

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

§ 1. Возможные источники ядерной энергии

1. Высокие энергетические выходы экзотермических ядерных реакций делают крайне заманчивым использование их для получения энергии в макроскопических масштабах. Действительно, если для единичного акта химической реакции характерны энергии в лучшем случае порядка нескольких электронвольт, то для ядерных реакций в среднем свойственны мегаэлектронвольтные энергии. Однако при ближайшем рассмотрении оказывается, что создание установки для получения ядерной энергии в макроскопических масштабах — очень непростое дело.

Прежде всего среди огромного многообразия экзотермических ядерных реакций очень трудно найти такую, которую можно, хотя бы в принципе, рассматривать как пригодную для ядерной энергетики. Как мы убедимся в этом параграфе, до сих пор удалось найти только три типа таких реакций: деление тяжелых ядер нейтронами, реакции синтеза легчайших ядер и экзотермические реакции расщепления легчайших ядер.

2. Для общей ориентировки в вопросе о том, какие ядерные реакции являются экзотермическими, можно воспользоваться кривой удельной энергии связи (см. рис. 2.5). Из этой кривой видно, что в среднем удельная энергия связи с ростом массового числа A сначала растет, а затем при $A \approx 50$ — 60 достигает максимума (называемого «железным», так как значению $A = 56$ соответствуют ядра изотопов железа), после чего снова убывает. Ядерная реакция экзотермична, когда конечные ядра связаны сильнее начальных. Поэтому можно утверждать, что, как правило, экзотермическими для легких (например, $A \approx 10$) ядер будут реакции синтеза более крупных ядер, а для тяжелых — реакции расщепления ядра на достаточно крупные осколки. Наиболее сильно кривая удельной энергии связи наклонена на краях. Поэтому наиболее выгодными энергетически будут реакции синтеза для самых легких ядер, а реакции расщепления — для самых тяжелых. Кроме того, из-за резкого пика в энергии связи α -частицы сильно экзотермическими являются некоторые реакции наилегчайших ядер с образованием α -частиц в конечном состоянии.

3. Экзотермичность реакции — необходимое, но далеко не достаточное условие возможности ее использования в ядерной энергетике. Должны быть выполнены еще два общих требования:

а) исходные материалы для реакции должны быть доступными в достаточных количествах;

б) реакция должна быть осуществима в макроскопических масштабах.

Каждому из этих требований в отдельности удовлетворить нетрудно, но выполнить сразу оба удается лишь в редчайших случаях. Действительно, первым требованием возможные виды исходного горючего ограничиваются стабильными изотопами, встречающимися в природе, долгоживущими нестабильными изотопами и, наконец, частицами или изотопами, которые можно получить в больших масштабах в самих экзотермических реакциях. Вторым требованием крайне затрудняются макроскопические реакции, начинающиеся столкновениями ядер. Все атомные ядра обладают электрическими зарядами, причем одного и того же знака. Поэтому сближению ядер препятствует отталкивающий кулоновский барьер. Чтобы преодолеть отталкивание и сблизиться на расстояние, достаточное для вступления в реакцию, ядра должны сталкиваться с достаточно большими относительными кинетическими энергиями. Эти энергии сильно варьируются в зависимости от типа реакции, но в любом случае должны быть не меньше нескольких кэВ. Кроме того, ядер с такими энергиями надо иметь очень много. Действительно, при энерговыделении, скажем, 100 Вт/см^3 в реакцию ежесекундно в каждом см^3 должны вступать 10^{14} — 10^{15} ядер, если считать, что в отдельной реакции выделяется энергия в несколько МэВ. Для того чтобы оценить масштаб килоэлектронвольтовой кинетической энергии ядра с макроскопических позиций, укажем для примера, что в ракете, летящей с космической скоростью порядка 10 км/с , на один атом приходится кинетическая энергия не более десятых долей эВ, а при температуре $10\,000 \text{ К}$ на одну степень свободы приходится энергия, равная примерно одному электронвольту.

Величина кулоновского барьера пропорциональна произведению $Z_1 Z_2$ атомных номеров сталкивающихся ядер, так что из реакций столкновения заряженных ядер могут быть перспективны в смысле практической осуществимости только реакции на самых легких ядрах.

Кулоновский барьер отсутствует при столкновении ядра с нейтральной частицей. Но нейтральные частицы не входят в состав земной коры, а будучи получены искусственно, не могут храниться достаточно долго. Поэтому макроскопические ядерные реакции с участием нейтральных частиц можно осуществлять, только получая эти частицы в самом процессе реакции. Такие реакции, в ходе

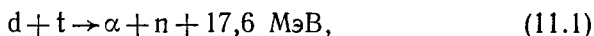
которых регенерируется один из исходных реагентов, называются *цепными*.

4. Изо всех известных нейтральных частиц для осуществления цепной реакции пригодны только нейтроны. Действительно, нейтрино слишком слабо взаимодействуют с веществом, а рождение нейтральных пионов и других частиц с ненулевой массой — процесс существенно эндотермический. Наконец, для испускания фотонов определенной энергии нужны возбужденные ядра, на создание которых необходимо затратить ту же энергию. Поэтому процесс в целом не может быть экзотермическим при стабильных исходных ядрах.

Как эндотермический в целом процесс, цепная генерация фотонов вполне возможна и до энергий порядка 10 эВ реально осуществляется в мазерах и лазерах. Создание лазеров в диапазоне γ -излучения сопряжено с трудностями принципиального характера и находится в стадии предварительных обсуждений.

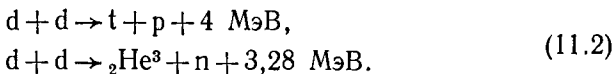
В отличие от остальных нейтральных частиц, нейтроны в земной коре есть, и в огромных количествах, но не свободные, а связанные в атомных ядрах. Из гл. X, § 3, п. 6 мы знаем, что нейтроны испускаются в реакциях (n, f) деления тяжелых ядер нейтронами, причем эти реакции экзотермичны. Поэтому цепная реакция деления в принципе возможна и, как мы увидим ниже, широко осуществляется в промышленных масштабах.

5. Из экзотермических реакций на легких ядрах в качестве наиболее близкой перспективы для целей энергетики специалистами рассматривается дейтерий-третиевая



так как для нее сравнительно низок кулоновский барьер и довольно велико сечение. Осуществление этой реакции в макроскопических масштабах и в управляемом (не взрывном) режиме находится в стадии энергичных научных разработок (см. ниже § 4). Тритий в земной коре отсутствует и должен воспроизводиться в каких-то сопутствующих реакциях.

Теми же зарядами, барьером, но существенно бóльшим сечением и значительно меньшим энерговыделением характеризуются реакции



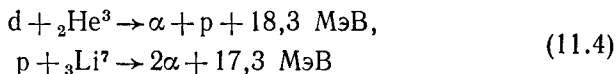
Поэтому для макроскопического осуществления этих реакций нужны при прочих равных условиях намного бóльшие температуры.

Экзотермические ядерные реакции типа (11.1), (11.2), в которых из легчайших ядер синтезируются более тяжелые, называются *термоядерными*, или, что то же, реакциями *термоядерного синтеза*.

Экзотермической является и реакция



в которой ядра бора делятся протонами на α -частицы. Реакции такого типа называют *термоядерным делением*. Эта реакция, а также реакции



отличаются тем, что среди их конечных продуктов нет нейтронов. Поэтому энергетические установки, базирующиеся на этих реакциях, не будут создавать радиоактивных отходов. Продукты для (11.2) — (11.4) имеются в природе, но требуемые температуры и др. параметры настолько велики, что в настоящее время работы по их осуществлению не ведутся. Как мы увидим в § 4, все лабораторные разработки проводятся только с реакцией (11.1).

6. Внутрядерная энергия выделяется не только в экзотермических ядерных реакциях, но и в процессах радиоактивного распада. Работающие за счет радиоактивности источники энергии не могут иметь большой мощности, поскольку при малых периодах полураспада источник действует короткое время, а при долгоживущих радиоактивных ядрах для мощного энерговыделения нужны непомерно большие количества активного вещества.

Маломощные радиоактивные источники энергии уже существуют. В нашей стране разработана серия источников «Бета» («Бета-С», «Бета-М»), рабочим веществом которых является изотоп цезия ${}_{55}\text{Cs}^{144}$ с периодом полураспада 290 дней. В США сделан источник мощностью 25 Вт на основе изотопа плутония ${}_{94}\text{Pu}^{238}$, период полураспада которого 86,4 года. Этот источник может работать непрерывно в течение 5—10 лет. Радиоактивные источники энергии могут найти применение в отдаленных от линий электропередач местностях в случаях, когда потребление электроэнергии невелико, но постоянно и продолжается в течение длительного времени. Примером являются автоматические метеостанции.

7. Легко подсчитать, что в процессах деления и синтеза высвобождается всего лишь 0,1—0,3% энергии покоя участвующих в реакции ядер. Возникает естественный вопрос, существуют ли возможности более полного высвобождения энергии покоя Mc^2 . Для такого высвобождения нуклоны должны превращаться в более легкие частицы — пионы, лептоны, фотоны. Но разрушение нуклонов строго запрещено законом сохранения барионного заряда (см. гл. VII, § 2).

Однако никакие законы сохранения не запрещают высвобождения энергии покоя нуклонов при аннигиляции вещества с антивеществом, состоящим из антинуклонов и позитронов. Удельное энерговыделение при аннигиляции на два-три порядка превышало бы

энерговыведение в существующих ядерных энергетических установках. Но антивещество отсутствует в природе по крайней мере в ближайшей к нам области космического пространства. Производство антивещества в принципе возможно, но оно будет очень дорогим и потребует затрат энергии, значительно превышающих энергию аннигиляции. Поэтому аннигиляция не может служить источником энергии в больших масштабах. Использование аннигиляционных источников возможно разве что в отдаленном будущем для двигателей сверхдальних космических кораблей.

§ 2. Цепная реакция деления

1. Рассмотрим механизм цепной реакции деления. При делении тяжелых ядер под действием нейтронов возникают новые нейтроны (см. гл. X, § 3). Например, при каждом делении ядра урана ${}_{92}\text{U}^{235}$ в среднем возникает 2,4 нейтрона. Пусть теперь в среде, содержащей ${}_{92}\text{U}^{235}$, разделилось одно ядро (например, под действием нейтрона, образованного космическими лучами, см. гл. XII, § 3). При этом испустятся два-три новых нейтрона. Конечно, часть этих новых нейтронов куда-то денется, например, уйдет наружу, но часть может вызвать деление новых ядер. Допустим, что в новую реакцию (n, f) вступают в среднем 2 нейтрона. Тогда в k -м «поколении» из одного нейтрона в среде образуются 2^k новых. Время жизни одного поколения нейтронов имеет порядок 10^{-7} — 10^{-8} с. Поэтому, скажем, на 80 поколений потребуется всего лишь 10^{-5} — 10^{-6} с. За это время в среде образуется $2^{80} \approx 10^{24}$ нейтронов, которые вызовут деление 10^{24} ядер (около 140 г) урана и высвободят $3 \cdot 10^{13}$ Вт энергии (что соответствует сжиганию тысячи тонн нефти). При отсутствии препятствий дальнейшему развитию реакции число нейтронов уже через 10^{-3} с намного превысило бы число частиц в видимой части Вселенной. Такой лавинообразный процесс и называется цепной реакцией.

Как мы увидим в следующем параграфе, управляемая цепная реакция деления практически осуществима на трех различных изотопах. Это два изотопа урана ${}_{92}\text{U}^{235}$ и ${}_{92}\text{U}^{233}$, а также изотоп плутония ${}_{94}\text{Pu}^{239}$. Первый из этих изотопов имеется в природе, а остальные два можно изготавливать искусственно в промышленных масштабах.

2. С макроскопической точки зрения цепная реакция деления идет в среде, в которой наряду с уже известными нам процессами замедления, диффузии и поглощения (см. гл. X, § 4) происходит процесс размножения нейтронов. Такая среда называется *активной зоной*. Важнейшей физической величиной, характеризующей интенсивность размножения нейтронов, является *коэффициент k_{∞} размножения нейтронов в среде*. Коэффициент размножения равен отношению количества нейтронов в одном поколении к их коли-