

При энергии нейтронов  $E_n = 7 \div 200$  эв возникает особенно сильное резонансное поглощение их  $U^{238}$  (рис. 73). Оно оборвет цепную реакцию, не дав нейтронам замедлиться до тепловых энергий.

Так как урана-238 в 140 больше, чем 235-го, то в естественной смеси изотопов урана вероятность обрыва цепи преобладает над вероятностью разветвления, и цепная реакция не в состоянии развиваться ни на медленных, ни на быстрых нейтронах.

Эту трудность можно преодолеть двумя путями.

1. Уменьшать содержание  $U^{238}$ , т. е. обогащать смесь изотопом  $U^{235}$ .

2. Замедлять нейтроны легкими водородсодержащими веществами, чтобы они теряли энергию большими порциями и «проскакивали» через опасную область резонансов  $U^{238}$ . Однако обычный водород захватывает нейтроны, что увеличивает вероятность обрыва цепи. Поэтому для замедления нейтронов лучше использовать углерод (графит), дейтон (тяжелая вода) или бериллий, которые поглощают нейтроны слабее.

#### § 42. ЦЕПНАЯ ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ И ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ

Для поддержания цепной реакции нет необходимости, чтобы каждый нейтрон, получающийся при делении, вызвал вторичное деление. Минимальное условие состоит лишь в том, чтобы в среднем при делении каждого ядра производился по крайней мере один нейтрон, вызывающий деление следующего ядра.

Выше уже говорилось, что в единичном акте рождается в среднем  $\approx 2,5$  нейтрона, но часть из них исчезает за счет резонансного захвата ( $n, \gamma$ ) и утечки нейтронов из системы.

Минимальное условие возникновения цепной реакции удобно выразить, введя коэффициент размножения или коэффициент воспроизводства системы, определяемый как отношение числа тепловых нейтронов какого-либо одного поколения к числу тепловых нейтронов в предшествующем поколении:

$$K = \frac{n_i}{n_{i-1}}.$$

Система, в которой  $K=1$ , называется *критической системой*, в ней цепная реакция идет с постоянной скоростью.

Если  $K>1$ , то система называется *надкритической*; в ней осуществляется цепная реакция с нарастающей во времени интенсивностью. Если  $K<1$ , система называется *подкритической*; цепная реакция в ней затухает.

Скорость нарастания реакции определяется величиной коэффициента размножения  $K$  и временем, проходящим между двумя последовательными актами деления, т. е. средним временем жизни одного поколения нейтронов  $\tau$ .

Прирост числа нейтронов за одно поколение составляет, таким образом:

$$\Delta n = n(K - 1),$$

а за единицу времени:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n(K - 1)}{\tau}. \quad (111)$$

Решение уравнения (111) позволяет найти число нейтронов в момент  $t$ :

$$n = n_0 e^{\frac{K-1}{\tau} t},$$

где  $n_0$  — число нейтронов в начале процесса. Итак, количество тепловых нейтронов, находящихся в реакторе, нарастает по экспоненциальному закону.

Значение коэффициента размножения любой системы, состоящей из урана и замедлителя, зависит от того, какая доля нейтронов теряется за счет следующих основных процессов:

- а) вылета из системы;
- б) захвата ураном-238 без деления [реакция  $(n, \gamma)$ ];
- в) захвата без деления замедлителем, различными примесями, а также продуктами деления;
- г) захвата с делением на медленных нейтронах ураном-235 или на быстрых нейтронах как ураном-238, так и ураном-235.

Во всех четырех процессах нейтроны удаляются из системы, и только в четвертом процессе взамен исчезнувших возникают новые нейтроны. Впервые вычисление коэффициента размножения было произведено Ферми, Вигнером и др.

**Коэффициент размножения бесконечной среды.** Представим коэффициент размножения в виде двух сомножителей, один из которых определяется свойством материала, а другой зависит от геометрии системы. Первый сомножитель называется коэффициентом размножения бесконечной среды и обозначается  $K_\infty$ . Он не учитывает утечку нейтронов из системы:

$$K = K_\infty \kappa.$$

Здесь  $\kappa$  — вероятность того, что нейтрон избежит утечки, т. е. останется в системе конечных размеров. Ее значение зависит от геометрии системы.

Рассмотрим судьбу одного поколения нейтронов. Допустим, что сначала в смеси урана и замедлителя было  $n_0$  быстрых нейтронов. До того, как их скорость изменится, они могут вызвать деление ядер урана-238 и урана-235. При этом число нейтронов возрастает в  $\epsilon$  раз и будет равно

$$n' = n_0 \epsilon,$$

где  $\epsilon$  — коэффициент размножения на быстрых нейтронах ( $\epsilon \approx 1,03$ ). Такое количество нейтронов замедлится, проходя через резонансную область поглощения  $U^{238}$ : из них  $n'' = n_0 \epsilon p$  сохранится в системе после замедления до тепловых скоростей, а  $n_0 \epsilon (1-p)$  испытают резонансный захват, где  $p$  — вероятность избежать резонансного захвата, зависящая от относительного количества замедлителя и урана и от их расположения в реакторе.

Тепловые нейтроны могут быть поглощены либо ураном, либо замедлителем, например графитом, либо примесями. Введем коэффициент использования тепловых нейтронов  $f$ , определяющий долю тепловых нейтронов, поглощенных ядрами урана:

$$f = \frac{\sigma_y N_y}{\sigma_3 N_3 + \sigma_y N_y},$$

где  $\sigma_y$ ,  $\sigma_3$  — соответствующее эффективное сечение,  $N_y$  — число ядер урана,  $N_3$  — замедлителя в  $1 \text{ см}^3$  системы,  $f$  зависит от состава уранографитовой смеси и от ее расположения.

Тогда число тепловых нейтронов, захваченных ядрами урана, будет равно  $n''' = n_0 \epsilon p f$ . Но не все ядра испытают деление.

Обозначим через  $\eta$  — среднее число нейтронов, выделяющихся при поглощении ураном каждого теплового нейтрона

$$\eta = \nu \frac{\sigma_{\text{дел}}}{\Sigma \sigma_i},$$

где  $\nu$  — среднее число нейтронов, возникающих при делении;  $\sigma_{\text{дел}}$  — сечение деления;  $\sigma_i$  — сечение различных процессов захвата (включая  $\sigma_{\text{дел}}$ ).

Таким образом,  $n_0$  быстрых нейтронов первого поколения дадут

$$n'''' = n_0 \epsilon p f \eta$$

быстрых нейтронов во втором поколении; следовательно, коэффициент размножения бесконечной среды

$$K_\infty = \frac{n_0 \epsilon p f \eta}{n_0} = \epsilon p f \eta. \quad (112)$$

Обычно

$$\epsilon > 1; \quad \eta > 1; \quad p < 1; \quad f < 1.$$

Для поддержания цепной реакции необходимо, чтобы  $p$  и  $f$  имели возможно большие значения. Но эти величины взаимосвязаны; увеличение одной из них ведет к уменьшению другой. Если много замедлителя, то увеличивается вероятность нейтрону избежать резонансного захвата  $p$ , но при этом увеличивается доля тепловых нейтронов, поглощенных самим замедлителем, т. е. уменьшается  $f$ . Надо, чтобы система имела такой состав и расположение, которые дают максимум произведения  $p f$ .

Значение  $\eta$  можно увеличить за счет обогащения естественной смеси изотопов ураном-235.

Используя замедлитель с малым коэффициентом поглощения нейтронов, можно также добиться того, чтобы было  $f \approx 1$ .

**Критические размеры системы, в которой осуществляется цепная реакция.** Когда все физические свойства системы заданы, то единственной переменной величиной будет  $k$ , определяющая утечку из системы. Если, например,  $K_\infty = 1,07$ , то  $k$  должна быть не меньше 0,93. Иначе говоря, допустимо терять из-за утечки не более 7% нейтронов.

В то время как деление происходит во всем объеме системы, утечка идет только из поверхностного слоя. Число рождающихся нейтронов пропорционально объему, а число уходящих с поверхности нейтронов пропорционально площади внешней поверхности. Следовательно, чтобы свести к минимуму потерю нейтронов из-за утечки, надо уменьшить отношение поверхности реактора к его объему. Известно, что наименьшее значение это отношение имеет у шара.

Принято называть критическими размеры системы, при которых число нейтронов, потерянных вследствие захвата и утечки, уравнивается числом нейтронов, полученных в процессе деления ( $K=1$ ).

У сферы можно говорить о критическом радиусе  $R=R_{\text{крит}}$ . При малых  $R$  уходит много нейтронов и  $K < 1$ ; при больших  $R$  получим  $K > 1$ .

Чтобы утечка нейтронов была достаточно малой, размеры системы должны превосходить среднее расстояние, проходимое нейтроном в среде от места его рождения до поглощения. Поэтому критические размеры существенно зависят от конструкции реактора, вида ядерного горючего и типа применяемого замедлителя. Например, среди реакторов на тепловых нейтронах максимальные размеры обычно имеют реакторы с графитовыми замедлителями. Наоборот, у водяных реакторов критические размеры малы.

Применение обогащенного урана позволяет уменьшить критические размеры вследствие лучшего размножения нейтронов. Утечку нейтронов можно значительно уменьшить, окружив активную зону веществом, хорошо отражающим нейтроны.

Особенно малые критические размеры свойственны системам на быстрых нейтронах, так как в них отсутствует замедлитель и можно максимально повышать концентрацию делящихся веществ в активной зоне.

**Гомогенные и гетерогенные системы.** Простейшим расположением урана и замедлителя является их однородная смесь. Такая система называется гомогенной. Самоподдерживающуюся цепную реакцию на природном уране можно получить, только используя тяжелую воду в качестве замедлителя. В гомогенных смесях природного урана с графитом или бериллием коэффициент размноже-

ния нейтронов  $K_{\infty} < 1$ . Для того чтобы  $K_{\infty}$  стал равен единице надо обогащать природный уран изотопом  $U^{235}$ .

Широко используется также другая, так называемая гетерогенная, система, состоящая из довольно крупных блоков урана (обычно цилиндрические стержни), вставляемых в графитовую массу, схематически изображенная на рис. 88.

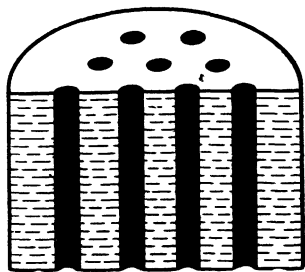


Рис. 88. Гетерогенная система для получения цепной реакции

Нейтроны замедляются в графите. Достигнув в процессе замедления опасной области  $\sim 7$  эв (резонансная энергия поглощения  $U^{238}$ ), нейтроны могут быть поглощены при попадании на урановые блоки их наружным слоем. Поэтому опасное поглощение пропорционально не всему объему (массе) урана-238, а только массе его тонкого поверхностного слоя. Вероятность же проскочить опасную область 7 эв пропорциональна массе всего графита. В таких системах увеличивается значение коэффициента  $p$ ; одновременно уменьшается значение  $f$ , так как нейтроны большую часть времени проводят вне урана и в большей степени захватываются замедлителем. Однако  $p$  увеличивается больше, чем уменьшается  $f$ . При оптимальном размещении урана в графитовой решетке значение  $K_{\infty}$  можно получить равным 1,07.

**Управление ядерным реактором.** Реактором называется устройство, в котором поддерживается управляемая цепная реакция. Существует много разновидностей реакторов, различающихся по рабочим энергиям нейтронов, по материалам замедлителя, по назначению.

Важным вопросом работы реактора является управление интенсивностью реакции. Управление необходимо для того, чтобы реактор можно было привести в нормальное рабочее состояние и остановить его, когда это потребуется.

Обычно работу реактора регулируют при помощи стержней из Cd или из стали с небольшим содержанием В. Кадмий и бор эффективно поглощают медленные нейтроны. Стержни вводят в реактор на такую глубину, чтобы поглотить излишек нейтронов и поддерживать этим значение коэффициента размножения  $K$ , равное 1. Для остановки реактора стержни вносятся глубже, при этом возрастает число поглощенных нейтронов и  $K$  становится меньше единицы. Управление стержнями обычно автоматизировано.

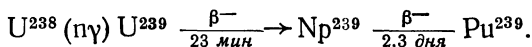
**Роль запаздывающих нейтронов.** Поскольку деление — процесс практически мгновенный, можно думать, что плотность нейтронов и выделяемая энергия будут возрастать настолько быстро, что механическое управление не сможет регулировать это возрастание. Однако при делении освобождаются и так называемые запаздывающие нейтроны. Они составляют 0,75% от всех освобож-

денных нейтронов. Если обозначить через  $\beta$  долю запаздывающих нейтронов, тогда  $1-\beta$  будет представлять долю мгновенных нейтронов. Из всего числа  $\eta$  быстрых нейтронов, полученных в результате одного акта деления,  $\eta(1-\beta)$  нейтронов испускается мгновенно, а  $\eta\beta$  нейтронов испускается с запаздыванием в несколько минут. Поэтому можно считать, что коэффициент размножения  $K$  тоже как бы состоит из двух частей: коэффициента размножения на мгновенных нейтронах  $K(1-\beta)$  и коэффициента размножения на запаздывающих нейтронах  $K\beta$ . Можно так подобрать условия, чтобы было

$$K(1-\beta) = 1,$$

тогда  $K\beta = 0,0075$ . Это равносильно тому, что  $K = 1,0075$ . При этих условиях плотность нейтронов и выделяемая мощность будут возрастать медленно и управление реакторов становится простым.

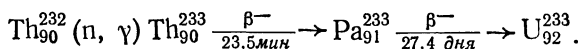
**Реакторы на быстрых нейтронах.** До сих пор мы рассматривали радиационный захват нейтронов ядрами урана-238 как нежелательный процесс, ведущий к обрыву цепи. Между тем он играет и положительную роль, так как в результате захвата нейтрона и последующих двух актов  $\beta^-$ -распада  $U^{238}$  превращается в  $Pu^{239}$ :



Плутоний не уступает по своей способности к делению изотопу  $U^{235}$ .

Таким образом, расход  $U^{238}$  сопровождается образованием нового ядерного горючего, причем для дальнейшего использования оно может быть отделено от  $U^{238}$  чисто химическим способом.

Аналогично, при помощи нейтронов можно превратить торий-232 в уран-233, который также может служить топливом для поддержания цепной реакции:



Реакторы на быстрых нейтронах позволяют получать и энергию и новое горючее — они называются реакторами-размножителями.

Вырабатывая энергию, реактор-размножитель производит больше ядерного горючего, чем потребляет. Для них не нужны замедлители, но это создает трудности в охлаждении, так как многие хладагенты, в том числе вода, являются замедлителями.

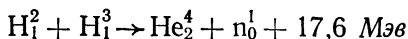
В Дубне работает исследовательский реактор на быстрых нейтронах, состоящий из двух урановых полушарий. Одно полушарие неподвижно, другое вращается на маховике. При каждом обороте полушария на короткое время соединяются, масса блока становится больше критической, возникает ядерная цепная реакция — такой реактор работает короткими импульсами.

Атомная бомба по существу тоже представляет собой неуправляемый реактор на быстрых нейтронах. Взрыв осуществляется, когда две системы с подкритической массой соединяются (выстреливаются навстречу друг другу) и образуют систему с массой надкритической.

Недостатком всех реакторов является обилие радиоактивных отходов. В некоторых лабораториях отходы обмазывают специальной глиной и зарывают в землю, где нет грунтовых вод. Иногда погружают в контейнерах на дно океана. Было даже высказано предложение выпускать их за пределы атмосферы. Но так или иначе в перспективе использование ядерной энергии неминуемо должно привести к загрязнению радиоактивными отходами недр Земли и атмосферы. Кроме того, залежей урана, имеющегося на Земле (ориентировочно), хватит лишь на несколько сотен лет. Это является одной из причин, направляющих усилия физиков на поиски способов получения энергии за счет реакции синтеза легких ядер, принципиально иного способа извлечения ядерной энергии.

### § 43. ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Зависимость средней энергии связи от массового числа  $\epsilon(A)$  (рис. 7) показывает, что энергия связи нуклона в наиболее легких ядрах, так же как и в наиболее тяжелых, меньше, чем в ядрах с промежуточными массовыми числами. Другими словами, сумма масс легких ядер, рассматриваемых самостоятельно, больше массы среднего ядра, образованного при их слиянии. Следовательно, соединение нескольких легких ядер в одно более тяжелое ядро должно также приводить к освобождению энергии, причем, как показывает крутизна подъема кривой, в таких реакциях синтеза должно выделиться существенно больше энергии на один нуклон, чем в реакции деления. Если при делении выделяется энергия порядка 1 *Мэв* на нуклон, то реакция синтеза, например реакция между дейтоном и тритием



идет с выделением энергии 3,5 *Мэв* на один нуклон.

Однако для того чтобы такую реакцию осуществить, необходимо сильно ускорить одно из ядер для преодоления сил кулоновского отталкивания ядер. Этот метод требует затраты большой энергии, часто превышающей ту энергию, которая освобождается при синтезе.

А главное, необходимо учесть, что подавляющая часть энергии дейтона расходуется на ионизацию и возбуждение атомов мишени. Эффективное сечение ядерной реакции примерно в  $10^8$  раз меньше эффективного сечения ионизации. Для того чтобы можно было использовать выделяющуюся энергию, надо создать такие условия, при которых энергии должно выделяться больше, чем ее