организма используются искусственные радиоактивные вещества. У многих из них период полураспада измеряется не столетиями и не годами, а часами и днями. Такие вещества, разрушая клетки опухоли за короткое время своего действия, не успевают причинить ущерб здоровым тканям.

Различные вещества (металлы или металлоиды) обладают способностью накапливаться в определенных органах человека. Фосфор, например, концентрируется в костях, иод — в щитовидной железе. Некоторые радиоактивные изотопы, концентрируясь в тканях опухолей, интенсивно их разрушают. Достаточно принять внутрь несколько миллиграммов радиоактивного фосфора, иода или другого вещества, чтобы они, попадая в тот или иной орган, начали свое лечебное действие.

Радиоактивный фосфор применяется для лечения болезни крови. Особенно хороший эффект он дает при лечении полицитемии — заболевания, заключающегося в том, что в крови образуется излишнее количество красных кровяных шариков, приводящее к сгущению крови. Даже один прием внутрь небольшого количества радиоактивного фосфора прерывает болезнь и приводит к значительному улучшению состояния больного.

Радиоактивный иод применяют при усиленной деятельности щитовидной железы, так называемом териотоксикозе. Больному дают выпить раствор, содержащий небольшое количество радиоактивного иода, который через непродолжительное время концентрируется в щитовидной железе. Это накопление можно заметить счетчиком Гейгера-Мюллера. Таким путем можно даже определить степень заболевания. У здорового человека щитовидная железа накапливает 18—25 процентов введенного в организм иода, а у больного — 30—50 процентов. Радиоактивный иод применяется не только для диагноза, но и оказывает лечебное действие на щитовидную железу: щитовидная железа начинает нормально функционировать.

Радиоактивные вещества оказывают значительную помощь при лечении различных кожных заболеваний. Иногда удается вывести родимые пятна, прикладывая

примочки с раствором некоторых радиоактивных веществ, например радиофосфора.

За последнее время радиоактивные препараты нашли новое и важное применение. Оказалось возможным часть энергии радиоактивного распада преобразовать сразу в электрическую.

Известно, что на границе двух соприкасающихся веществ, проводников или полупроводников, возникает небольшая разность потенциалов (рис. 91, А).

Но электрический ток от такой пары получить нельзя, так как если мы соединим эти два тела проводником (рис. 91, Б), то электроны из одного тела перейдут в другое и разность потенциалов исчезнет. Чтобы по проводнику непрерывно шел ток, надо все время создавать новые электроны и тем самым поддерживать разность потенциалов. Для этой цели можно использовать некоторые полупроводники, в которых при поглощении ими излучений образуются электроны. Полупроводником с такими свойствами является кремний.

Если взять пластинку из кремния (рис. 92) и облучать ее электронами,

получающимися при распаде стронция⁹⁰, то они будут этой пластинкой поглощаться. Но здесь-то и проявляются чудесные свойства кремния. Вместо одного поглощенного электрона в нем образуется лавина, состоящая в среднем из 200 тысяч электронов, которые будут поддерживать разность потенциалов между нижней и верхней пластинками даже тогда, когда мы замкнем эти пластинки нагрузочным сопротивлением. Из соединенных последовательно пар таких пластинок

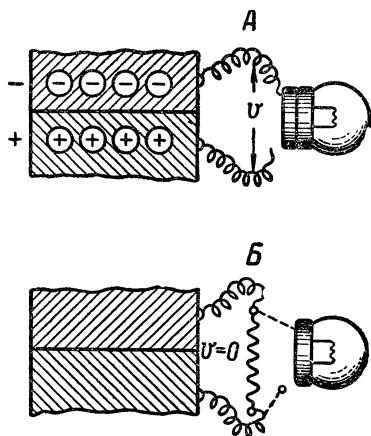


Рис. 91. Контактная разность потенциалов на границе двух соприкасающихся веществ. Разность потенциалов существует только при разомкнутой цепи (А). Если мы соединим эти два тела через какое-либо сопротивление (Б), электроны из одного тела перейдут в другое и разность потенциалов исчезнет

была изготовлена батарея напряжением около двух вольт и силой тока в несколько миллиампер. Размеры этой батареи очень малы и составляют примерно один кубический сантиметр. Это позволяет надеяться на возможность изготовления небольших по размерам, но достаточно мощных батарей для питания ламп радиоприемников или для домашнего освещения. Период полураспада строн-

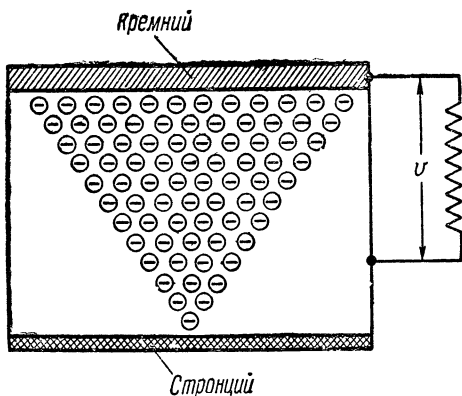


Рис. 92. Получение электрического тока с помощью радиоактивного стронция. Электроны, вылетающие при распаде стронция⁹⁰, размножаются в кремнии и будут поддерживать разность потенциалов на границе двух сред

ция — 25 лет, следовательно, за это время мощность подобной батареи уменьшится только наполовину. Правда, коэффициент полезного действия такой установки очень мал, но это не столь существенно, так как для изготовления батарей можно использовать «осколки» деления ядер урана, то есть отходы производства атомной энергии.

Проведенные в последнее время исследования действия радиоактивных излучений на пластические материалы показали, что при облучении резины и некоторых пластмасс чрезвычайно увеличивается их теплостойкость и прочность. Здесь также могут быть использованы отходы, получающиеся в ядерных реакторах.

Кроме того, можно непосредственно использовать энергию радиоактивных излучений «осколков» ядер

урана, превращая ее в теплоту. Один килограмм «осколков» дает около двух миллионов киловатт-часов энергии в виде гамма- или бета-лучей. Если поглощать эти лучи водой, то выделяется такое количество тепла, которого достаточно для небольшой энергетической установки. Расчет показывает, что добавлять такое горючее требуется не чаще чем раз в два — три месяца.

Меченые атомы. Огромные перспективы для научных исследований открывает метод меченых атомов. Этот метод напоминает способ кольцевания птиц или рыб, при помощи которого биологи наблюдают за их передвижением. Ученые прикрепляют кольца к пойманым рыбам или птицам и выпускают их. Окольцованные экземпляры, пойманные через несколько месяцев за тысячи километров от места кольцевания, показывают, как перелетала вся стая птиц или передвигался косяк рыб.

Атомы радиоактивного изотопа, примешанные к большому количеству химического элемента, играют роль окольцованных птиц. Это буквально меченые атомы, так как такие чувствительные приборы, как, например, счетчики Гейгера-Мюллера, легко могут обнаружить ничтожно малые количества радиоактивных атомов. Например, можно обнаружить миллиграмм радиоактивного железа в тонне металла.

По своим химическим свойствам радиоактивный изотоп ничем не отличается от основного химического элемента. Поэтому, наблюдая за движением меченых атомов, мы можем очень точно исследовать, как ведет себя химический элемент в различных процессах.

Таким путем можно исследовать, например, скорость износа материалов подшипника. Медные детали подшипника облучают нейтронами, при этом часть ядер меди⁶³ превращается в радиоактивный изотоп меди⁶⁴. Свойства медного вкладыша подшипника не изменились, но ядра меди⁶⁴ распадаются, излучая электроны и гамма-лучи, которые могут быть обнаружены счетчиком Гейгера-Мюллера. При работе подшипника вследствие износа вкладыша частицы меди будут переходить в смазку, туда же будут попадать и радиоактивные атомы меди⁶⁴. Измеряя радиоактивность смазки, мы можем быстро и точно определить износ подшипника.

Большое значение имеет метод меченых атомов в металлургии. Применяя радиоактивный фосфор, можно

быстро узнать во время плавки стали, насколько полно прошла очистка металла от фосфора — одной из самых вредных примесей. Раньше химический анализ на фосфор длился около 30 минут, и все это время металл сверх нормы выдерживался в мартеновской печи, снижая ее производительность. Теперь же степень очистки металла определяют очень быстрым измерением радиоактивности шлака, в который переходит фосфор. Таким образом, время плавки значительно сокращается.

Можно обнаружить происхождение загрязнения металла, если добавлять разные радиоактивные изотопы в огнеупорный материал, из которого изготовлена ванна мартеновской печи, в футеровку¹ разливочного ковша и другие места. Определяя характер радиоактивности выплавленной стали, можно найти, из какого места попали в сталь радиоактивные изотопы, и легко обнаружить источники загрязнений.

Для того чтобы взвесить расплавленную сталь в разливочном ковше, достаточно добавить в металл небольшое количество радиоактивных изотопов, атомы которых равномерно распределяются по всей жидкой стали, и каждый грамм металла будет давать излучение определенной интенсивности. По общему излучению разливочного ковша можно узнать вес всего горячего металла.

Впуская в дому вместе с воздухом радиоактивный газ, ученые изучают движение газов в процессе доменной плавки. Эти исследования дают очень важные для теории доменной плавки сведения. Так изучается связь процесса восстановления металла из руды и шлакообразования с движением газов в печи.

Оригинальный способ был применен нашими учеными для подсчета количества рыб, выпускаемых из питомников в реку. Некоторое число выловленных мальков на небольшое время было погружено в ванну со слабым раствором радиоактивного фосфора. Меченые таким путем рыбы были выпущены обратно в пруд, где они равномерно распределились между всеми мальками. Взятые затем в разных местах пруда пробы мальков дали возможность определить соотношение между радиоактивными и нерадиоактивными рыбами. Таким путем была определена интенсивность излучения, приходящаяся на

¹ Футеровка — облицовка огнеупорными материалами.

100—200 мальков. Гидробиологи измеряли излучение при выпуске мальков из пруда в реку и тем самым определяли количество рыбы, выпущенной из питомника. Радиоактивный фосфор быстро распадается, но если пометить рыб каким-либо долго живущим изотопом, например радиоактивным кальцием, то за такими мечеными рыбами можно долго наблюдать: изучать их рост, следить за их передвижением и т. д. Здесь уже метод меченых атомов прямо заменяет кольцевание рыб.

Примерно таким же образом можно проследить за передвижением насекомых. Поведение насекомых мало изучено, потому что трудно выделить отдельное насекомое из общей массы и наблюдать его перемещение. Известно, что пчеловоды для изучения жизни пчел иногда просто метят их специальной краской. Роль такой краски значительно лучше выполняют меченые атомы. Для наблюдения за перелетом мух был проделан такой опыт. Специальной партии мух (около 15 тысяч) в течение нескольких дней не давали воды, а затем для утоления жажды им дали раствор радиоактивного фосфора и выпустили на волю. Оказалось, что мухи способны перелетать на очень большие расстояния. Расставленные мухоловки с мясом улавливали радиоактивных мух на очень больших расстояниях. Путь в 15 километров они пролетели за два дня.

В научных исследованиях в области биологии и медицины меченые атомы совершили такую же революцию, как в свое время изобретение микроскопа. Они позволили разрешить ряд проблем, которые долгое время казались неразрешимыми.

Добавляя меченые радиоактивные атомы к пище, ученые установили, что почти все вещества, входящие в состав нашего тела, все время обновляются. Быстрее всего обновляются жиры. Белки, поступающие с пищей, заменяют окислившиеся в мышцах и крови белки, которые удаляются из организма. Радиоактивные атомы дали возможность определить время «жизни» белка в различных тканях и органах. Железо, содержащееся в крови, окисляется, почти не обновляется, а когда красные кровяные шарики отмирают, то их железо идет на образование новых.

Если сделать радиоактивным углерод, входящий в состав крови, используемой при переливании, то можно

измерить продолжительность жизни красных кровяных шариков перелитой крови и найти наилучший способ подготовки ее для переливания.

Известно, какое значение имеет скорость кровообращения для жизнедеятельности организма. Можно измерить эту скорость, вводя в какую-нибудь часть тела радиоактивный натрий. Счетчик Гейгера-Мюллера отметит, через какое время кровь перенесет этот радиоактивный препарат в различные органы.

Радиоактивный препарат позволяет изучить процесс и место образования мозговых опухолей. Больной принимает радиоактивный фосфор, который концентрируется в клетках опухолей. Их расположение в мозгу может быть точно определено с помощью маленьких счетчиков Гейгера-Мюллера. Это в значительной степени облегчает работу хирурга и гарантирует полное удаление опухолей.

Метод меченых атомов уже дал возможность решить ряд проблем в сельском хозяйстве и животноводстве. Доказано, например, что минеральные фосфор и кальций принимают непосредственное участие в «приготовлении» молока коровы. Следовательно, подбирая соответствующие корма, можно добиться значительного увеличения надоев.

Соединения серы играют большую роль в создании волосяного покрова животных. Исследования, проведенные с радиоактивной серой, показали, что у тонкорунной овцы серные соединения надолго задерживаются в организме и максимально используются для образования густой шерсти.

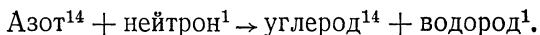
Если добавить радиоактивные вещества в удобрения, то можно легко проследить, как и какими частями растения эти удобрения усваиваются. Например, добавив радиоактивный фосфор в обычные фосфатные удобрения, установили, что кукуруза лучше всего усваивает эти удобрения в ранний период своего произрастания. На более поздних стадиях глубоко проросшие корни кукурузы получают необходимый для растения фосфор из нижних, неодобренных слоев почвы.

Опыты, проведенные с картофелем, показали, что эта культура требует непрерывной подкормки фосфором. Почти весь фосфор она извлекает из вносимых в почву удобрений.

Удалось также выяснить, что больше всего фосфора поглощают стебли растений; в зрелых плодах его почти нет.

Весьма любопытным является применение метода меченых атомов для измерения времени.

Мы рассматривали реакцию, в которой образуется радиоактивный углерод:



Такая реакция в природе происходит непрерывно. Космические лучи, бомбардируя ядра азота земной атмосферы, превращают его в углерод¹⁴, имеющий период полураспада около 5700 лет. Этот радиоактивный углерод вместе с обычным поглощается растениями. Живые растительные волокна всегда в определенной пропорции содержат радиоактивный углерод. Однако после того как растение умирает, поглощение углерода прекращается. Радиоактивный распад приводит к постепенному уменьшению количества углерода¹⁴. Измеряя излучение «умерших» растительных веществ, можно узнать количество радиоактивного углерода. Зная период полураспада, мы таким путем можем довольно точно определить «возраст» какого-нибудь куска дерева или остатков растения.

Исследования обугленной кости и золы в одной из пещер древнего человека показали, что костер там горел 11 тысяч лет тому назад. Таким же путем было установлено, что в пещере Ласко (Франция) люди жили 15 500 лет назад. Были произведены многочисленные анализы древних предметов, найденных археологами. Период, к которому эти вещи принадлежали, определялся вполне объективным прибором, то есть счетчиком Гейгера-Мюллера.

Все эти примеры дают лишь очень общее представление о возможностях метода меченых атомов. Трудно переоценить его значение. Самые сложные химические и биологические процессы с помощью метода меченых атомов постепенно раскрываются человеком. Этот метод сейчас применяется в разных областях науки и техники и позволяет глубже и полнее познать законы природы, облегчить труд миллионов людей, вовремя распознать опасное заболевание человека.

Что такое лучевая болезнь. Широкие исследования, проводимые в настоящее время в области ядерной физики

и реакторостроения, а также применение различных искусственных и естественных радиоактивных веществ и отходов ядерного реактора в народном хозяйстве, связаны с привлечением большого количества людей — специалистов разных областей науки и техники.

При работе на реакторах и с радиоактивными веществами люди могут иногда при неправильно подобранной и малоэффективной защите подвергаться сильному воздействию различных излучений, которые приводят к заболеванию так называемой лучевой болезнью.

Опасность воздействия этих излучений особенно велика в связи с тем, что человек не испытывает неприятных ощущений в момент их действия. В этом отношении радиоактивные излучения значительно коварнее, например, тепловых, инфракрасных лучей или большинства удушливых газов, действие которых почти мгновенно ощущается человеком.

Это заставляет нас с большей внимательностью относиться к безобидным на первый взгляд радиоактивным препаратам или приборам, выделяющим различные излучения, с большей тщательностью изучать их действие на различные живые организмы.

Сейчас уже известно, что самое сильное биологическое действие ядерного излучения заключается в ионизации атомов и молекул веществ, входящих в состав живого организма.

Эта ионизация ведет к нарушению молекулярных связей и изменению структуры различных химических соединений.

Например, под влиянием ионизирующих ядерных излучений происходит расщепление воды. Продукты расщепления ее являются химически активными веществами и вступают в соединение с белковыми молекулами, что приводит к образованию новых химических соединений, необычных для данного организма. В результате этих реакций нарушается нормальный обмен веществ и происходит изменение клеток. При сильном облучении ввиду ионизирующей способности ядерных излучений может наступить гибель клеток отдельных органов и даже целого организма.

Биологическое действие зависит от характера излучения.

Различные виды ионизирующих излучений при взаимодействии с веществом вызывают неодинаковое число ионизаций. Большое значение имеет также энергия излучения — скорость частиц и длина волны гамма-кванта. Для обычных ядерных излучений можно принять, что на пути в один миллиметр в воздухе одна альфа-частица вызывает 6 тысяч пар ионов, одна бета-частица — 6 пар ионов, а десять гамма-квантов — одну пару ионов. Таким образом, наибольшим биологическим действием обладают альфа-частицы и наименьшим — гамма-лучи.

Однако мы уже знаем, что наибольшей проникающей способностью обладает гамма-излучение. Оно проникает через всю толщу организма и действует на все ткани и органы.

Лист писчей бумаги, полотняная ткань полностью поглощают альфа-излучение. Поверхностное облучение кожи человека альфа-частицами почти безвредно, так как излучение поглощается роговым слоем кожи. Альфа-излучение становится очень опасным только тогда, когда радиоактивный препарат попадает внутрь организма, в кровь и интенсивно воздействует непосредственно на ткани и клетки.

Бета-частица при наружном облучении непосредственно действует только на кожу и слизистые оболочки.

Радиоактивные вещества широко распространены в природе. Кроме того, живые организмы и клетки находятся под постоянным воздействием космического излучения. Однако многочисленные наблюдения показывают, что организм от этого излучения не только не страдает, но оно необходимо для его нормального существования.

Увеличенная доза¹ излучения плохо переносится живыми существами и растениями. Максимальная доза, переносимая совершенно здоровым человеком в течение длительного времени без вреда для здоровья, примерно в 60—100 раз превышает уровень естественной радиации и равняется 0,05 рентгена в день.

Ежедневное облучение более высокими дозами приводит к развитию лучевой болезни, а при внешнем облучении, например, только рук, возникают тяжелые пора-

¹ Доза излучения — это количество энергии, поглощаемое в единице объема облучаемого вещества. Единица дозы — рентген — излучение, создающее в одном кубическом сантиметре воздуха $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов.

жения кожи, которые могут перейти в злокачественные образования (рак кожи).

При однократном облучении всего тела заметные изменения у здорового человека уже бывают при облучении свыше 50 рентгенами. Однако через некоторое время заболевание проходит бесследно. Доза в 100—200 рентген может вызвать тяжелое заболевание. И очень тяжелое заболевание вызывает облучение в 400 рентген. Доза в 600—700 рентген является очень опасной для жизни человека.

Степень заболевания зависит от размеров облученной поверхности тела. Облучение дозой в 600 рентген небольшого участка кожи вызывает ее покраснение, которое проходит довольно быстро. Облучение поверхности кожи в несколько десятков сантиметров действует уже сильнее. Появляется большая слабость, тошнота и головная боль, которые исчезают через сутки. Однократное облучение той же дозой трети поверхности тела вызывает тяжелое заболевание, а облучение половины — зачастую приводит к опасному для жизни человека заболеванию.

Степень заболевания зависит от общего состояния организма и состояния нервной системы. Люди уравновешенные обычно легче переносят воздействие излучения, чем люди с неустойчивой нервной системой.

Человек обычно наиболее устойчив к излучению в возрасте от 26 до 50 лет. У молодых и более пожилых чувствительность к излучению повышенная.

Первые симптомы лучевой болезни выражаются обычно в появлении слабости, повышенной утомляемости и головных болях. У больных появляется одышка при физической работе. Для начальной стадии болезни характерно некоторое изменение состава крови.

При более сильном облучении эти симптомы приобретают более тяжелый характер. Повышается утомляемость, снижается трудоспособность, заметно снижается память, возникают различные желудочные заболевания, наблюдается значительное понижение давления крови и изменяется ее состав в сторону уменьшения числа лейкоцитов и лимфоцитов, прогрессирует малокровие.

При хронической лучевой болезни заметно снижается сопротивляемость организма, его невосприимчивость к инфекциям. Это ведет к частым заболеваниям гриппом, ангиной и другими инфекционными болезнями.

Люди, страдающие лучевой болезнью, вызванной очень сильным облучением, являются тяжелобольными, требующими постельного режима. У этих больных ослабленный иммунитет к инфекциям, и они нередко погибают от случайных заболеваний, например от воспаления легких или общего заражения крови. У больных повышена температура, появляется сильное кровоизлияние, совершенно расстроена нервная система, появляется хроническое воспаление мозга.

Течение лучевой болезни у разных людей протекает по-разному. У некоторых людей даже сравнительно сильное переоблучение не вызывает серьезных заболеваний.

В нашей стране уделяется очень большое внимание лечению и профилактике лучевой болезни. Тяжелые заболевания возможны только при каких-либо значительных авариях. Однако и здесь врачам удается добиться выздоровления больного.

В атомных установках помещения для обслуживающего персонала отделяются от источников излучений толстыми защитными стенами. В этих помещениях установлены специальные приборы — дозиметры, которые позволяют обнаружить излучения даже небольшой интенсивности. Работники, находящиеся в особо опасных местах, имеют при себе индивидуальные дозиметры, регистрирующие степень облучения, которому они подвергаются в течение всего дня. Если кто-либо получил дозу облучения выше допустимой, он немедленно обследуется врачами, и в случае необходимости принимаются лечебные меры.

Периодическому медицинскому осмотру подвергается весь персонал. Люди, работающие с ионизирующими излучениями, получают бесплатное специальное питание и пользуются сокращенным рабочим днем.

ГЛАВА 7

О ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

Соединение легких ядер. Как известно, ядерную энергию можно получить как при делении ядер тяжелых, так и при соединении ядер легких элементов. Мы уже умеем получать и использовать энергию при делении ядер изо-

топа естественного урана — урана²³⁵ и ядер искусственных изотопов — урана²³³ и плутония²³⁹.

Физики еще раньше, чем была открыта реакция деления урана, знали, что при бомбардировке легких ядер быстрыми заряженными частицами происходят ядерные реакции, в которых выделяется очень большая энергия. Например, при бомбардировке лития ядрами водорода — протонами выделяется энергия, примерно в два с половиной раза большая, чем при делении урана, если отнести эту энергию к единице веса вещества, входящего в реакцию. Еще большая энергия получается при образовании ядер гелия из различных изотопов водорода.

Однако произвести соединение ядер не так легко. Ведь одноименно заряженные ядра с большой силой отталкиваются. Поэтому для того чтобы производить такие ядерные реакции, нужно ускорять заряженные частицы на специальных аппаратах-ускорителях. Но можно ли на ускорителях получать атомную энергию для практических целей? Оказывается, нет. Из огромного числа частиц лишь одна совершит ядерную реакцию, и энергии, выделенной при этом, недостаточно даже для того, чтобы компенсировать работу, затраченную на ускорение миллионов заряженных частиц, которые пройдут мимо атомных ядер. Таким путем нельзя получить выигреш в энергии.

Очевидно, что для получения энергии при соединении легких ядер нужен процесс, который сам себя поддерживает. Оказалось, что для получения быстрых частиц совсем необязательно применять ускорители. Вспомните, ведь атомы и молекулы любого вещества всегда находятся в непрерывном движении. Причем скорость движения атомов, а следовательно, и ядер растет с повышением температуры вещества. Поэтому надо нагреть смесь легких элементов. Ядра этих элементов при своем движении будут сталкиваться друг с другом — соединяться. Происходят ядерные реакции и выделяется энергия. Если тепла, получающегося в этих реакциях, достаточно, чтобы поддержать высокую температуру вещества, то будет осуществляться самоподдерживающийся ядерный процесс. Этот процесс и называется термоядерной реакцией.

Примерно так же мы зажигаем смесь газа с воздухом в газовой горелке. Вы знаете, что газ сам по себе не загорится. Для его горения необходима температура по-

рядка 400—500 градусов. Надо повернуть кран, пустить газ и поднести к нему зажженную спичку. Дальше уже газ сам будет поддерживать свое горение. Будет идти так называемая термохимическая реакция, при которой тепла, выделяющегося за счет химической реакции горения газа, достаточно, чтобы поддерживать существование самой реакции.

То же самое будет, если мы как-нибудь подожжем смесь легких элементов. Будет идти поддерживающая сама себя термоядерная реакция, при которой будет выделяться энергия, в десятки миллионов раз большая энергии любой химической реакции.

Но оказалось, что сделать это совсем не так просто. Для «зажигания» термоядерной реакции уже простая спичка не годится; нужна зажигалка, дающая температуру в несколько миллионов градусов. Только тогда скорость некоторой части легких ядер будет достаточна для преодоления отталкивающих электростатических сил и осуществления ядерных реакций.

Энергия Солнца и звезд. Получить температуру в несколько миллионов градусов в земных условиях очень трудно. Но оказывается, что термоядерные реакции идут в природе без нашего участия.

Солнце и звезды излучают огромную энергию в мировое пространство, и эта энергия пополняется за счет ядерных реакций соединения легких элементов. В центре Солнца температура порядка 13 миллионов градусов. При этой температуре атомы полностью ионизованы, то есть вокруг их ядер уже не существует электронных оболочек. Фактически Солнце заполнено электронно-ионным газом. Высокие температуры вызывают колоссальные давления этих газов, и ядра могут подойти значительно ближе друг к другу, нежели в земных условиях при обычных температурах. Благодаря давлению плотность газов в центре Солнца равна около 80 граммов на кубический сантиметр, что намного больше плотности самых тяжелых твердых тел на земле.

Исследования показали, что на Солнце и в ряде других звезд идет целый ряд ядерных реакций, в результате которых четыре атома водорода превращаются в одно ядро гелия.

В результате этих реакций выделяется огромная энергия. При превращении одного килограмма водорода в ге-

лий выделяется тепло, достаточное для того, чтобы вскипятить полтора миллиона кубометров воды.

Интересно, что термоядерная реакция на Солнце протекает очень медленно. Нужно несколько миллионов лет, чтобы четыре атома водорода превратились в ядро гелия. Поэтому тепло, излученное десятками тонн солнечного вещества в сутки, недостаточно, чтобы вскипятить один стакан воды. При таком медленном процессе только благодаря участию гигантских масс возможно выделение Солнцем огромного количества тепла. Если применить известный уже нам закон взаимосвязи массы и энергии, то оказывается, что наше Солнце излучает такую огромную энергию, что вместе с этой энергией каждую секунду Солнце теряет четыре с половиной миллиона тонн своего веса. Правда, для Солнца эта потеря совершенно ничтожна. Масса его настолько велика, что за два миллиарда лет своего непрерывного излучения Солнце теряет не больше одной десятой процента своего веса.

Естественно, что в результате ядерных реакций содержания водорода на Солнце уменьшается, и после того как весь водород израсходуется, выделение энергии прекратится: Солнце погаснет. Но и здесь опасаться незачем. Сейчас на Солнце столько водорода, что его хватит, как показывают подсчеты, на 100 миллиардов лет.

Солнце на земле. Мы приходим с вами к удивительному выводу. Оказывается, человечество за все время своего существования всегда использовало ядерную энергию — энергию Солнца. Действительно, мы уже говорили, что какой бы источник энергии мы ни имели на земле, его происхождение неразрывно связано с Солнцем.

Однако земля получает ничтожную часть энергии ядерных реакций, происходящих на Солнце. Еще меньшую часть полезно расходует мы для наших нужд. И, безусловно, прав академик Несмеянов, когда он сказал в 1955 году на сессии Академии наук: «Настало время вместо использования жалких крох консервированной в том или ином виде на нашей планете колоссальной энергии Солнца создать свое Солнце на земле». Не правда ли, это звучит как фантазия? Но мы не привыкли слышать из уст выдающегося ученого, президента Академии наук, фантастические идеи. Разве фантазия электростанции, использующие ядерную энергию деления урана, двигатели на атомном горючем? Еще ближе мы по-

дойдем к цели, когда сумеем получить управляемую термоядерную реакцию, подобную реакциям, идущим на нашем большом Солнце. Тогда мы действительно создадим свое Солнце на земле.

На этом пути ученым предстоит решить еще очень много трудных задач. Мы обладали до сих пор единственным средством, позволяющим получать температуру в миллионы градусов, необходимую для осуществления термоядерных реакций. Это — взрыв атомной бомбы. Она и применяется в качестве детонатора для термоядерного, водородного оружия. Но, конечно, невозможно применять для промышленных целей атомную бомбу. Поэтому прежде всего надо было найти возможность «зажигать» термоядерные реакции, не прибегая к атомному взрыву, то есть построить прибор, позволяющий получать температуру в миллион градусов.

Хотя наиболее выгодной ядерной реакцией является соединение ядер обычного водорода, но, к сожалению, осуществление термоядерной реакции на земле на таком горючем вряд ли возможно. Значительно проще осуществить термоядерные реакции на тяжелом водороде (дейтерии) и особенно легко — на сверхтяжелом водороде (тритии). Эти реакции уже используются в водородной бомбе.

Дейтерия на земле — огромные запасы. Он содержится в любой воде в небольшом количестве: примерно 0,015 процента к имеющемуся там водороду. Но ведь вода в земных океанах неисчерпаема. Было бы очень заманчивым использовать этот источник энергии в мирных целях. Быстрорастущие потребности человечества в энергии были бы обеспечены на миллиарды лет. Над этой проблемой работают многие ученые в различных странах. Исследования, проведенные советскими и зарубежными учеными в последние годы, показали, что имеются реальные пути к решению этой великой задачи.

Магнитный мешок. Для того чтобы нагреть водород до миллиона градусов, нужна небольшая энергия. Для одного грамма дейтерия это всего несколько киловатт-часов. Трудность заключается в том, что при таких температурах атомы и молекулы газов обладают огромными скоростями и разбегаются в разные стороны. Давление газа достигает миллионов атмосфер. Тепло переходит от дейтерия к окружающему веществу, к стенкам сосуда,

в котором происходит это нагревание. Естественно, что в этом случае мы уже будем затрачивать огромную энергию на нагревание сосуда. Нагреть нам дейтерий так не удастся. Да и какой сосуд выдержит температуру в миллионы градусов и давление в миллионы атмосфер? Надо было придумать такую термоизоляцию, которая дала бы возможность стенкам сосуда оставаться холодными в то время, когда газ в сосуде имеет температуру в миллионы градусов. Кроме того, нужно, чтобы давление на стенки сосуда не было бы слишком высоким. Казалось бы, что эта задача неразрешима. Но решение было найдено.

Нагретый до миллионов градусов газ уже не является обычным веществом. Он состоит из движущихся отдельно друг от друга заряженных частиц: положительных атомных ядер и отрицательных электронов. Этот газ называется плазмой. Задача заключается в том, чтобы удерживать заряженные частицы вместе, так как при их разлете, естественно, будет уходить энергия, заключенная в объеме газа.

В 1950 году академики И. Е. Тамм и А. Д. Сахаров сделали очень интересное предложение о применении магнитного поля для термоизоляции плазмы высокой температуры. Дело в том, что в магнитном поле заряженные частицы не могут двигаться прямолинейно, а заворачиваются по окружностям. Чем больше магнитное поле, тем по меньшей окружности двигаются ионы и электроны. Правда, при столкновении друг с другом они будут перемещаться, но уйдут не дальше, чем на длину радиуса окружности. При сильном магнитном поле потеря энергии плазмой за счет движения частиц должна уменьшаться в десятки и сотни тысяч раз. Заряженные частицы нагретой до миллионов градусов плазмы будут как бы находиться в магнитном мешке. Однако стенки этого мешка, образованные магнитным полем, уже не боятся сверхвысоких температур.

После того как академики И. Е. Тамм и А. Д. Сахаров высказали свою идею, физики вспомнили, что с подобным явлением, правда в меньшем масштабе, с так называемым пинч-эффектом, они уже встречались при исследовании газового разряда. Читатель ведь знает, что, когда по проводнику протекает электрический ток, вокруг него образуется магнитное поле. То же самое проис-

ходит при прохождении тока через плазму. И вот при больших токах в ртутной дуге и при некоторых других формах электрического разряда возникающая там плазма благодаря сильному магнитному полю сжимается в узкий шнур. При этом сжатии, так же как это имеет место при обычном сжатии газа, происходит повышение температуры. Однако при сравнительно малых токах, которые до сих пор использовались в газовом разряде, температура плазменного шнура достигала только десятка тысяч градусов. Это далеко до температуры, необходимой для термоядерных реакций. Но это не обескуражило ученых. Были произведены необходимые расчеты, и большая группа физиков под руководством академика Л. А. Арцимовича приступила к исследованиям.

Близко к великой цели. Оказалось, что для успеха дела — получения температуры в миллион градусов — нужны токи порядка сотен тысяч и даже миллиона ампер. Такой ток можно пропустить через плазму разрядной трубки только при напряжении в несколько десятков тысяч вольт. Достаточно перемножить значение тока и напряжения, чтобы убедиться, что мощность установки превосходит мощность всех гидроэлектростанций Советского Союза. Выход заключался в том, чтобы пропускать через разрядную трубку мощные токи в виде импульсов, длящихся миллионные доли секунды. Тогда при колоссальной мгновенной мощности средняя мощность, необходимая для питания установки, получается вполне приемлемой величины.

Газоразрядная трубка с дейтерием в экспериментальной установке получала электрическое питание от мощной батареи высоковольтных конденсаторов при напряжении 50 тысяч вольт.

Много нового и чрезвычайно интересного открыли советские физики при исследовании сверхмощных импульсных разрядов. Применяя специальные и очень остроумные измерительные приборы, они обнаружили, что газ в трубке стягивается в узкий плазменный шнур, оторванный от стенок сосуда. Плазма испытывает резкие колебания, связанные с последовательным сжатием и разряжением. В сосуде возникают ударные волны с невиданной скоростью распространения — несколько сот километров в секунду. Температура плазменного шнура в момент наибольшего сжатия достигала миллиона градусов.

Интересно отметить, что в ряде исследований применялась сверхскоростная киносъемка. Киноаппарат фотографировал около двух миллионов кадров в секунду. После проявления киноплёнки перед глазами физиков раскрывались все особенности процессов, длившихся миллионные доли секунды. Группа физиков и теоретиков обработала экспериментальный результат. Многие до сих пор неизвестные явления получили объяснения.

Термоядерная реакция в дейтерии всегда сопровождается излучением нейтронов. С большим удовлетворением в 1952 году физики уже в первых опытах обнаружили нейтронное излучение. Но, увы, радость была преждевременна. Дальнейшие исследования и расчеты показали, что нейтроны появляются уже при таких малых разрядных точках и температурах плазмы, когда термоядерной реакции практически еще не может быть. Было также обнаружено, что одновременно с нейтронами появляются и гамма-лучи. По своим свойствам они соответствовали рентгеновским лучам, испускаемым рентгеновской трубкой с напряжением 300—400 киловольт.

Хотя нейтроны и гамма-лучи не могли быть следствием возникающих термоядерных реакций, но это явление само по себе представляет огромный интерес.

Для их объяснения необходимо допустить, что в плазме имеются весьма быстрые заряженные частицы, которые могут быть получены при разности потенциала на электродах разрядной трубки в несколько сот киловольт. Но все приборы убедительно показывали, что в момент излучения нейтронов и гамма-лучей напряжение на трубке всего 10 киловольт.

Это явление пока не получило удовлетворительного объяснения. Вполне вероятно, что в плазме происходят такие процессы, при которых часть медленных заряженных частиц ускоряется и получает очень большую энергию, достаточную для получения нейтронного и гамма-излучений.

Исследования ближайшего времени позволят создать стройную теорию этих процессов. Впереди еще много трудностей. Если мы хотим получить термоядерную реакцию в каком-либо кратковременном процессе, то прежде всего необходимо, чтобы за время этого процесса выделялась значительно большая энергия, нежели затрачиваемая в начале процесса. Этого пока еще нет.

Еще более трудной задачей является получение длительной и медленно протекающей термоядерной реакции.

Советские физики близко подошли к решению великой проблемы — получению искусственной и управляемой термоядерной реакции. Как знать, может быть, через несколько месяцев или лет советские читатели узнают о новой огромной победе ученых.

Еще немного фантазии. Даже если нам удастся осуществить сверхвысокие температуры, проблема получения энергии термоядерных реакций еще не будет решена. Мы сможем зажечь термоядерную реакцию, но надо научиться управлять ею. Нам не удастся использовать энергию, если после того, как мы «подожжем» нашу ядерную смесь, произойдет атомный взрыв.

Намечаются два пути исследования энергии термоядерных реакций. Первый путь заключается в осуществлении медленного горения ядерной смеси. Так происходит на Солнце и звездах, но мы хотим построить свое маленькое Солнце на земле. Тогда перед учеными встанет еще одна довольно трудная задача: надо будет научиться использовать энергию, получаемую при температуре в миллион градусов.

Пути к этому тоже есть. Умеем же мы использовать энергию нашего большого Солнца, которая получается при 13 миллионах градусов. Сейчас мы еще далеки от каких-нибудь конструктивных решений, но все же можно представить себе, из каких примерно элементов будет состоять термоядерный реактор — искусственное Солнце (рис. 93). По-видимому, в его центре будет находиться нагретая до миллионов градусов плазма, удерживаемая в малом объеме мощными электромагнитными полями. Ионы легких элементов, сталкиваясь друг с другом, вступают в ядерные реакции, в результате которых выделяется огромная энергия. Возможно, что удастся получить с одного кубического сантиметра центрального объема мощность 1 киловатт или с одного кубического метра — миллион киловатт.

Носителем энергии в ядерных реакциях являются заряженные частицы, нейтроны и электромагнитное излучение. Быстрые заряженные частицы отдадут часть своей энергии в центральном объеме, тем самым поддерживая там необходимую для осуществления термоядерной реакции температуру. Основную энергию заряженные частицы

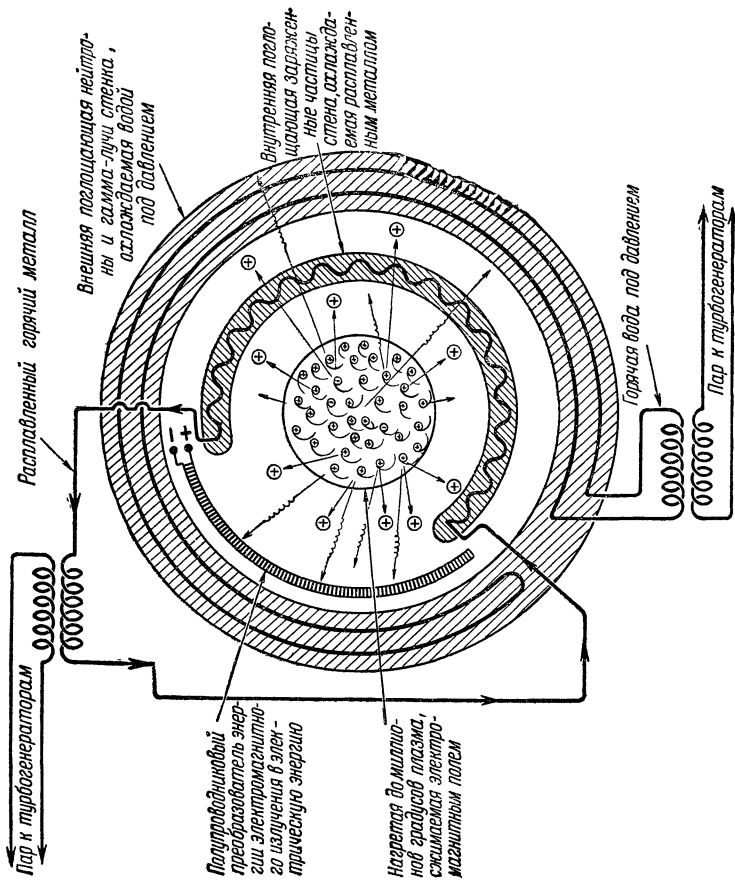


Рис. 93. Возможная схема термоядерного реактора — искусственного солнца

потеряют во внешнем объеме вне электромагнитного поля. Эту энергию можно получить в виде тепла, выделенного какой-нибудь поглощающей стеной, окружающей центральный объем. Но можно поступить иначе, превращая энергию заряженных частиц непосредственно в электрическую, минуя тепловой цикл (паровой котел и турбину). Заряженные частицы, поглощаясь каким-либо металлом, выбивают с поверхности металла большое количество электронов. Таким образом, металлическая стенка получит положительный заряд, который обуславливает возникновение электрического тока. Существуют и другие возможности превращения энергии термоядерных реакций в электрическую.

Энергия нейтронов, поглощаемых внешней стеной, превращается в тепло. По-видимому, при высоких температурах, получающихся в термоядерных реакциях, наибольшая часть энергии будет выделяться в виде электромагнитного излучения. Эту энергию также можно превращать в тепловую и электрическую. Исследования показали, что очень чистые кристаллы кремния превращают в электрическую энергию около семи процентов падающей на них световой энергии. Весьма вероятно, что найдутся химические соединения, которые еще эффективнее будут преобразовывать свет в электричество. Такие вещества в скором времени можно будет применять для использования солнечной энергии в промышленных целях, а в будущем можно будет использовать также энергии излучения искусственных солнц.

Наконец, энергию искусственного термоядерного солнца можно использовать в фотосинтезе. Как известно, зеленые листья растений поглощают значительную долю падающей на них солнечной световой энергии. Благодаря фотосинтезу они создают запасы энергии в органических веществах. Эту энергию мы используем при горении химического топлива. Весьма вероятно, что в будущем будет выгодно с помощью термоядерных реакций и ускоренного фотосинтеза создать искусственное химическое топливо, используя его затем как горючее на транспорте и электростанциях.

Создание на основе термоядерных реакций искусственных маленьких солнц может произвести очень эффективное изменение местного климата. Это могут

быть как неподвижные солнца, так и солнца, расположенные на искусственных спутниках земли.

Конечно, это еще пока почти фантазия, но она имеет под собой довольно прочную основу, и надо будет еще много потрудиться, чтобы превратить ее в действительность.

Среди ученых есть некоторые опасения, что в разумных и достижимых на земле объемах не удастся осуществить медленную термоядерную реакцию. Но даже если эти пессимистические высказывания оправдаются, то есть и второй путь. Он заключается в использовании малых взрывов смеси легких элементов. Для этого надо будет зажигать смесь маленькими порциями. После того как выгорит первая порция, в аппарат впускается следующая и поджигается. Это напоминает работу двигателя внутреннего сгорания, например дизеля. Здесь также порциями всprysкивается горючее, которое мгновенно воспламеняется и обеспечивает рабочий ход двигателя.

Успешное решение этой задачи позволит создать реактивные двигатели, использующие термоядерные реакции.

Конечно, такой путь использования термоядерных реакций является менее выгодным, чем медленное горение: каждый раз для осуществления мелкого взрыва необходимо затратить часть энергии на получение сверхвысокой температуры смеси. Однако атомная энергия, получающаяся при каждом взрыве, может быть во много раз больше затраченной. Не следует забывать об огромной концентрации энергии в термоядерном горючем. Содержимое обычного баллона со сжатой смесью легких газов будет заключать в себе запас энергии, равноценный теплу, выделяющемуся при сгорании примерно двух тысяч тонн бензина. Реактивный самолет или снаряд, снабженный таким горючим, сможет совершать полеты огромной дальности.

Сейчас ведутся работы в различных направлениях, и еще неясно, каким путем удастся получить управляемую термоядерную реакцию. Не подлежит, однако, никакому сомнению, что цели ученых увенчаются успехом. В ближайшие десятилетия, а может быть и годы, человечество овладеет энергией термоядерных реакций для промышленных целей и получит новые неисчерпаемые источники энергии, значительно превосходящие запасы атомной энергии в уране и тории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы прошли с вами путь, во время которого перед нами раскрывалась одна из сторон бесконечного многообразия природы. Огромные достижения современной атомной и ядерной физики привели к величайшему в истории человечества открытию — овладению атомной энергией.

Это открытие было подготовлено трудами крупнейших ученых мира. Но овладение атомной энергией явилось результатом кропотливых исследований десятков тысяч физиков и инженеров всех стран. Сделаны только первые шаги в направлении использования этой энергии, и впереди еще очень много работы.

Внимательный читатель заметил, что о многом в этой небольшой книге еще не рассказано. Значительное число опытных фактов не нашло себе объяснения в изложении, а некоторые возможные схемы использования атомной энергии изложены настолько упрощенно, что могут вызвать недоумение: почему они до сих пор не осуществлены.

Конечно, очень трудно в доступной форме изложить весьма сложные физические явления. Но не только это является препятствием. Ученые и сейчас еще не могут дать ответа на ряд фундаментальных вопросов атомной и ядерной физики. Нам еще очень мало известно о природе ядерных сил, и это не дает возможности построить ясную и последовательную теорию атомного ядра и ядерных реакций. Нейтрон, протон и электрон — сложные частицы, но об их структуре мы не можем говорить так же, как говорим об устройстве атома и атомного ядра. По всей вероятности, никогда нельзя будет сказать, что нейтрон или протон состоит из каких-то других частиц. Здесь более сложная картина превращения одного вида движущейся материи в другой. В этой картине много белых пя-

тен, и тысячи физиков трудятся над этим еще не законченным полотном.

В книге нет вымысла, и все схемы получения и применения атомной энергии вполне возможны, некоторые уже используются. Но осуществление других связано с серьезными трудностями. Несмотря на это, можно не сомневаться, что уран и торий в ближайшее время получат самое широкое распространение как ядерное горючее.

Более трудные проблемы стоят на пути использования энергии термоядерных реакций. Но заманчивые перспективы получения колоссальной энергии из дешевого ядерного горючего дают уже сейчас нам право говорить об успешном преодолении этих трудностей в ближайшем будущем. Пока еще сделаны в этом направлении только первые шаги.

Атомная энергия, как и любой другой вид энергии, наряду со значительными преимуществами имеет и серьезные принципиальные недостатки. Одним из таких недостатков является обязательное наличие массивной защиты ядерных реакторов. Поэтому не правы те, которые утверждают, что проблема уменьшения веса и габаритов биологической защиты реактора является лишь вопросом времени. В природе нет веществ, которые позволили бы создать защиту реактора с малым весом. По-видимому, никогда вес защиты ядерных реакторов не будет меньше некоторого минимума, измеряемого многими тоннами.

Затруднением в использовании атомной энергии при помощи реакторов является появление большого количества вредных для здоровья радиоактивных продуктов отхода, проблема удаления которых при наличии большого количества реакторов может стать очень серьезной.

Неправильно также думать, что в будущем атомная энергия вытеснит такие практически безграничные источники энергии, как, например, энергия солнца, ветра, морских приливов, тепла земли. Поэтому нельзя, описывая будущее атомной энергии, фактически отвергать все остальные источники энергии. Нельзя оттенять только одну сторону использования атомной энергии, подчеркивая, что ее применение позволяет безгранично расширить власть человека над природой, увеличить производительные силы и общественное богатство и т. д. и не давать реального представления об экономических и инженерных

трудностях, возникающих в настоящее время на пути развития атомной техники.

Новейшие достижения науки и техники во много раз увеличили силу средств разрушения, силу средств массового истребления людей. Истекшие после второй мировой войны годы характеризуются стремительным развитием военной техники и особенно атомного и водородного оружия, мощность взрыва которого теперь исчисляется миллионами тонн тринитротолуола. Быстро развивается ракетная техника, изобретены такие виды современного оружия как межконтинентальные баллистические снаряды с водородным зарядом. Появление этих видов военной техники на вооружении государств сделало уязвимым практически любой пункт земного шара.

Теперь уже не может быть сомнений насчет того, что в случае возникновения новой войны с применением атомного и водородного оружия последствия такой войны окажутся исключительно тяжелыми для участвующих в ней государств, особенно для стран с высокой плотностью населения и с большой концентрацией промышленности. При наличии на вооружении государств таких видов оружия вопрос о запрещении атомного и водородного оружия приобрел особенно большое значение.

В заявлении Советского правительства указывалось, что государства должны взять на себя перед лицом народов всего мира торжественное обязательство об отказе от применения в военных целях атомного и водородного оружия всех видов, в том числе авиационных бомб, ракет любого радиуса действия с атомным и водородным зарядами, атомной артиллерии и т. п.

Что касается вопроса о полном запрещении атомного и водородного оружия с изъятием его из вооружений государств, прекращением производства и уничтожением запасов этого оружия, то государства должны приложить все усилия к достижению соглашения по этому вопросу. Учитывая особую неотложность вопроса о прекращении испытаний атомного и водородного оружия, целесообразно в настоящее время выделить этот вопрос из общей проблемы атомного и водородного оружия в качестве первоочередного мероприятия и решить его безотлагательно.

Но пока соглашения о запрещении атомного оружия еще не достигнуто, Советские Вооруженные Силы дол-

жны быть в совершенстве подготовлены как к противодатомной защите нашей Родины и войск, так и для эффективного применения атомного и водородного оружия и в случае необходимости немедля нанести по агрессорам сокрушительные ответные удары. В подготовке наших войск мы должны исходить из того, что у наших вероятных противников имеется достаточное количество этого оружия и средств доставки его на нашу территорию. Это обстоятельство обязывает наши Вооруженные Силы, особенно противовоздушную оборону страны, Военно-воздушные силы, быть всегда готовыми пресечь любую попытку агрессора осуществить внезапное нападение на нашу страну.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

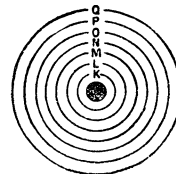
ПЕРИОДЫ	РЯДЫ	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В									
		I R ₂ O	II RO	III R ₂ O ₃	IV RH ₄ RO ₂	V RH ₃ R ₂ O ₅	VI RH ₂ RO ₃	VII RH R ₂ O ₇	VIII	RO ₄	0
1	I	H ВОДОРОД 1,0080						(H)			He ГЕЛИЙ 4,003
2	II	Li ЛИТИЙ 6,940	Be БЕРИЛЛИЙ 9,013	B БОР 10,82	C УГЛЕРОД 12,011	N АЗОТ 14,008	O КИСЛОРОД 16,0000	F ФТОР 19,00			Ne НЕОН 20,183
3	III	Na НАТРИЙ 22,991	Mg МАГНИЙ 24,32	Al АЛЮМИНИЙ 26,98	Si КРЕМНИЙ 28,09	P ФОСФОР 30,975	S СЕРА 32,066	Cl ХЛОР 35,457			Ar АРГОН 39,944
4	IV	K КАЛИЙ 39,100	Ca КАЛЬЦИЙ 40,09	Sc СКАНДИЙ 44,96	Ti ТИТАН 47,90	V ВАНАДИЙ 50,95	Cr ХРОМ 52,01	Mn МАРГАНЕЦ 54,94	Fe ЖЕЛЕЗО 55,85	Co КОБАЛЬТ 58,94	Ni НИКЕЛЬ 58,69
	V	Cu МЕДЬ 63,54	Zn ЦИНК 65,38	Ga ГАЛЛИЙ 69,72	Ge ГЕРМАНИЙ 72,60	As МЫШЬЯК 74,91	Se СЕЛЕН 78,96	Br БРОМ 79,916			Kr КРИПТОН 83,80
5	VI	Rb РУБИДИЙ 85,48	Sr СТРОНЦИЙ 87,63	Y ИТРИЙ 88,92	Zr ЦИРКОНИЙ 91,22	Nb НИОБИЙ 92,91	Mo МОЛИБДЕН 95,95	Tc ТЕХНЕЦИЙ (99)	Ru РУТЕНИЙ 101,1	Rh РОДИЙ 102,91	Pd ПАЛЛАДИЙ 106,7
	VII	Ag СЕРЕБРО 107,880	Cd КАДМИЙ 112,41	In ИНДИЙ 114,76	Sn ОЛОВО 118,70	Sb СУРЬМА 121,76	Te ТЕЛЛУР 127,61	J ИОД 126,91			Xe КСЕНОН 131,3
6	VIII	Cs ЦЕЗИЙ 132,91	Ba БАРИЙ 137,36	La ЛАНТАН 138,92	Hf ГАФНИЙ 178,6	Ta ТАНТАЛ 180,95	W ВОЛЬФРАМ 183,92	Re РЕНИЙ 186,31	Os ОСМИЙ 190,2	Ir ИРИДИЙ 192,2	Pt ПЛАТИНА 195,23
	IX	Au ЗОЛОТО 197,0	Hg РУТУТЬ 200,61	Tl ТАЛЛИЙ 204,39	Pb СВИНЕЦ 207,21	Bi ВИСМУТ 209,00	Po ПОЛОНИЙ 210,0	At АСТАТИН (210)			Rn РАДОН 222,0
7	X	Fr ФРАНЦИЙ (223)	Ra РАДИЙ 226,05	Ac АКТИНИЙ (90-103) 227							

ЛАНТАНОИДЫ	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd
	59 ПРАЗЕОДИЙ 140,92	60 НЕОДИМ 144,27	61 ПРОМЕТИЙ (145)	62 САМАРИЙ 150,43	63 ЕВРОПИЙ 162,0	64 ГАДОЛИНИЙ 156,9
ЛАНТАНОИДЫ	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
	65 ТЕРБИЙ 158,93	66 ДИСПРОЗИЙ 162,46	67 ГОЛЬМИЙ 164,94	68 ЭРБИЙ 167,2	69 ТУЛИЙ 168,94	70 ИТТЕРБИЙ 173,04

26
ЧИСЛО МЕНДЕЛЕЕВА (ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР)
Fe
ХИМИЧЕСКОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ
ЖЕЛЕЗО
НАЗВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА
55,85
ХИМИЧЕСКИЙ АТОМНЫЙ ВЕС

2
14
8
2
ЧИСЛО ЭЛЕКТРОНОВ
В СЛОЯХ

АКТИНОИДЫ	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm
	90 ТОРИЙ 232,05	91 ПРОТАКТИНИЙ 231	92 УРАН 238,07	93 НЕПТУНИЙ (237)	94 ПЛУТОНИЙ (242)	95 АМЕРИЦИЙ (243)	96 КЮРИЙ (243)
АКТИНОИДЫ	Bk	Cf	E	Fm	Mv	102	103
	97 БЕККЕЛИЙ (245)	98 КАЛИФОРНИЙ (246)	99 ЭЙНШТЕЙНИЙ (247)	100 ФЕРМИЙ (248)	101 МЕНДЕЛЕВИЙ (248)	102 НОБИДИЙ	103



I	ЭЛЕКТРОННЫЙ СЛОЙ	K
II	---	L
III	---	M
IV	---	N
V	---	O
VI	---	P
VII	---	Q

ЦЕЛОЕ ЧИСЛО В СКОБКАХ - МАССОВОЕ ЧИСЛО НАИБОЛЕЕ УСТОЙЧИВОГО ИЗОТОПА ИСКУССТВЕННОГО РАДИОАКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА
ЦЕЛОЕ ЧИСЛО БЕЗ СКОБКИ - МАССОВОЕ ЧИСЛО НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННОГО ИЗОТОПА ПРИРОДНОГО РАДИОАКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

ПРИЛОЖЕНИЕ II

ПЕРЕВОДНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ
ЭНЕРГИИ

Единицы измерения	Переводной множитель	Единицы измерения
Миллион электронвольт (Мэв)	1,00	Мэв
	$1,60 \cdot 10^{-6}$	Эрг
	$3,83 \cdot 10^{-14}$	Калория
	$4,45 \cdot 10^{-20}$	Киловатт-час
Эрг	1,00	Эрг
	$6,24 \cdot 10^5$	Мэв
	$2,39 \cdot 10^{-8}$	Калория
	$2,78 \cdot 10^{-14}$	Киловатт-час
Калория	1,00	Калория
	$2,62 \cdot 10^{13}$	Мэв
	$4,18 \cdot 10^7$	Эрг
	$1,16 \cdot 10^{-6}$	Киловатт-час
Киловатт-час	1,00	Киловатт-час
	$2,25 \cdot 10^{19}$	Мэв
	$3,60 \cdot 10^{13}$	Эрг
	$8,60 \cdot 10^5$	Калория

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ
ДЛЯ БОЛЕЕ ГЛУБОКОГО ИЗУЧЕНИЯ ВОПРОСОВ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

Э. В. Шпольский. Атомная физика, т. I и II. Гостехиздат, Москва, 1949.

Я. И. Френкель. Принципы теории атомных ядер, 2-е изд. Издательство Академии наук СССР, Москва, 1955.

Н. А. Власов. Нейтроны. Гостехиздат, Москва, 1955.

Э. Ферми. Ядерная физика. Издательство иностранной литературы, Москва, 1951.

Р. Е. Лепп и Г. Л. Эндрюс. Физика ядерного излучения. Военное Издательство Министерства обороны СССР, Москва, 1956.

Б. Н. Тарусов. Основы биологического действия радиоактивных излучений. Медгиз, Москва, 1955.

Э. Поллард и В. Девидсон. Прикладная ядерная физика. Гостехиздат, Москва, 1947.

В. Векслер, Л. Грошев, Б. Исаев. Ионизационные методы исследований излучений Гостехиздаг, Москва, 1949.

В. Гайтлер. Элементарная квантовая механика. Гостехиздат, Москва, 1948.

Г. Бете. Лекции по теории ядра. Издательство иностранной литературы, Москва, 1949.

Е. М. Балабанов. Ядерные реакторы. Издательство «Знание», Москва, 1955.

Научные и технические основы ядерной энергетики. Сборник, т. I и II. Издательство иностранной литературы, Москва, 1950.

«Энергетические ядерные реакторы и использование продуктов деления». Сборник. Издательство иностранной литературы, Москва, 1955.

Е. М. Балабанов и В. И. Гольданский. Термоядерные реакции. Издательство «Знание», Москва, 1956

«Сессия Академии наук СССР по мирному использованию атомной энергии 1—5 июля 1955 года» Пленарное заседание. Издательство Академии наук СССР, Москва, 1955

«Сессия Академии наук СССР по мирному использованию атомной энергии 1—5 июля 1955 года». Заседания отделения физико-математических наук. Издательство Академии наук СССР, Москва, 1955.

«Сессия Академии наук СССР по мирному использованию атомной энергии 1—5 июля 1955 года» Заседания отделения технических наук. Издательство Академии наук СССР, Москва, 1955.

«Сессия Академии наук СССР по мирному использованию атомной энергии 1—5 июля 1955 года». Заседания отделения химических наук. Издательство Академии наук СССР, Москва, 1955.

«Сессия Академии наук СССР по мирному использованию атомной энергии 1—5 июля 1955 года». Заседания отделения биологических наук. Издательство Академии наук СССР, Москва, 1955.

«Доклады Советской делегации на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955». Физи-

ческие исследования. Издательство Академии наук СССР, Москва, 1955.

«Доклады Советской делегации на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955». Физика реакторов и реакторостроение Издательство Академии наук СССР, Москва, 1955.

«Доклады иностранных ученых на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1955». Экспериментальные реакторы и физика реакторов. Гостехиздат, Москва, 1956.

«Доклады иностранных ученых на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955». Атомная энергетика. Госэнергоиздат, Москва, 1956.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение	3
Глава 1. Физические основы ядерных процессов	4
Атомы	—
Открытие радиоактивности	—
Модель атома Резерфорда	6
Атомное ядро	8
Ядерные силы	11
Энергия атомного ядра	14
Ядерные реакции	20
Ядро — жидкая капля	22
Электронный распад ядра	28
Новые элементарные частицы	34
Глава 2. Ядерный цепной процесс	38
Деление урана	38
Трудная задача	43
Критический вес	45
Атомный взрыв	48
„Горение“ урана	51
Простейший ядерный реактор	52
Медленные нейтроны	53
Глава 3. Физические процессы в ядерных реакторах	54
Гетерогенные реакторы	—
Гомогенные реакторы	58
Классификация ядерных реакторов	59
Искусственное ядерное горючее	60
Новые возможности	62
Размножающие (бридерные) реакторы	63
Работа ядерного реактора	67
Глава 4. Экспериментальные ядерные реакторы	75
Первый советский реактор	—
Реактор для физических и технических исследований (РФТ)	82
Реакторы на тяжелой и простой воде	88
Зарубежные ядерные реакторы	97

	<i>Стр.</i>
Глава 5. Ядерная энергетика	106
Источники энергии	—
Большие трудности на великом пути	107
Ядерное топливо	111
Отвод тепла от ядерного реактора	114
Использование ядерного горючего для получения электрической энергии	124
Советская атомная электростанция	128
Пути развития ядерной энергетики	137
Атомный двигатель	142
Атомная энергия наших дней	148
Атомная энергетика за рубежом	154
Глава 6. Получение и использование радиоактивных веществ	170
Получение радиоактивных веществ в ядерных реакторах	—
На службе человеку	172
Меченые атомы	183
Что такое лучевая болезнь	187
Глава 7. О термоядерных реакциях	191
Соединение легких ядер	—
Энергия Солнца и звезд	193
Солнце на земле	194
Магнитный мешок	195
Близко к великой цели	197
Еще немного фантазии	199
Заключение	203
Приложения	207

К ЧИТАТЕЛЯМ!

Военное Издательство просит присылать свои отзывы на эту книгу по адресу: Москва, 104, Тверской бульвар, 18, Управление Военного Издательства.

Доктор физико-математических наук Ефим Михайлович Балабанов.

Ядерные реакторы

Редактор *Кадер Я. М.*

Консультанты издательства

доктор технических наук *Воскобойник Д. И.*

и инженер-полковник *Михайлов В. А.* доцент, кандидат физико-математических наук

Художественный редактор *Клюева В. Н.* Обложка художника *Митрофанова С. А.*

Технический редактор *Волжова В. Е.* Корректор *Болдина Л. А.*

Сдано в набор 4.06.57.

Г-30614.

Подписано к печати 12.11.57

Формат бумаги $84 \times 108 \frac{1}{32} - 6 \frac{5}{8}$ печ. л. = 10,865 усл. печ. л. + 1 вкл. $-\frac{1}{8}$ п. л. =
= 0,205 = 10,942 уч.-изд. л.

Военное Издательство Министерства обороны Союза ССР

Москва, 104, Тверской бульвар, 18.

Изд. № 1/9225

Цена 3 р. 30 к.

Зак 398

1-я типография имени С. К. Тимошенко

Управления Военного Издательства Министерства обороны Союза ССР

Москва, К-6, проезд Скворцова-Степанова, дом 3.

Цена 3 р. 30 к.