2. Какая доля ядер изотопа германия $^{68}_{32}\mathrm{Ge}$ с периодом полураспада $T_{1/2} = 270$ сут сохранится через промежуток времени $t = 4{,}5$ года?
3. Период полураспада стронция $^{90}_{38}\mathrm{Sr}$ $T_{1/2} = 29$ лет. Сколько времени понадобится для того, чтобы из образца массой $m = 1{,}0$ г осталось $(1/32)$ г?
4. Определите число атомов, содержащихся в свинце $^{210}_{82}\mathrm{Pb}$ массой $m = 0{,}632$ г. Сколько атомов останется через $\Delta t = 95$ лет, если период полураспада $T_{1/2} = 19$ лет?
5. Определите массу m_1 нераспавшегося радиоактивного вещества по истечении суток, если вначале его масса была $m = 1{,}0$ кг. Период полураспада вещества $T_{1/2} = 12$ часов.

§ 40. Деление тяжелых ядер. Цепные ядерные реакции

Открытие деления урана означало появление нового вида топлива — самой массы материи.

Д. Юз

Особое место среди ядерных реакций занимают цепные ядерные реакции деления, которые привели к созданию, с одной стороны, новых источников энергии, а с другой — к появлению нового типа оружия, обладающего колоссальной мощностью. Выясним основные закономерности данного типа реакций и условия их возникновения.

Энергия, высвобождающаяся при ядерной реакции, называется энергетическим выходом ядерной реакции.

Особый тип ядерных реакций представляют ядерные реакции деления элементов, расположенных в конце периодической системы химических элементов. В результате таких реакций выделяется огромное количество энергии. Почему это происходит?

Обратимся к графику, изображенному на рисунке 211 (§ 37). Для тяжелых ядер, например таких как $^{235}_{92}\mathrm{U}$, энергия связи, приходящаяся на нуклон, составляет величину 7,6 МэВ. Если двигаться вдоль кривой на графике зависимости энергии связи от $^{235}_{92}\mathrm{U}$ к месту, где находятся ядра химических элементов из середины периодической системы элементов Менделеева, то видно, что энергия связи возрастает от ~7,5 МэВ до ~8,8 МэВ на нуклон.

Правообладатель Народная асвета

Таким образом, при делении тяжелого ядра на 2—3 более легких осколка, энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон, увеличится на величину порядка 1 МэВ. Согласно закону сохранения энергии такое же количество энергии выделится при делении ядра. Следовательно, в ходе ядерной реакции, приводящей к появлению ядер с большей удельной энергией связи, должна выделяться энергия. Число нуклонов в каждом ядре урана равно $N = 235$. Таким образом, реакция деления одного ядра приводит к выделению около 200 МэВ энергии. Даже учитывая всевозможные потери, это число несравнимо с энергией ~1—5 эВ, выделяемой в химических реакциях окисления (горения топлива).

Такие выводы нашли свое подтверждение в ходе многочисленных экспериментов в первой половине XX в. Основной вопрос заключался в том, как заставить ядро делиться. Бомбардировка α-частицами или протонами неэффективна ввиду их сильного отталкивания ядром. Электроны слишком легкие «снаряды». Выбор пал на нейтроны. Они достаточно тяжелые (по сравнению с электронами) и в то же время электрически нейтральны. Вследствие этого нейтроны могут беспрепятственно подлетать к ядру-мишени, двигаясь со сколь угодно малой скоростью. Попав в сферу действия ядерных сил притяжения, нейтрон проникает в ядро.

В 1938 г. немецкие радиохимики Отто Ган, Фриц Штрассман, Лизе Мейтнер, Отто Фриш впервые осуществили реакцию деления $^{235}_{92}\mathrm{U}$ нейтронами:

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{145}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{88}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n} + 200\ \text{МэВ}.$$

Отметим, что сама идея деления ядра была столь необычна, что ученый мир вначале не воспринял результаты их экспериментов. И только спустя некоторое время было осознано, что ядро урана распадается главным образом на два осколка. В результате деления могут образоваться различные радиоизотопы. В большинстве случаев ядро делится на неравные осколки (ядра): массовое число большего ядра колеблется в пределах от 135—145, а меньшего — от 90—100. В каждом акте деления ядра урана высвобождаются 2—3 нейтрона. Кинетическая энергия разлетающихся осколков составляет величину ~165 МэВ, а остальная часть энергии приходится на нейтроны и гамма-кванты. Данная реакция изображена на рисунке 220.

В 1940 г. советские физики Георгий Флеров и Константин Петржак обнаружили новый вид радиоактивных превращений — спонтанное де-

Правообладатель Народная асвета

ление ядер урана $^{238}_{92}\mathrm{U}$. В процессе деления образуются осколки — изотопы элементов середины периодической системы со значениями Z от 34 (изотоп селена $^{74}_{34}\mathrm{Se}$) до 67 (изотоп гольмия $^{162}_{67}\mathrm{Ho}$).

Новое явление было названо *делением ядра* из-за сходства с делением клетки в биологии. Наиболее вероятным является деление ядра на два осколка. Отношение их масс составляет примерно 3 : 2. Вероятность деления на три осколка составляет величину 10^{-2}—10^{-8} от вероятности деления на два. Реакции деления ядер обычно являются экзоэнергетическими с выделением энергии ~200 МэВ в каждом акте реакции.

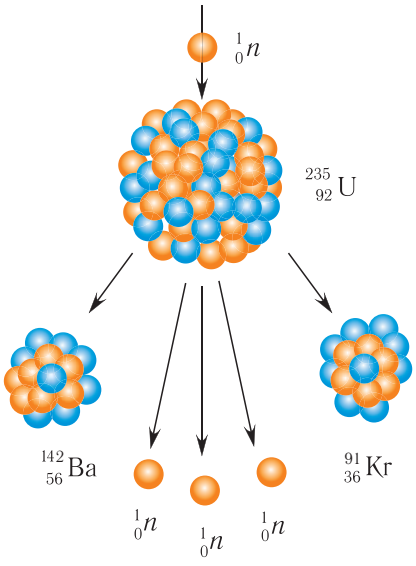


Рис. 220. Реакция деления ядра $^{235}_{92}\mathrm{U}$ под действием нейтрона

При делении ядра урана один нейтрон вызывает деление одного ядра. Два осколка деления, уже не связанные мощными, но короткодействующими ядерными силами, с большими скоростями разлетаются за счет сил электростатического отталкивания. Суммарная кинетическая энергия осколков ($E \approx 170$ МэВ) составляет основную долю всей энергии, освобождаемой при делении ядра ($E \approx 200$ МэВ).

Появление осколков — не единственный результат деления ядра. Начальное отношение числа нейтронов к числу протонов в ядре-осколке заметно больше значения этой величины для стабильных ядер сравнимой массы.

На каждый акт деления ядра образуется в среднем 2—3 новых нейтрона, каждый с энергией в среднем $E \sim 2$ МэВ ($v \sim 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$). Они испускаются ядром урана сразу после деления и называются *мгновенными*. Образовавшиеся осколки являются β^--радиоактивными. Поэтому после ряда их β^--распадов они превращаются в стабильные изотопы. Чаще всего дочернее ядро, образовавшееся после β^--распада, оказывается возбужденным и переходит в основное энергетическое состояние с испусканием γ-кванта или нейтрона, которые испускаются через несколько минут после деления ядра и называются *запаздывающими*. Такие нейтроны составляют около 0,75 % образующихся нейтронов.

Правообладатель Народная асвета

Используемые в качестве сырья для получения искусственного горючего уран $^{238}_{92}\mathrm{U}$ и торий $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ начинают делиться при энергии нейтронов свыше 1 МэВ:

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{239}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{239}_{93}\mathrm{Np} \rightarrow {}^{239}_{94}\mathrm{Pu},$$

$$^{232}_{90}\mathrm{Th} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{233}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{233}_{91}\mathrm{Pa} \rightarrow {}^{233}_{92}\mathrm{U}.$$

Особенность изотопов $^{233}_{92}\mathrm{U}$, $^{235}_{92}\mathrm{U}$ и $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ состоит в том, что они делятся тепловыми нейтронами. В этом и заключается смысл термина «делящийся».

Поскольку деление ядер вызывают нейтроны, а в результате деления опять рождаются нейтроны, то при определенных условиях процесс, начавшись однажды с одного нейтрона, может принять характер *цепной реакции*: за одним делением последуют другие и т. д.

Ядерная реакция деления, в которой частицы (нейтроны), вызывающие реакцию, образуются и как продукты этой же реакции, называется **цепной**.

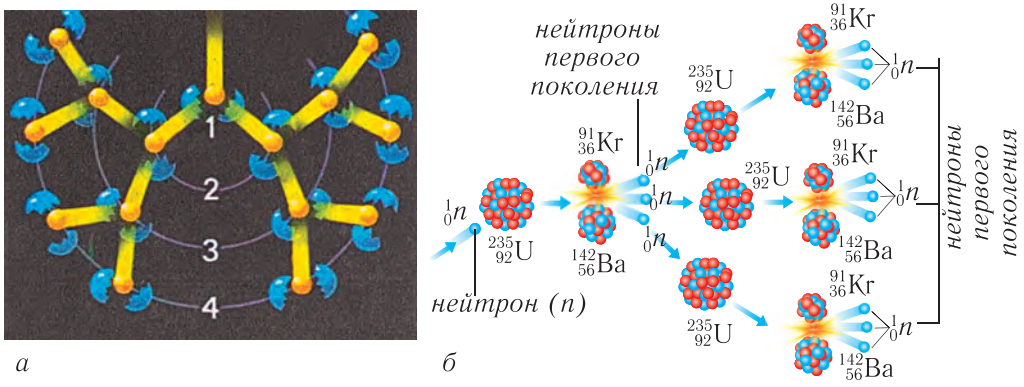
Какие же условия необходимы для цепных ядерных реакций?

Вследствие большой проникающей способности нейтронов и из-за конечных размеров зоны (активной зоны), в которой находится делящееся вещество, многие из нейтронов покидают ее, и цепная реакция не происходит. Поэтому для осуществления цепной реакции определяющее значение имеют размеры зоны, которую называют *активной*, в которой происходит реакция. Минимальные размеры активной зоны, при которых возможно осуществление цепной ядерной реакции, называются *критическими размерами*. От чего же зависят эти размеры?

Критические размеры зависят от природы делящегося вещества, его формы. Чем больше размеры активной зоны, тем выше вероятность поглощения внутри нее нейтронов. Для урана $^{235}_{92}\mathrm{U}$ меньше вероятность вылета нейтронов за пределы зоны до их поглощения, т. е. ее размеры будут меньше, чем для зоны с $^{238}_{92}\mathrm{U}$. Кроме того, размер зоны будет меньше вследствие того, что для расщепления $^{235}_{92}\mathrm{U}$ можно использовать медленные нейтроны.

Критические размеры уменьшатся, если вокруг активной зоны поместить замедлитель (графит, воду), так как вылетающие из нее нейтроны будут отражаться от него и возвращаться обратно в нее. Эффективность их отражения значительно увеличивается при толщине отражателя превышающей среднюю длину пробега нейтронов в нем.

Правообладатель Народная асвета



а *б*

Рис. 221. *а* — цепная реакция деления (1 — первичный нейтрон (первое поколение); 2 — второе поколение, 3 — третье поколение); *б* — схема реакции

Оценим критическую массу делящегося вещества в такой зоне. Наименьшие размеры и массу имеет вещество шарообразной формы, так как для него отношение площади поверхности к объему минимально. Радиус шара должен быть больше длины пробега нейтрона до соударения с ядром. Тогда критическую массу урана $^{235}_{92}\mathrm{U}$ можно оценить, и она составляет примерно 48 кг. При плотности урана $1{,}895 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ радиус шара такой массы равен примерно 8,5 см. Для изотопа плутония $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ критическая масса составляет уже 17 кг, что соответствует шару радиуса 6,0 см.

Вновь образованные при ядерной реакции деления два или три нейтрона вызовут дополнительные акты деления, так что процесс лавинообразно нарастает (рис. 221).

Так запускается цепная реакция деления, при которой вновь образовавшиеся нейтроны вызывают процесс деления новых ядер, подобно тому, как ряд поставленных домино «заваливается друг на друга».

Подобное неконтролируемое (неуправляемое) развитие цепной реакции приводит к освобождению колоссального количества энергии за очень короткий промежуток времени. Именно такие процессы происходят при ядерном взрыве (рис. 222).

Количество нейтронов, возникающих в одном акте деления, называется *поколением* нейтронов.

Рис. 222. Ядерный взрыв

Правообладатель Народная асвета

Количественной характеристикой цепной реакции деления является **коэффициент размножения нейтронов:**

$$k = \frac{n_2}{n_1},$$

где n_2 — число нейтронов в данном поколении, n_1 — число нейтронов в предыдущем поколении. Если коэффициент размножения $k = 1$, то число нейтронов в нем все время остается неизменным. При $k > 1$ общее число нейтронов в реакторе увеличивается со временем и возможно их неконтролируемое размножение, приводящее к взрыву. При $k < 1$ число нейтронов уменьшается, и реакция с течением времени прекращается.

Нейтроны могут поглощаться различными примесями, покидать область, в которой происходит реакция, терять свою энергию в результате большого числа актов рассеяния. С учетом всех возможных потерь коэффициент размножения k должен быть больше единицы для цепной ядерной реакции.

Цепная ядерная реакция будет *самоподдерживающейся*, если количество нейтронов в каждом следующем поколении не уменьшается.

Таким образом, для цепных самоподдерживающихся ядерных реакций необходимы следующие условия:

1) необходимо иметь минимальное количество вещества, чтобы нейтроны успели возбудить ядро до выхода из области, занимаемой делящимся веществом;

2) энергия нейтронов, возникающих при делении, должна быть достаточной, чтобы вызвать деление ядер;

3) коэффициент размножения нейтронов $k > 1$;

4) отсутствие примесей, поглощающих образующиеся нейтроны.

▶ Ядерное «горючее» в атомной бомбе содержится в виде разделенных друг от друга порций докритической массы. Обычный (тротиловый) взрыв соединяет горючее в единый образец, масса которого превышает критическую. После этого через ничтожно малое время следует ядерный взрыв.

Цепная ядерная реакция впервые была осуществлена в США Энрико Ферми в 1942 г., в СССР — Игорем Курчатовым в 1946 г.

Называя энергию, выделяющуюся при делении ядра, атомной, мы допускаем двойную неточность. Во-первых, делится не атом, а ядро, а во-вторых, выражение «атомная энергия» в буквальном смысле означает «энергия неделимого». Правильно ее называть ядерной энергией.

Правообладатель Народная асвета

1. Что называют делением ядра? В чем заключаются особенности этого процесса?
2. Как объяснить способность тяжелых ядер к делению? Почему при делении ядер происходит выделение энергии?
3. Опишите механизм деления ядра урана и напишите уравнение данной ядерной реакции.
4. Что называют цепной ядерной реакцией? Благодаря чему оказалось возможным существование цепной ядерной реакции деления?
5. Изобразите графически и объясните процессы, происходящие при цепной реакции в уране $^{235}_{92}\mathrm{U}$.

Упражнение 26

Определите энергетический выход реакций:

а) $^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \to {}^{145}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{88}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,{}^{1}_{0}n$; б) $^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \to {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2\,{}^{1}_{0}n$;

в) $^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \to {}^{96}_{37}\mathrm{Rb} + {}^{137}_{55}\mathrm{Cs} + 3\,{}^{1}_{0}n$; г) $^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \to {}^{87}_{35}\mathrm{Br} + {}^{146}_{57}\mathrm{La} + 3\,{}^{1}_{0}n$.

Массы изотопов (а.е.м.): $^{145}_{56}\mathrm{Ba}$ — 144,92763; $^{88}_{36}\mathrm{Kr}$ — 87,91445; $^{140}_{54}\mathrm{Xe}$ — 139,92164; $^{94}_{38}\mathrm{Sr}$ — 93,91536; $^{96}_{37}\mathrm{Rb}$ — 95,93427; $^{137}_{55}\mathrm{Cs}$ — 136,90709; $^{87}_{35}\mathrm{Br}$ — 86,92071; $^{146}_{57}\mathrm{La}$ — 145,92579.

§ 41. Ядерный реактор

Для реализации управляемой цепной реакции созданы специальные устройства — ядерные реакторы, позволяющие получать электроэнергию в промышленных масштабах. Как это происходит? Как устроен ядерный реактор? Какие проблемы он создает для окружающей среды?

Цепная реакция может быть управляемой и неуправляемой (ядерный взрыв). Для управления цепной реакцией необходимо очень точно контролировать процесс размножения нейтронов с помощью поглотителей нейтронов (рис. 223), делая его таким, чтобы число нейтронов в процессе реакции оставалось практически неизменным.

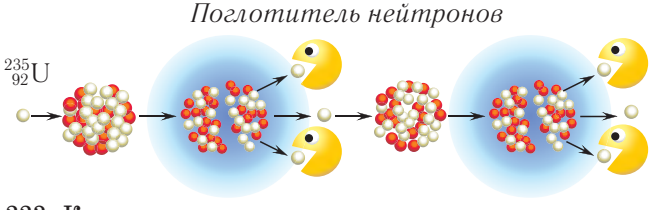


Рис. 223. Контролируемая ядерная реакция в ядерном реакторе

Правообладатель Народная асвета

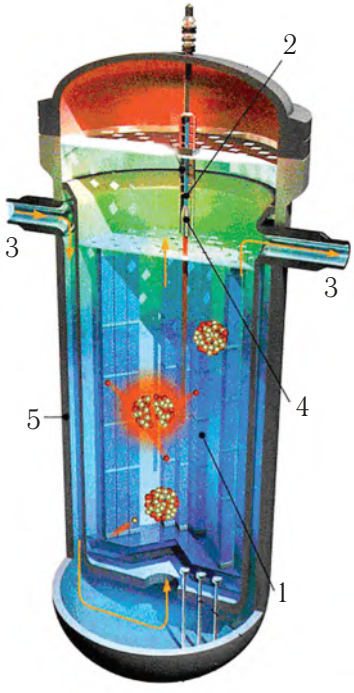


Рис. 224. Схема ядерного реактора: *1* — активная зона с твэлами; *2* — замедлитель (обычная, тяжелая вода); *3* — система отвода теплоносителя; *4* — стержни управления реакцией; *5* — защитный корпус

Определяющую роль в управлении цепными ядерными реакциями в реакторах играют *запаздывающие нейтроны*. Их среднее время жизни для $^{235}_{92}\mathrm{U}$ составляет несколько секунд. Это дает возможность для манипулирования управляющими стержнями с целью поддержания коэффициента размножения нейтронов $k = 1$.

Ядерный реактор — это устройство, в котором происходит управляемая цепная ядерная реакция деления ядер тяжелых элементов под действием нейтронов (рис. 224). В ходе реакции освобождается энергия, которую можно использовать для производства электрической энергии.

Ядерный реактор имеет пять основных составных частей, изображенных на рисунке 224. Упрощенная (функциональная) схема ядерного реактора приведена на рисунке 225.

1. *Активная зона*, которая содержит ядерное горючее, находящееся в специальных тепловыделяющих элементах, или *твэлах* (по первым буквам словосочетания). Твэлы представляют собой очень длинные трубки, проходящие через всю активную зону реактора. Именно в них идет цепная реакция. Активная зона окружена отражателем нейтронов, возвращающим их внутрь активной зоны для продолжения реакции. Хорошим отражателем нейтронов является бериллий.

В качестве ядерного горючего используется три вида радиоактивных изотопов: урана $^{238}_{92}\mathrm{U}$, $^{235}_{92}\mathrm{U}$ и плутония $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$.

2. *Замедлитель быстрых нейтронов* (графит, обычная и тяжелая вода, бериллий, окись бериллия, гидриды металлов, органические жидкости). Средняя энергия нейтронов, появляющихся в реакторе, около $E \sim 2$ МэВ. Если энергия нейтронов меньше $E \sim 0{,}1$ эВ, то их называют *тепловыми*, так как их скорости близки к скорости теплового движения, модуль которой $2{,}2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Если энергия нейтронов больше 0,1 МэВ,

Правообладатель Народная асвета

а модуль их скорости $\sim 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, то нейтроны называют *быстрыми*. Промежуточная область энергий отведена промежуточным (резонансным) нейтронам. Замедлитель эффективно отбирает энергию от быстрых нейтронов, рождающихся в реакции деления. (Вспомните столкновение двух тел одинаковой массы.) Нейтроны замедляются (отсюда и название вещества — замедлитель) до энергий порядка долей электронвольта.

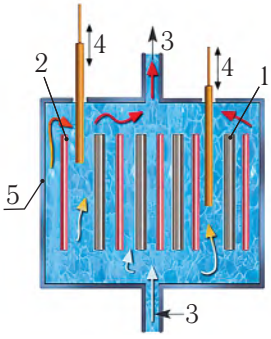


Рис. 225. Схема активной зоны реактора: *1* — активная зона с твэлами; *2* — замедлитель (вода); *3* — система отвода теплоносителя; *4* — стержни управления реакцией; *5* — защитный корпус

Под действием медленных (тепловых) нейтронов делится лишь достаточно редкий в природе изотоп урана $^{235}_{92}\text{U}$, в то время как гораздо более распространенный изотоп $^{238}_{92}\text{U}$ поглощает тепловые нейтроны без деления на осколки. При каждом акте деления $^{235}_{92}\text{U}$ выделяется в среднем $W = 170$ МэВ в виде кинетической энергии разлетающихся осколков. Делящиеся под действием тепловых нейтронов изотопы $^{239}_{94}\text{Pu}$, $^{233}_{92}\text{U}$ в природе не встречаются и получаются искусственным путем.

В реакторах на быстрых нейтронах используются *урано-плутониевый* цикл, в котором ядро $^{238}_{92}\text{U}$ превращается в ядро $^{239}_{94}\text{Pu}$ и *ториевый* цикл, в котором ядро $^{230}_{90}\text{Th}$ превращается в ядро $^{233}_{92}\text{U}$.

Ядра изотопа $^{238}_{92}\text{U}$ могут делиться только под действием быстрых нейтронов. Однако основной реакцией при взаимодействии с нейтронами является захват нейтрона, после которого они самопроизвольно превращаются в ядра изотопа плутония $^{239}_{94}\text{Pu}$:

$$^{238}_{92}\text{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{239}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^{239}_{94}\text{Pu}.$$

Полученный изотоп $^{239}_{94}\text{Pu}$ является практически стабильным, так как его период полураспада $T_{1/2} = 24\,400$ лет. Плутоний $^{239}_{94}\text{Pu}$ по способности к взаимодействию с нейтронами похож на изотоп урана $^{235}_{92}\text{U}$. При захвате нейтрона ядро плутония делится и испускает в среднем 2—3 нейтрона, которые способны поддерживать развитие цепной реакции.

Под действием быстрых нейтронов ядро изотопа тория $^{232}_{90}\text{Th}$ также самопроизвольно претерпевает цепочку распадов, превращаясь в ядро изотопа $^{233}_{92}\text{U}$:

$$^{232}_{90}\text{Th} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{233}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{233}_{91}\text{Pa} \rightarrow {}^{233}_{92}\text{U}.$$

Правообладатель Народная асвета

Изотоп урана $^{233}_{92}\mathrm{U}$ также является практически стабильным, так как его период полураспада $T_{1/2} = 162\,000$ лет, но он делится тепловыми нейтронами.

Таким образом, захват быстрых нейтронов изотопами $^{238}_{92}\mathrm{U}$ и $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ позволяет осуществлять воспроизводство ядерного горючего $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ и $^{233}_{92}\mathrm{U}$.

Ядерный реактор на быстрых нейтронах выполняет одновременно две функции — производство энергии и воспроизводство ядерного горючего. Именно поэтому он называется еще реактором-размножителем (бридером). Кроме того, в нем можно использовать в качестве горючего не только редкий в природе изотоп урана $^{235}_{92}\mathrm{U}$, но и гораздо более распространенный изотоп урана $^{238}_{92}\mathrm{U}$.

В связи с тем, что запасы естественно делящихся радиоактивных изотопов ограничены, возможность осуществления процессов производства ядерного горючего $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ и $^{233}_{92}\mathrm{U}$ в реакторах на быстрых нейтронах имеет принципиальный характер для будущего ядерной энергетики. Кроме того, ядерные реакторы на тепловых нейтронах способны «сжечь» только (0,5—1) % урана $^{235}_{92}\mathrm{U}$. Применение реактора-размножителя позволяет увеличить эффективность использования горючего в десятки раз.

3. *Система охлаждения* — теплоноситель (для отвода из активной зоны реактора выделяющейся в ней энергии) — вода, газы, жидкий натрий. Вода нагревается стенками твэлов до температуры $t = 300$ °C и под давлением порядка $p \sim 10^7$ Па (100 атм) выводится из активной зоны. Далее вода превращается в пар и направляется к паровым турбинам для генерации электрической энергии.

4. *Система регулирования* — устройство для обеспечения возможности управления цепной реакцией. В системе регулирования используются поглотители (стержни) из бора, т. е. вещества, которое активно поглощает нейтроны.

Если стержни с поглотителем ввести в активную зону, то коэффициент размножения нейтронов уменьшается. И, наоборот, выведение стержней из активной зоны увеличивает коэффициент размножения. Этим и достигается управление реакцией. Обычно это делается автоматически. В нештатных ситуациях предусмотрено экстренное прекращение цепной реакции, которое осуществляется сбрасыванием в активную зону специальных аварийных стержней (стержней безопасности).

5. *Система безопасности* — оболочка из бетона с железным наполнителем (для защиты окружающего пространства от ионизирующего излучения компонентов топлива и продуктов ядерной реакции).

Правообладатель Народная асвета

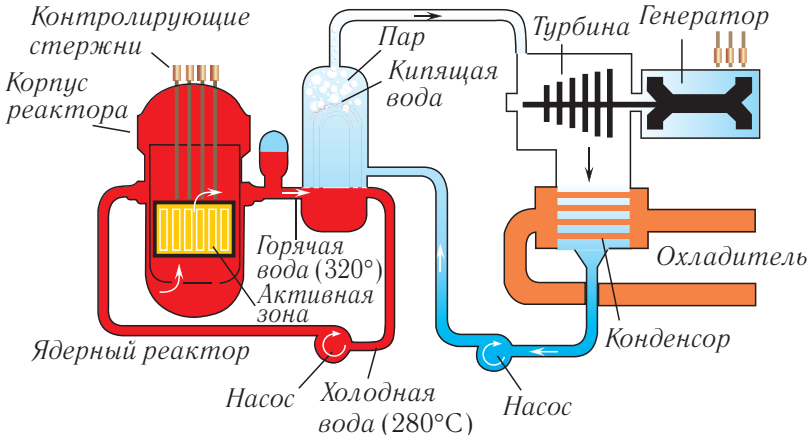


Рис. 226. Диаграмма, показывающая работу атомной электростанции с герметичным водяным контуром охлаждения

Ядерные реакторы различаются по типу используемого ядерного горючего, замедлителя и теплоносителя.

Выработка электроэнергии, основанная на использовании управляемой ядерной реакции, производится на атомных электростанциях (АЭС) (рис. 226).

Преимущества атомных электростанций:

1) не потребляют кислород и органическое топливо;

2) отсутствует загрязнение окружающей среды золой, серой и другими продуктами сгорания органического топлива.

Опасные факторы воздействия АЭС на окружающую среду:

1) радиоактивные отходы;

2) радиоактивное загрязнение местности;

3) опасность экологических катастроф;

4) нарушение теплового баланса в окрестности АЭС.

Всем известна Чернобыльская катастрофа, произошедшая на 4-м блоке Чернобыльской атомной станции в апреле 1986 г. В результате нарушения технологических процессов произошло перегревание активной зоны. Последовавший за этим взрыв разрушил оболочку реактора. Большое количество радиоактивных веществ было выброшено в атмосферу. Кратковременному загрязнению короткоживущими изотопами подверглись огромные территории. Долговременное загрязнение сделало невозможными для проживания тысячи квадратных километров территории Беларуси, России и Украины, где выпали наиболее опасные нуклиды стронция $^{90}_{38}\mathrm{Sr}$ (период полураспада 27,7 года) и цезия $^{137}_{55}\mathrm{Cs}$ (период

Правообладатель Народная асвета

полураспада около 30 лет). Нуклиды $^{90}_{38}\mathrm{Sr}$ откладываются в костных тканях и костном мозге — органе кроветворения, что может привести к развитию рака крови (лейкемии) и костей. Нуклиды $^{137}_{55}\mathrm{Cs}$, попадающие в организм главным образом через пищеварительный тракт и дыхательные пути, накапливаются в основном в скелетных мышцах, испускают γ-излучение, наносящее значительные повреждения организму.

▶ Первая в мире атомная электростанция была построена в СССР в г. Обнинске и дала ток 27 июня 1954 г.
Первая в Беларуси атомная электростанция построена в северо-западной части страны вблизи города Островец Гродненской области. Ее проектная мощность с двумя энергоблоками составляет 2,4 ГВт.

1. Что называют ядерным реактором? Что является ядерным горючим в реакторах?
2. Какое вещество служит замедлителем нейтронов в ядерных реакторах? Зачем нужен замедлитель?
3. Что используют в качестве теплоносителя в ядерных реакторах?
4. Как осуществляется управление цепной реакцией деления?
5. Что применяется в системе биологической защиты от потока нейтронов и γ-излучения, возникающих в реакторе?
6. В чем состоят преимущества использования атомных электростанций по сравнению с тепловыми электростанциями?
7. В чем заключаются основные недостатки ядерной энергетики?

§ 42. Реакции ядерного синтеза

В недрах светящихся звезд (в т. ч. и Солнца) «бушуют» ядерные реакции синтеза, приводящие к выделению энергии с их поверхности в виде излучения. Энергетическая проблема будущего на нашей планете (с учетом ограниченности запасов угля, нефти и газа) может быть решена за счет создания управляемой реакции термоядерного синтеза, в которой будут использованы воды Мирового океана.

Несмотря на то что атомные электростанции экологически более чистые по сравнению с тепловыми электростанциями, у ядерной энергетики есть существенные недостатки. Во-первых, радиоактивные элементы (уран и торий) составляют $\sim (3-8)\cdot 10^{-4}$ % по массе в земной коре и их добыча все усложняется. Во-вторых, что делать с растущим количеством радиоактивных отходов?

Правообладатель Народная асвета

Этих недостатков можно избежать, если для получения энергии использовать не реакции деления тяжелых ядер, а реакции синтеза легких ядер.

Эти реакции эффективно протекают при сверхвысоких температурах $T \sim 10^9$ K и самоподдерживаются за счет значительного выделения в них энергии. Такие реакции названы **термоядерными**. Причина выделения энергии та же, что и в случае реакций деления — удельная энергия связи продуктов реакции выше, чем у исходных материалов.

Энергия покоя двух легких ядер больше, чем у образованного из них результирующего ядра. Так как результирующее ядро имеет меньшую массу, то при его образовании должна высвобождаться энергия $Q = \Delta mc^2$.

Простейшим примером термоядерной реакции является преобразование дейтерия ${}^2_1\text{H}$ в гелий ${}^4_2\text{He}$:

$$ {}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}. $$

Массовое число ядра дейтерия ${}^2_1\text{H}$ $m_\text{H} = 2{,}01355$ а.е.м., массовое число ядра гелия ${}^4_2\text{He}$ $m_\text{He} = 4{,}00150$ а.е.м. В результате реакции синтеза дефект масс:

$$ \Delta m = m_\text{He} - 2m_\text{H} = 4{,}00150 \text{ а.е.м.} - 2 \cdot 2{,}01355 \text{ а.е.м.} = -0{,}0256 \text{ а.е.м.} $$

Это составляет 0,63 % общей массы ядер водорода. В то время как при делении урана дефект масс составляет 0,056 %. Следовательно, для одной и той же массы вещества при ядерном синтезе выделяется примерно в 10 раз больше энергии, чем при делении ядра. Если бы этот процесс удалось использовать для производства энергии, то он оказался бы в 10 раз эффективнее процесса деления урана.

Основное преимущество использования ядерного синтеза для получения энергии заключается, прежде всего, в количестве запасов топлива. Для человечества было бы очень удобно, если бы для реакции синтеза требовался наиболее часто встречающийся изотоп водорода ${}^1_1\text{H}$. Однако для реакции синтеза его необходимо нагреть до колоссальной температуры. Дейтерий ${}^2_1\text{H}$ вступает в реакцию синтеза при более низкой температуре, чем изотоп водорода ${}^1_1\text{H}$, а тритий ${}^3_1\text{H}$ еще при более низкой температуре. Но так как тритий ${}^3_1\text{H}$ нестабилен, то в качестве основного ядерного топлива остается лишь дейтерий ${}^2_1\text{H}$.

В Мировом океане из 7000 атомов водорода только один является дейтерием ${}^2_1\text{H}$. Следовательно, запасы дейтерия в нем составляют 80 000 км^8. В результате реакции синтеза водорода, который содержится в 1 л воды,

Правообладатель Народная асвета

выделяется столько же энергии, сколько выделяется при сгорании 300 л бензина. Следовательно, из дейтерия, содержащегося в океане, можно получить столько энергии, сколько выделяется при сгорании бензина, объем которого превышает объем земного шара, т. е. его запасы практически неисчерпаемы. Кроме того, при реакциях синтеза фактически не образуются радиоактивные отходы.

Однако серьезным препятствием на пути к получению энергии является кулоновское отталкивание ядер дейтерия, которое при комнатной температуре не позволяет им сблизиться до расстояний, на которых сказываются короткодействующие ядерные силы притяжения. Для преодоления сил отталкивания необходимо нагреть дейтерий ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ до очень высоких температур $T \sim 10^9$ К, при которых возможны реакции синтеза. Это является существенным препятствием для широкого применения реакций ядерного синтеза в энергетике. Эта температура намного выше температуры внутри Солнца ($T \sim 10^7$ К). Термоядерная реакция происходит и в других звездах. В них есть одно существенное преимущество: благодаря колоссальным массам и размерам в них оптимально решается проблема гравитационного удержания и термоизоляции вещества, представляющего собой плазму.

Основным источником энергии Солнца являются реакции, приводящие к превращению четырех протонов в ядро гелия ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ с выделением 26,72 МэВ энергии:

$$4\,{}^{1}_{1}p \to {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{0}_{1}e + 2\gamma + 2\nu_e.$$

В природных условиях такие реакции протекают лишь в недрах звезд, а для осуществления их на Земле необходимо сильно разогреть вещество либо ядерным взрывом, либо мощным газовым разрядом, либо гигантским импульсом лазерного излучения, либо бомбардировкой интенсивным пучком частиц.

Для управления реакциями синтеза необходимо создать термоядерный реактор. Наиболее вероятно осуществление такого реактора на следующих **ядерных реакциях синтеза**:

$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \to {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n + 17{,}59\ \text{МэВ}, \qquad (1)$$

$${}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \to {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{1}_{0}n + 11{,}53\ \text{МэВ}, \qquad (2)$$

$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \to {}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}p + 4{,}03\ \text{МэВ}, \qquad (3)$$

$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \to {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n + 3{,}27\ \text{МэВ}. \qquad (4)$$

Правообладатель Народная асвета

Наиболее доступной из реакций синтеза (по области необходимых температур) и энергетически выгодной является реакция (1) между ядрами дейтерия и трития. При этом на один нуклон выделяется 3,5 МэВ, а при реакциях деления — 1 МэВ. Для того чтобы дейтерий мог проникнуть к ядру трития, ему необходимо иметь энергию порядка 1 МэВ. Рассчитаем температуру, которую должна иметь частица, чтобы иметь такую энергию.

Средняя кинетическая энергия частицы в газе $E = \frac{3}{2}kT$, тогда

$$T = \frac{2E}{3k} = \frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Кл} \cdot 1 \cdot 10^{6}\ \text{В}}{3 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} = 7{,}7 \cdot 10^{9}\ \text{К}.$$

При такой температуре вещества почти каждое столкновение частиц приводило бы к ядерной реакции, однако на Земле такие условия недостижимы.

В проблеме термоядерного синтеза есть еще один вопрос: где взять тритий? Тритий в природе содержится в незначительном количестве. Он образуется в верхних слоях атмосферы при соударении космических частиц с атомами азота. Но его можно получать в ядерных реакторах при облучении ${}^{6}_{3}\text{Li}$ нейтронами. Он может быть получен в самом термоядерном реакторе, если использовать мощные потоки нейтронов:

$${}^{6}_{3}\text{Li} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{3}_{1}\text{H} + {}^{4}_{2}\text{He}.$$

Дейтерий присутствует в природном водороде, и его можно получить, разделяя изотопы водорода. Запасы дейтерия в Мировом океане огромны, на многие тысячи лет хватит также запасов лития, необходимого для производства другого изотопа — трития.

Для практического управления термоядерными реакциями важнейшим является создание таких условий, при которых высокотемпературная плазма с помощью магнитных полей устойчиво удерживается в состоянии теплоизоляции. Для этой цели применяются магнитные камеры. Основными видами потерь являются теплота, уходящая через стенки реактора, и тормозное излучение в плазме.

К преимуществам использования реакций синтеза для получения энергии относятся:

1) высокий выход энергии;

2) экологическую безопасность реактора;

3) отсутствие проблемы захоронения радиоактивных отходов.

Правообладатель Народная асвета

Осуществить управляемую термоядерную реакцию в промышленных масштабах, т. е. добиться энергетического выхода, превышающего затраты, пока не удалось.

На Земле удалось осуществить в настоящее время лишь неуправляемую термоядерную реакцию синтеза при взрыве водородной бомбы. Следует заметить, что сначала в водородной бомбе взрывается находящаяся внутри нее атомная бомба. В результате происходит резкий рост температуры до значений $(10-20)\cdot 10^6$ К, при этом возникает поток нейтронов и электромагнитного излучения. Нейтроны вступают в реакцию с изотопом лития, находящимся в бомбе, с образованием трития:

$$^1_0n + {}^6_3\mathrm{Li} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^3_1\mathrm{H} + 4{,}6\ \text{МэВ}.$$

Повышение температуры до необходимого значения вместе с образовавшимся тритием приводят к термоядерной реакции:

$$^2_1\mathrm{H} + {}^3_1\mathrm{H} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^1_0n + 17{,}59\ \text{МэВ}.$$

Основная часть энергии (70 %) уносится быстрыми нейтронами и ядрами атомов гелия (20 %).

▶ Исследование механизмов ядерного синтеза и распространенности различных ядер дает возможность заглянуть в далекое прошлое, когда «рождались» химические элементы. Изучение радиоактивности, открытие деления и синтеза ядер показали, что на ранних стадиях Вселенная состояла только из самых легких элементов — водорода и гелия, а все более тяжелые элементы образовались в результате ядерных реакций в звездах и при взрывах звезд.

В 2005 г. было принято решение о строительстве Международного экспериментального термоядерного реактора в г. Кадараш (Франция).

1. Какие реакции называются термоядерными?
2. Как объяснить, что при синтезе легких ядер выделяется энергия?
3. Каковы условия осуществления ядерной реакции синтеза?
4. Как называются наиболее известные изотопы водорода и как их обозначают?
5. Сравните энергию, приходящуюся на один нуклон при термоядерной реакции и цепной ядерной реакции.
6. Обсудите достоинства и недостатки различных способов получения энергии: сжигание ископаемого горючего, деление ядра и ядерный синтез.

Правообладатель Народная асвета

7. Применима ли формула Эйнштейна $E = mc^2$:
а) к делению ядер;
б) к ядерному синтезу;
в) к ядерным реакциям?
8. Источником электромагнитной энергии, излучаемой Солнцем и другими звездами, служит термоядерный синтез. Какие условия в недрах звезд делают возможным протекание термоядерного синтеза?

§ 43. Ионизирующее излучение. Элементы дозиметрии

Человек ежесекундно подвергается воздействию излучений. Излучение Солнца является одним из ключевых факторов возникновения и существования жизни на Земле. Однако некоторые виды излучения опасны для здоровья человека. Какие это излучения? Как от них можно защититься?

Заряженные частицы, рентгеновское и γ-излучения, распространяясь в веществе, взаимодействуют с его атомами. За счет своей энергии частицы излучения могут ионизировать атомы, выбивая из них электроны. Часто одна частица в состоянии ионизировать несколько атомов, поэтому процесс распространения такого излучения через вещество сопровождается его сильной ионизацией. Вследствие этого **ионизирующим** называют такой вид излучения, взаимодействие которого с веществом приводит к ионизации его атомов и молекул (рис. 227).

Основу биологического действия ионизирующего излучения на живые ткани составляют химические процессы, происходящие в их клетках при

Рис. 227. Виды излучения

Правообладатель Народная асвета