

# ВОЛНОВАЯ ФИЗИКА

Курс лекций для ФМШ

Часть 2. СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

7. ЯДЕРНАЯ ТЕХНИКА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

А. П. Ершов

11 апреля 2011 г.

## Глава 7

# ЯДЕРНАЯ ТЕХНИКА

Считается, что энергия деления вначале использовалась в бомбах и только позднее были созданы атомные энергетические станции. Это очень неточно. Реакторы предшествовали бомбам, только в них не вырабатывалось электричество. А самый первый реактор на Земле возник вообще без участия человека. История освоения деления ядер настолько увлекательна, что было бы глубоко неправильно излагать суть проблемы в каком-то другом порядке.

### 7.1 Атомное оружие

**Замедление нейтронов.** В опытах группы Ферми был открыт поразительный эффект. Оказалось, что активность, наведенная источником нейтронов в образце, зависит еще и от окружающих предметов. Влияли такие вещи, как расположение деревянного стола, материал подставки, и т.д. А когда источник поместили в парафиновый блок, активность серебряного датчика повысилась в сотню раз! В этот момент Ферми произнес известное изречение «Пошли обедать». К концу обеда он уже мог объяснить явление. Парафин (состав  $\text{C}_n\text{H}_2$ ) эффективно замедлял нейтроны, так как массы протона и нейтрона близки. Бильярдный шар от бортика стола отскакивает почти без потери энергии, но ударив в лоб другой шар, останавливается. Не каждый удар лобовой, и в среднем теряется половина энергии. Идею тут же проверили, заменив парафин водой. В фонтане (с золотыми рыбками) тоже получился резкий рост активности.

Почему же замедленные нейтроны действуют лучше? Оказалось, что сечение взаимодействия медленного нейтрона с ядром, которое его способно захватить, растет в сотни раз (пропорционально  $1/v$ , где  $v$  – скорость нейтрона). Это квантовый эффект, и грубое его объяснение в том, что взаимодействие зависит не только от размера ядра, но и от длины волны нейтрона. При энергии  $E = 1$  МэВ импульс нейтрона  $p = \sqrt{2mE} \approx 2 \cdot 10^{-20}$  СИ, а длина волны  $\hbar/p \approx 5 \cdot 10^{-15}$  м, то есть меньше размеров крупного ядра. Такой нейтрон «видит» ядро, как и положено, шариком размера  $\sim 10^{-14}$  м. Но если нейтрон охладится даже до 1000 градусов (это 0,1 эВ), длина волны возрастет на три с половиной порядка, до  $\sim 10^{-11}$  м. Это уже в тысячу раз больше, чем размер ядра. Примерно

в той же степени возрастает сечение. Представьте себе, что вы проходите мимо столба в 10 метрах от него. Каково же будет ваше удивление, когда вы стукнетесь лбом! Это – одно из «квантовых чудес». Нейтрон размазан в пространстве и потому может поглотиться «издали».

Раз медленный нейтрон так активно ловится ядром, его пробег в поглощающем веществе (например, серебряном индикаторе) будет уже не единицы см, а доли мм. Тонкая пластинка серебра, через которую быстрые нейтроны в основном пролетали насквозь, поглощает практически все медленные нейтроны. Вот активность и подскакивает. За результаты по активации нейтронами и в особенности за открытие эффекта замедления (и его теоретическое объяснение) Ферми получил Нобелевскую премию (1938).

**Изотопы урана.** Природный уран – в основном изотоп  $^{238}\text{U}$ , с небольшой примесью  $^{235}\text{U}$  (0,72%). Период полураспада  $^{235}\text{U}$  равен 0,7 миллиарда лет (меньше, чем 4,5 млрд для  $^{238}\text{U}$ ). Этот легкий изотоп – родоначальник своего радиоактивного ряда, похожего на ряд  $^{238}$ -го урана. Меньший период полураспада говорит о меньшей стабильности. Уже в 30-е годы было понятно, что тяжелые нечетные изотопы менее устойчивы (так как не все нейтроны либо протоны могут объединяться в пары). Вопрос, какой из изотопов урана делится нейтронами, практически очень важен.

К июню 1940 г. было установлено, что оба изотопа делятся быстрыми нейтронами. Медленные же нейтроны могут делить только  $^{235}\text{U}$  изотоп. Но почему такое может происходить вообще? Как тепловой нейтрон, с энергией, соответствующей комнатной температуре (300 К, или 0,03 эВ) вызывает превращение с выделением 200 МэВ? Ведь надо нарушить баланс сил в ядре, для которого 0,03 эВ совершенно незаметны.

Ответ в том, что кинетическая энергия «на бесконечности» – не главное. Нейтрон притягивается к ядру. И когда он попадает внутрь, то набирает несколько МэВ кинетической энергии – ядерный масштаб, чего и достаточно для менее устойчивого  $^{235}\text{U}$ . По-видимому, именно неожиданность эффективности процесса мешала исследователям заметить деление  $^{235}\text{U}$  медленными нейтронами гораздо раньше.

**Организация исследований.** В июле 1939 г., по инициативе Л. Сцилларда и Е. Вигнера, Эйнштейн обратился к президенту США Ф.Д. Рузвельту с письмом, где подчеркивалась важность урановой проблемы и опасность развития этих работ в Германии. Осенью 1939 г. был назначен Урановый консультативный комитет, который подал президенту доклад (1 ноября 1939), где прямо указывалось на реальность создания бомб. 20 февраля 1940 была выдана первая субсидия в \$6000 для закупки материалов.

В июне 1940 г. был организован Исследовательский комитет национальной обороны, а в июне 1942 г. – новый округ инженерных войск (известный как Манхэттенский округ). В сентябре 1942 г. руководителем проекта был назначен генерал Л. Гроувз.

**Реактор Ферми.** 2 декабря 1942 года впервые была получена самоподдерживающаяся цепная реакция. В Металлургической лаборатории, организованной в Чикаго, Ферми и его сотрудники построили первый ядерный реактор. Это был шар диаметром около 8 метров (26 футов), сложенный из графитовых кирпичей, разделявших блоки металлического урана и окиси  $\text{UO}_2$ .

Графит (практически чистый углерод) служил замедлителем нейтронов. Нейтроны деления, вылетев из блока урана, попадали в графит и после десятков столкновений снижали свою энергию до «комнатной», соответствующей температуре графита. Рано или поздно нейтрон, диффундируя через графит, мог вновь попасть в урановый блок. Но теперь он, уже медленный, практически сразу ловился ядром  $^{235}\text{U}$ , не замечая ядер  $^{238}\text{U}$  из-за разницы в сечениях на два-три порядка.

Разбитое ядро давало два-три новых нейтрона. Не все они снова разбивали ядро урана, так как могли частично поглотиться в примесях графита, прилипнуть к  $^{238}\text{U}$  (без деления) и, наконец, вылететь наружу. Потери из-за вылета нейтронов минимальны для шара, а при данной форме они тем меньше, чем больше размер реактора. Если освободившиеся нейтроны производят в среднем один акт деления, то «котел» работает в стационарном режиме. Для «разгона» реактора коэффициент размножения нейтронов должен превышать единицу (реально было 1,0006). При первом включении была достигнута мощность 0,5 Вт, а через несколько дней – около 200 Вт. Далее повышать мощность не стали из-за опасности облучения (никакой защиты не было).

Реактор регулировался поглощающими стержнями, содержащими кадмий. Этот элемент очень активно ловит нейтроны (с сечением в сотни барн), и когда стержни введены полностью, размножения не происходит. Постепенное извлечение стержней уменьшает поглощение, и при некотором их положении реактор начинает разгоняться. Зафиксировать заданную мощность или вообще заглушить реакцию можно, снова вдвигая стержни. Природные графит и уран приходилось чистить от кадмия, бора и других естественных поглотителей. К концу 1942 г. были измерены сечения и получены достаточно чистые материалы, что и позволило построить котел.

**Критическая масса.** Цепная реакция, развиваясь по экспоненте, может привести ко взрыву. Но ясно, что непрактично сбрасывать на противника ядерный реактор весом в сотни тонн. Делящийся материал следует концентрировать. При заданном составе ядерного взрывчатого вещества и форме заряда существуют критическая масса и критический размер, при превышении которых «образец» взрывается. Например, для  $^{235}\text{U}$  в виде шара критический радиус около 9 см, а масса – около 50 кг. Оценку этих параметров см. ниже, в приложении 1.

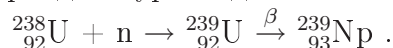
В природном уране 0,72% легкого изотопа  $^{235}\text{U}$ . Оказывается, что основной изотоп  $^{238}\text{U}$  слишком устойчив, чтобы взрываться. Медленные нейтроны вообще не делят ядро  $^{238}\text{U}$ , а попросту захватываются. Быстрые нейтроны делят, но с недостаточной вероятностью. Замедление же нейтронов в природной смеси, с тем чтобы реакция развивалась хотя бы на  $^{235}\text{U}$ , тоже неэффективно, так как нейтроны сильно захватываются тяжелым изотопом в промежуточной области энергий (десятки эВ). (Для этого-то Ферми и сделал реактор из блоков, чтобы нейтроны замедлялись вне урана, в графите). Ни природная смесь, ни чистый тяжелый изотоп, ни тем более окись  $\text{UO}_2$  не размножают нейтронов. Поэтому лишены почвы всяческие слухи о том, что вот на каком-то руднике по недосмотру собралась критическая масса и произошел взрыв. Не могут взорваться и урановые месторождения, так как уран не встречается вместе углеродом, по крайней

мере достаточно чистым (реакторным). Хороший замедлитель – тяжелая вода ( $D_2O$ ), она используется в канадских реакторах, но в природе встречается лишь как малая примесь к обычной воде. В большинстве современных реакторов замедлитель – обычная вода  $H_2O$ . Водород тоже слегка поглощает нейтроны, переходя в дейтерий. Поэтому на природной смеси не получается цепная реакция и с водяным замедлителем. Приходится обогащать уран легким изотопом, чтобы реактор с водяным замедлителем все же работал<sup>1</sup>.

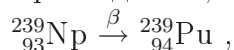
**Разделение изотопов.** Итак, для бомбы и для реактора необходим обогащенный уран. Для обогащения есть несколько способов (газовая диффузия, центрифуги, термодиффузия), некоторые из них мы уже рассматривали в виде задач. Так как массы изотопов различаются мало, разделение – довольно трудный процесс. Например, при газодиффузионном способе за одну ступень отношение концентраций возрастает в 1,0043 раза в самом благоприятном случае, а практически где-то в 1,002. Приходится строить заводы, уже похожие на целые города. Например, только одно здание К-25 Клинтонского завода (Окридж, шт. Теннесси) имело километровые размеры и содержало 16 гектаров диффузионных перегородок, при 3000 ступенях разделения.

Дополнительная очистка делалась на электромагнитных установках. Радиус окружности, по которой движется ион в магнитном поле, тоже зависит от массы. Здесь можно достигать почти полного разделения за один шаг, но зато мала производительность. Например, при токе 1 ампер разделяется  $(1/1,6 \cdot 10^{-19}) \cdot 1,6 \cdot 10^{-24} \cdot 235$  г/сек = 2,35 миллиграмма в секунду. Если начать с природной смеси, то для получения 50 кг  $^{235}U$  такая установка должна работать 1000 лет, или надо 1000 установкам работать один год. Практически сначала обогащали природную смесь диффузией до нескольких процентов, а потом применяли электромагнитное разделение. Завод (в том же месте) получился не меньше диффузионного.

**Плутоний.** Одновременно готовился альтернативный вариант. Те нейтроны, которые захватывает в реакторе  $^{238}U$ , не пропадают даром. Получается изотоп  $^{239}U$ , крайне неустойчивый к  $\beta$ -распаду (период полураспада всего 23 мин.):



Образуется 93-й элемент, который практически обнаружил Ферми еще в 1935 г. Так как он следует за ураном, его называли нептунием (по аналогии с порядком планет в Солнечной системе). Нептуний тоже распадается, примерно за двое суток:



уже в 94 элемент – плутоний. Имея четный номер, плутоний стабильнее нептуния – период его полураспада 24000 лет. Плутоний можно накапливать. Он подходит для бомб еще лучше, чем уран – 235 (легче делится нейтронами).

В реакторах значительная доля нейтронов деления поглощается с образованием плутония (выходит порядка одного ядра Pu на два распада урана). На самом деле выход больше, но часть плутония «сгорает», делясь медленными нейтронами, в точности как

<sup>1</sup>В далеком прошлом без этого можно было обойтись, см. следующий параграф.

$^{235}\text{U}$ . Этим уменьшается добыча, но в то же время поддерживается работа реактора. Таким образом, «негорючий»  $^{238}\text{U}$  перерабатывается в делящийся материал. Плутоний – это другой элемент, и для его отделения от урана есть химические способы.

Ферми продемонстрировал возможность работы реактора на природном уране. Его военное значение состояло в перспективе получения плутония. Конечно, масштаб даже первых промышленных реакторов был совершенно другим (например, для охлаждения требовалось примерно такое количество воды, которое потребляет небольшой город). Действительно, один грамм плутония – это порядка  $200 \text{ (МэВ)} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 10^{23}/239 = 10^{11}$  Дж, то есть грамм плутония в сутки соответствует мощности  $10^6$  Вт. В Хэнфорде на реке Колумбия (шт. Вашингтон) были построены три реактора для наработки плутония (первый заработал в сентябре 1944) и предприятие, где проводилось выделение плутония, под общей вывеской «Хэнфордский механический завод». Применение урана и плутония в бомбах описано в приложении 1.

## 7.2 Атомная энергетика

Первые реакторы были машинами для накопления плутония. Выделяемое тепло попросту нагревало окружающую среду. Позднее его научились использовать.

**Ядерные реакторы.** Энергетический реактор, как и обычный паровой котел, греет воду и производит пар. В идеале реактор имеет два контура. В первом вода нагревается теплом, выделяющимся при цепной реакции. Нагрев происходит в активной зоне, представляющей из себя решетку **ТВЭЛОВ** – тепловыделяющих элементов, содержащих уран в виде окиси, обогащенной до нескольких процентов. Твэлы имеют длину в несколько метров, толщину порядка сантиметра, и объединяются в тепловыделяющие сборки (ТВС). Загрузка урана обыкновенно порядка сотен тонн. В нормальном режиме твэлы нагреты до нескольких сотен градусов. Вода одновременно служит и теплоносителем (отбирая тепло от твэлов), и замедлителем нейтронов. Активная зона помещена в прочный корпус диаметром в несколько метров. В реакторах с водой под давлением (PWR, или ВВЭР) поддерживается давление выше линии равновесия вода – пар, чтобы был достаточный теплообмен (с жидкой водой). Типичны условия:  $P = 150$  атм,  $T = 320$  С (при 150 атм температура кипения 342 С, а при 320 С равновесное давление 115 атм). Движение воды обеспечивают циркуляционные насосы (см. рис. 7.2 на стр. 130).

Вода первого контура обычно радиоактивна из-за почти неизбежных дефектов оболочек твэлов. Нагретая вода поступает в парогенератор – теплообменник. Это набор трубок, закрепленных в так называемых трубных досках. Через стенки трубок тепло передается воде второго контура, в норме нерадиоактивной. При этом получается пар, который вертит турбину. Естественно, давление во втором контуре заметно ниже. Остывший пар после турбины еще охлаждается в конденсаторе и уже в виде жидкой воды снова загоняется насосами в парогенератор.

Схема обычной тепловой станции проще, так как нужен только один контур (нет радиоактивности); в ней котел – это и есть парогенератор. Поэтому кпд атомной элек-

тростанции несколько ниже. Но зато расход топлива несопоставим: тепловой станции нужен эшелон угля в час, а атомной – примерно вагон твэлов раз в квартал.

**Запаздывающие нейтроны.** Как уже говорилось, активная зона регулируется специальными стержнями – поглотителями нейтронов. Не мешает задуматься, как вообще можно управлять таким быстрым процессом? Для реактора на тепловых нейтронах скорость их порядка километра в секунду, пробег – несколько сантиметров. Для замедления нужно 10 – 100 соударений, так что характерное время меньше миллисекунды. Ясно, что управлять реактором с таким временем разгона нельзя.

Реактор весьма приближенно описывается уравнением:

$$dN/dt = (K - 1)N/\tau,$$

где  $N$  – число нейтронов,  $K$  – коэффициент их размножения (с учетом того, что часть вылетает, другая часть поглощается в стержнях и т.п.), а время  $\tau$  – доли миллисекунды. Так как каждый нейтрон произошел от реакции, мощность реактора пропорциональна  $N$ . Время разгона будет  $\tau/(K - 1)$ . Миллисекунда будет при большом  $K$ , заметно отличающемся от 1. Для приемлемого значения 100 секунд надо, чтобы  $K$  был равен единице с точностью  $10^{-5}$ . Это тоже трудно выполнимо.

Удобнее вместо  $K$  ввести реактивность  $\rho = (K - 1)/K$ . Поскольку коэффициент размножения всегда близок к 1, уравнение можно упростить:

$$dN/dt = \rho N/\tau,$$

и в таком примитивном приближении время разгона равно  $\tau/\rho$ .

К счастью (или несчастью, как посмотреть) не все нейтроны вылетают мгновенно. Небольшая доля  $\beta$  ( $\approx 1,5\%$  для урана 235) из них запаздывают, вылетая из нестабильных ядер через время порядка секунды (в среднем 2,5 с для  $^{235}\text{U}$ ). Удивительна тонкая компенсация эффектов, которая из характерного времени распада ( $10^{-13}$  с) делает время человеческого масштаба. Ясно, что предвидеть такое нельзя, и поэтому Резерфорд вполне обоснованно пессимистически оценивал перспективы ядерной энергетика. Если можно так выразиться о явлении природы, это случайность. Именно запаздывание позволяет управлять реактором. Подробно этот вопрос рассмотрен в приложении 2.

При включении реактора запас реактивности делают довольно большим (десятки процентов). Эта реактивность гасится поглощающими стержнями. Понемногу вынимая их, доводят реактивность до положительной величины (довольно малой доли  $\beta$ ) и позволяют мощности вырасти до желаемого уровня. Номинальная мощность реактора ограничена только возможностями съема тепла, а в принципе можно его разогнать до гораздо большей мощности, что и случается при авариях.

Со временем выгорает  $^{235}\text{U}$  и накапливаются вредные осколки, поглощающие нейтроны. Запас реактивности падает, и для его восстановления постепенно вынимают регулирующие стержни. Когда возможности управления исчерпываются, приходится останавливать реактор и перезаряжать его свежим топливом. Это делается два-три раза в год<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>В некоторых типах реакторов замена топлива может происходить постепенно, без остановки.

**Размножение топлива.** Описанные реакторы на медленных нейтронах сейчас во многих странах производят значительную долю электроэнергии. Но они не могут решить глобальную энергетическую проблему, так как активного изотопа ( $^{235}\text{U}$ ) мало в природном уране.

В п. 7.1 упоминалось, что часть нейтронов в реакторе поглощается ядрами  $^{238}\text{U}$ , и в результате нарабатывается плутоний. В типичных реакторах с замедлителем может производиться около 6 ядер плутония на 10 сгоревших ядер  $^{235}\text{U}$  (т.е. коэффициент воспроизводства топлива равен 0,6). Этот плутоний частично также делится нейтронами, что приводит к некоторой экономии  $^{235}\text{U}$ . Остальная часть плутония может извлекаться после остановки реактора и использоваться как горючее. Но раз коэффициент воспроизводства заметно меньше 1, такая переработка в плутоний не позволяет использовать сколько-нибудь значительную долю  $^{238}\text{U}$ .

Можно отказаться от замедления и работать на быстрых нейтронах. Такие **быстрые** реакторы сложнее и дороже, но у них есть важное преимущество: коэффициент воспроизводства может быть больше единицы, например, 1,3. Можно говорить уже не о воспроизводстве, а о **размножении** топлива. В принципе быстрые реакторы могут пережечь на энергию и на плутоний весь природный уран, что дает потенциальный выигрыш по запасам в 140 раз. Однако из-за технологических трудностей<sup>3</sup> в мире работает всего одна ядерная электростанция на быстрых нейтронах (Белоярская АЭС в России). В некоторых странах, например, Германии и Франции, уже построенные быстрые реакторы законсервированы из-за опасений аварии и протестов общественности. Некоторую роль здесь сыграло английское название быстрого реактора – размножителя: fast breeder, что вызывает в массовом сознании образ агрегата, с огромной скоростью производящего плутоний.

**Безопасность.** Атомная промышленность – одна из наиболее молодых отраслей, и она развивалась уже при современных требованиях безопасности. В идеале при любых условиях радиоактивность не должна выйти наружу. Поэтому современные станции сооружаются внутри герметичного бетонного купола (см. рис. 7.2 на стр. 130), который обязан удержать в себе все последствия любой аварии.

Существует понятие «барьеров безопасности», последним из которых и является купол. Прочный котел, рассчитанный с запасом на рабочее давление – это тоже барьер. Следующий – оболочки твэлов из циркония или нержавеющей стали. Наконец, первый барьер – это физическое состояние топлива. Сейчас принято использовать окись урана ( $\text{UO}_2$ ), то есть химически инертное твердое вещество в виде таблеток, набитых в твэлы. Осколки деления в норме остаются внутри таблетки топлива. В первых реакторах использовался и металлический уран. Он лучше, как топливо (более концентрирован), но крайне опасен при контакте с водой, так как мгновенно воспламеняется.

Кроме физической защиты, важны организационные меры, как грамотное управление реактором, на что существуют строгие правила. Исключительно надежными долж-

---

<sup>3</sup>В частности, теплоносителем в быстром реакторе может быть жидкий металл, натрий или свинцовый сплав.



ны быть все конструкции. Все должно работать как следует – на АЭС нет «пустяков». При любой серьезной угрозе автоматика должна прекратить цепную реакцию.

**Проплавление.** Любой объект должен выдерживать так называемую максимальную проектную аварию (МПА). Для АЭС такой аварией считается разрыв главного трубопровода, питающего котел водой. Тогда вся вода из котла под давлением 150 атм вырывается наружу. По существу, происходит сильный взрыв, каких было много в раннюю эпоху паровых машин. Как уже говорилось, эта вода радиоактивна.

Но опаснее та радиоактивность, что осталась в активной зоне. Конечно, без воды – замедлителя цепная реакция прекращается сама, даже без усилий персонала и автоматики. Это один из факторов внутренней безопасности. Но не только цепная реакция идет в твэлах. Нельзя выключить  $\beta$ -распад осколков деления. Поэтому после заглушения реактора в топливе продолжает выделяться тепло с мощностью в несколько процентов от номинальной. Эта активность спадает довольно медленно. Твэлы, оказавшиеся «голыми», без охлаждения водой, начнут разогреваться; топливо расплавится. Получится кипящее озеро на дне котла, которое его проплавит и выльется на бетонный пол реакторного зала. Затем проплавится пол, и сотни тонн топлива вырвутся наружу. Конвекция и пожары разнесут активность на тысячи километров. Это и называют проплавлением, или расплавом активной зоны (core melt down).

Насколько можно судить по текущей информации, проплавление произошло на нескольких реакторах японской АЭС «Фукусима-1» через несколько дней после землетрясения 11 марта 2011 г. Реакторы своевременно остановились, но примерно через час волна цунами прервала энергоснабжение, прекратилась циркуляция воды и нарушилось охлаждение топлива.

В 1986 г. в Чернобыле произошла по меньшей мере равноценная авария. Несколько характерных аварий на атомных станциях рассмотрены в приложении 3. Эти инциденты изменили отношение общества к ядерной энергетике. Оценки безопасности, которые давали тысячи лет до первой серьезной аварии, оказались неверны из-за невозможности учесть ошибки персонала и оценить уровень естественных угроз. В то же время последствием аварий стало несомненное повышение уровня безопасности. Вспомним, что в 19 веке часты были взрывы паровых котлов, а сейчас о них как-то забыли. Прогресс технологии часто зависит от масштаба аварий.

**Экология.** При нормальной работе атомная электростанция гораздо экологичнее обыкновенной тепловой. Она потребляет немного топлива, не дает золы, углекислоты, окислов серы и подобных химикатов. Даже чисто радиоактивных выбросов получается меньше, чем у угольной станции (так как уголь всегда содержит радиоактивные примеси). В ядерном цикле единственная радиоактивность, с которой ничего нельзя сделать – это изотопы благородных газов, которые и выпускают в трубу. Все остальное химически связывается и выдерживается в хранилищах, пока не спадет радиоактивность, для последующей переработки. Считается, что в устойчивых геологических формациях отходы, при тщательной упаковке, могут лежать тысячи лет даже без присмотра<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>Проект хранилища Юкка-Маунтин в США предусматривает безопасное размещение отработанного

**Естественный ядерный реактор Окло.** Как отмечалось в предыдущем разделе, при современном составе урана цепная реакция возможна только в специальных условиях, достижимых при развитой технологии. Напомним, что легкий изотоп менее устойчив (период полураспада около 0,7 млрд. лет против 4,5 млрд. для  $^{238}\text{U}$ ). Процент  $^{235}\text{U}$  со временем падает. И, значит, в прошлом он был больше. Два миллиарда лет назад доля  $^{235}\text{U}$  была приблизительно 3,7%, т.е. состав урана был примерно тот же, как сейчас в твэлах атомных электростанций. В 1956 г. П. Курода предсказал возможность самопроизвольных цепных реакций в богатых урановых месторождениях в далеком прошлом, в присутствии воды, замедляющей нейтроны. Как водится, никто не поверил.

Однако в 1972 г. в Габоне (Западная Африка) был открыт естественный ядерный реактор. Добытая там урановая руда перерабатывалась во Франции (Габон – это бывшая французская колония). Поскольку уран добывают с целью концентрации  $^{235}\text{U}$ , содержание этого изотопа постоянно проверяется, в том числе это мера против воровства и терроризма. И вот заметили, что в некоторых пробах легкого изотопа нехватает (0,717% вместо 0,72). Вначале предполагалось загрязнение руды обедненным ураном (из «хвостов» переработки). Когда эта возможность не подтвердилась, рассматривались в том числе и такие гипотезы, как занесение отработанного урана из реакторов, построенных древними цивилизациями либо инопланетянами. Наконец, расследование показало, что «дефектный» уран прибывал с месторождения Окло. Месторождение состоит из ряда «линз» руды (каждая поперечником порядка 10 м и толщиной до метра), причем некоторые представляют собой почти чистую  $\text{UO}_2$ . Примерно таковы размеры активной зоны реакторов, созданных человеком. Около 2 млрд лет назад урановая руда собралась на дне древней реки в достаточной концентрации. Вода, проникая в трещины и поры руды, замедляла нейтроны и обеспечивала цепную реакцию. При чрезмерном росте мощности вода выкипала, замедление ослабевало и реакция гасилась. Таким образом реакторы саморегулировались; всего в месторождении обнаружено 15 реакторных зон.

Работал реактор порядка полумиллиона лет при очень малой средней мощности (десятки кВт). В некоторых линзах выгорание  $^{235}\text{U}$  достигало 40%. Сейчас осколки деления почти полностью распались. Следов вредного влияния радиации в округе не обнаружено. Правда, есть мнение, что современная жизнь зародилась именно тогда и что реактор мог этому способствовать. К концу 1998 года месторождение выработано, и только небольшая часть реакторной зоны № 2 сохранена в виде природного памятника. Известен еще один естественный реактор в Бангомбе (30 км от Окло, одна реакторная зона). Его судьба (на 1997 г.) зависела от решения французского правительства: надо было выкупить месторождение за 3,5 млн долларов у владельца.

Недавно сотрудник Института гидродинамики СО РАН В.Ф. Анисичкин выдвинул идею о возможности концентрации урана в недрах планет (например, на границе твердого ядра, в  $\approx 1200$  км от центра), где мог образоваться метровый слой окиси. Там в прошлом могла идти реакция, а при внезапном сжатии (скажем, ударом большого метеорита) был возможен и взрыв. Этим можно объяснить формирование необычно большого спутника – Луны. Сейчас, к счастью, взрыв невозможен, так как  $^{235}\text{U}$  осталось мало<sup>5</sup>. Но не исключены «спокойно» работающие реакторы на быстрых нейтронах, в которых критичность поддерживается долгое время

---

ядерного топлива на период 10000 лет; в первые 300 лет предусматривается мониторинг.

<sup>5</sup>Впрочем, удар крупного метеорита и сам по себе достаточно опасен.

за счет переработки урана-238 в плутоний. Глубинные реакторы могут влиять на конвекцию в недрах, движение континентов, генерацию магнитного поля и пр. Похожие идеи развивает независимый американский геофизик J.M. Herndon, только у него реактор поперечником около 8 км находится в центре Земли.

Не на слонах стоит планета,  
не на слонах и черепахах,  
она висит в пустом пространстве,  
усердно бегая по кругу.  
А рядом с ней планеты-сестры,  
а в середине жарко солнце,  
большой костер из водорода  
и прочих разных элементов,  
Кто запалил его? ...

### 7.3 Термоядерные реакции

Если в ядерных электростанциях и атомных бомбах извлекается по сути электрическая энергия (спуск с «кулоновского склона» долины устойчивости при распаде тяжелого ядра), то в термоядерных реакциях уже дело идет о настоящей ядерной энергии, то есть работе ядерных сил притяжения. Топографически это соответствует очень крутому обрыву в долину устойчивости со стороны легких ядер. Происходит синтез ядер из более легких.

Простейшая реакция синтеза – это образование дейтона:



( ${}^2\text{H}$  также обозначается D). Выделяется 2,2 МэВ (энергия связи) и, значит, выход на единицу массы примерно тот же, что в реакции деления ( $\approx 1$  МэВ/нуклон). Энергия связи выделяется в виде  $\gamma$ -кванта.

**Слияние легких ядер.** Строго говоря, нейтрон – это не ядро. Настоящая реакция синтеза из ядер, например, такая:



${}^3\text{H}$  – это тритий (Т). Здесь выделяется  $17,6/5 = 3,5$  МэВ/нуклон. Эта реакция идет сравнительно легко и сейчас выглядит перспективной для управляемого синтеза.

Слиянию ядер препятствует электрическое отталкивание. Ядра надо столкнуть достаточно энергично, чтобы преодолеть кулоновский барьер и сблизить их на  $10^{-13}$  см, куда уже достают ядерные силы притяжения. Не обязательно для этого разгонять их до энергии в МэВ, так как ядра – волны и могут проникать под барьер. Считается достаточной температура в 10 кэВ, или 100 млн. градусов. По нашим масштабам это тоже горячо, поэтому реакции синтеза и называют термоядерными.

С ростом заряда исходных ядер растет кулоновский барьер, а выигрыш в энергии связи падает. Поэтому эффективен может быть только синтез из ядер с минимальными зарядами – изотопов водорода и, может быть,  ${}^3\text{He}$ . По той же причине термоядерные бомбы называют еще водородными.

В реакции  ${}^1\text{H} + \text{n} \rightarrow {}^2\text{H}$  кулоновского барьера нет вообще, так как нейтрон не заряжен. Захват нейтрона происходит, например, в воде с образованием HDO и D<sub>2</sub>O на ядерных реакторах (отчего несколько снижается реактивность). Но нейтроны нестабильны, поэтому их нельзя накапливать в виде некоего «вещества» для переделки в дейтоны. Только в работающих ядерных реакторах нейтроны имеются в заметных количествах; уже говорилось и о других «синтезах» с захватом нейтрона, которые вносят известный вклад в общее энерговыделение реактора.

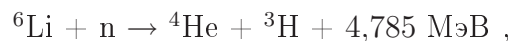
**Водородная бомба.** Еще в апреле 1943 г. в Лос-Аламосе велась проработка термоядерного оружия. Правда, работа в то время имела низкий приоритет, и это направление отдали Э. Теллеру, как самому неуправляемому сотруднику теоретического отдела (которым руководил Г. Бете).

После удачного создания атомных бомб началась гонка вооружений. 29 августа 1949 г. прошло успешное испытание атомной бомбы в СССР. Почти сразу воздушная разведка США обнаружила в атмосфере следы этого ядерного взрыва. Бомба, как теперь известно, была практически копией американской (в Лос-Аламосе работало несколько информаторов). Однако потенциал СССР был достаточен и для изготовления оригинальных конструкций.

Мощность атомной бомбы ограничена (с ростом массы заряда падает КПД) на уровне сотен килотонн. Наоборот, синтез идет тем лучше, чем крупнее бомба. Явилась идея использовать атомный взрыв для создания высоких температур, необходимых для термоядерного взрыва. Активнее других в США действовал Теллер, в СССР основной вклад принадлежит Сахарову, Зельдовичу и Тамму.

В 1951 г. в США проведено первое испытание с заметным выделением термоядерной энергии. Дейтерий и тритий были в жидком состоянии, и из-за малой вообще плотности жидкого водорода изделие имело размер железнодорожного вагона. Во втором испытании – «Майк», атолл Эниветок, 1 ноября 1952 г.) выделилась энергия 3 Мт (по другим данным 20 Мт). Была создана параллельная Лос-Аламосской структура (Ливерморская лаборатория им. Лоуренса) для ускорения работ по водородным бомбам, и началась работа по транспортабельной конструкции.

12 августа 1953 г. произведено советское испытание водородной бомбы («слойка» Сахарова). По предложению И. Гинзбурга, взрывчатым материалом был дейтерид лития-6 (LiD) – твердое вещество, не требующее криогенных операций. Идет цепь реакций:



Тритий делается прямо в бомбе из лития и нейтрона. Первые нейтроны дает атомный взрыв, а остальные берутся из второй реакции синтеза. Слои LiD чередовались со слоями урана-238. При высоких температурах взрыва тепло распространяется очень быстро (излучением). Поэтому температура выравнивается раньше, чем давление (в противоположность нашему житейскому опыту). Уран имеет 92 электрона и, когда полностью ионизируется, дает 93 частицы. Все они «давят» и сжимают слои термоядерного топлива, облегчая реакцию. К тому же часть 14–МэВ нейтронов расшибает ядра

урана, с выделением энергии распада.

«Сухая» бомба опередила американцев, хотя основные идеи в США были высказаны раньше. Частично опережение можно объяснить тем, что американцы больше сил израсходовали на совершенствование ядерных бомб и на криогенные конструкции.

Современные водородные бомбы основаны на «третьей» идее. Как сейчас известно, это идея имплозии (сжатия внутрь) термоядерного заряда. Атомная бомба взрывается не внутри основного заряда, а рядом. Излучение взрыва нагревает и испаряет поверхность заряда. Возникает реактивная сила, сжимающая вещество. При остановке сжатия происходит сильный нагрев, и зажигается реакция.

Бомба может иметь также внешнюю урановую оболочку для более полной реакции, дополнительного энерговыделения и эффективного заражения местности. 1 марта 1954 г. на атолле Бикини была испытана такая трехступенчатая бомба. Из-за непредвиденной смены направления ветра под радиоактивный след попали японские рыбаки, один из которых вскоре умер. Сейчас на вооружении стоят в основном «чистые» бомбы, так как точность средств доставки стала очень высокой и поражать большие территории не нужно (радиация опасна и для нападающей стороны).

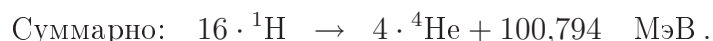
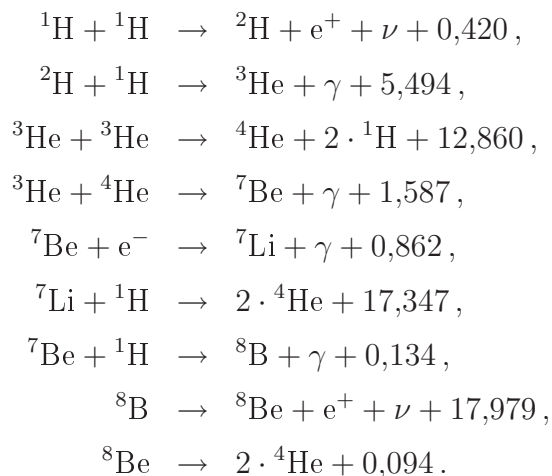
Советская бомба, основанная на «третьей идее», испытана осенью 1955 г. под Семипалатинском. 30 октября 1961 г. на Новой Земле взорвана 50-Мт бомба.

**Реакции в звездах.** Термоядерные реакции обеспечивают энерговыделение и светимость звезд. Все знают, что водород выгорает и образуется гелий. Но реакция типа



крайне маловероятна, так как должны встретиться в одной точке четыре ядра. Кроме того, в такой реакции не сохраняется заряд (хотя можно прибавить в правую часть два позитрона).

По современным представлениям, в Солнце протекают следующие реакции (рр-цикл, каждый раз встречается два ядра либо распадается одно):



Выходит 6,3 МэВ на нуклон, то есть близко к максимуму, достижимому по энергии связи. Когда водород выгорит, начинается образование более тяжелых ядер, с мень-

шим энерговыделением. До этого Солнцу еще далеко. Но на небе известны выгоревшие звезды. В зависимости от начальной массы может выйти белый карлик, сверхновая (остаток от нее – нейтронная звезда) либо черная дыра. Солнце – это звезда второго поколения, собравшаяся из остатков взрыва сверхновых.

Наблюдения потока нейтрино от Солнца давали заметный дискрепанс – недостаток нейтрино. Это могло быть связано с недостатками теории либо близким ( $\sim 10^6$  лет) угасанием Солнца. Однако в последние годы показано, что часть солнечных нейтрино «по дороге» переходит в другой вид, чем и объясняется несоответствие. Эти опыты доказали, что нейтрино имеет ненулевую массу (хотя и меньшую 2 эВ).

**Управляемый термоядерный синтез.** Эта крупная проблема уже разбиралась по частям ранее. Напомним, что есть два основных подхода – магнитные ловушки и инерциальный синтез. Сейчас уже условия приблизились к нулевому выходу энергии (breakeven – затраты равны результату). Будущее зависит от финансирования, а основное обоснование проектов вытекает из экологии.

А.Д. Сахаровым высказана идея использовать для контролируемого производства энергии взрывной термоядерный синтез – подземные взрывы настоящих термоядерных зарядов. При этом снимается проблема неустойчивости, основная для микрозарядов, подвергаемых обжатию лазерами и пучками. Известно, что термоядерные «изделия» взрываются вполне надежно.

Сейчас это направление развивается сотрудниками РФЯЦ–ВНИИТФ. Предлагаются котлы взрывного сгорания (КВС), на 10 – 25 кт. Взрывы должны происходить с интервалами порядка 1 часа<sup>6</sup>. Расход металла на подземную взрывную камеру должен быть порядка  $8 \cdot 10^6$  тонн, диаметр камеры 130 м, высота 250 м. Предполагается чисто дейтериевое топливо, так что из дефицитных материалов расходоваться будет только небольшое количество урана в атомных «детонаторах». Не вызывает сомнений работоспособность такой системы, но очевидны и барьеры (в большой степени психологические), которые мешают эксперименту такого масштаба. Впрочем, размеры сооружения не так велики – меньше типичной атомной станции.

## 7.4 Элементарные частицы

Напомним, что слово «частицы» условное, и правильнее было бы говорить о квантах полей. Из таковых сейчас известны:

**Фотон.** Квант электромагнитного поля. Совпадает со своей же античастицей. Масса нулевая, спин 1.

**Лептоны.** Электрон, мюон и  $\tau$ -лептон, плюс к каждому из них свое нейтрино – электронное, мюонное и  $\tau$ -лептонное. Это кванты лептонного поля. Заряды  $e$ ,  $\mu$  и  $\tau$  единичные, нейтрино не заряжены. Масса мюона 207 электронных масс,  $\tau$ -лептон еще тяжелее,

<sup>6</sup>10 килотонн тротилового эквивалента примерно соответствуют сжиганию 1 килотонны угля или мазута, то есть одному железнодорожному эшелону.

массы нейтрино пока не измерены (возможно, нулевые). Спины у всех  $1/2$ . Еще вводят лептонные заряды (электронный, мюонный и пр.) как свойства, которым обладают лептоны и только они. Античастицы истинные, то есть отличаются от частиц.

**Кварки.** Есть шесть видов кварков: u,d; s,c; t,b плюс античастицы. Эти три пары симметричны тройкам лептонов.

| Кварк            | u            | d            | s      | c     | b      | t     |
|------------------|--------------|--------------|--------|-------|--------|-------|
| $q/e$            | $2/3$        | $-1/3$       | $-1/3$ | $2/3$ | $-1/3$ | $2/3$ |
| $m, \text{ МэВ}$ | $\simeq 300$ | $\simeq 300$ | 500    | 1500  | 5000   | 45000 |

Из кварков в некотором смысле построены **адроны** – тяжелые сильно взаимодействующие (через ядерные силы) частицы. Кварки имеют дробный заряд ( $1/3$  либо  $2/3$ ). Например, состав протона uud, а нейтрона udd. Если кварков три, это называется **барион** (спин полуцелый), а если два, то получается **мезон** (целый спин). Мезон состоит из кварка и антикварка (не обязательно такого же). Например,  $\pi^+ = u\bar{d}$ ,  $\pi^- = \bar{u}d$ ,  $\pi^0$  составлен из  $u\bar{u}$  и  $d\bar{d}$  в равных долях. Заряд адрона всегда выходит целый.

Кварки найдены только внутри адронов в опытах по рассеянию (аналог опытов Резерфорда при высоких энергиях – до ТэВ). Не наблюдалось кварков в свободном состоянии. Это связано с огромными силами взаимодействия. Когда, скажем, мезон пытаются разделить, совершаемая работа достаточна для рождения новых кварков, которые соединяются с исходными уже в два мезона. Можно сказать, что вакуум «лопается» и в месте разрыва появляются новые частицы. До некоторой степени это напоминает разрезание магнита – получается не два полюса, а два новых диполя.

Из этого экспериментального факта можно оценить силу взаимодействия кварков:  $FR \sim m_p c^2$ , где  $R \approx 10^{-15}$  м (ядерный масштаб). Получаем  $F \sim 1,6 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} / 10^{-15} \approx 16 \cdot 10^4 \text{ Н} = 16$  тонн силы! На этом уровне уже теряет смысл понятие «состоять из». Пока мы не сломали протон, внутри него есть три кварка. Но когда пытаемся их пересчитать, вынимая поодиночке, мы этим самым делаем еще несколько. Такие огромные силы переносятся так называемыми глюонами (как электромагнитные – фотонами).

Поскольку в некоторых адронах оказались одинаковые кварки, что противоречит принципу Паули, пришлось приписать кваркам еще и «цвет», красный, синий либо зеленый. Любая свободная комбинация бесцветна, то есть содержит кварки всех трех цветов (барион) либо пару цвет-антицвет (мезон). Соответственно глюонов бывает 8 видов, глюоны маркируются парой цветов (парное взаимодействие кварков). Например, может быть красно/антисиний глюон, который из синего кварка делает красный.

Извлечение отдельного кварка на свободу означало бы создание по крайней мере двух цветных частиц; о невозможности такого процесса говорят как о невылетании цвета, или конфайнменте (англ. confinement, заключение). Запрет на существование цветных частиц делает несколько понятнее свойства сильных взаимодействий. Сила, стягивающая кварк в протон, не только очень велика, но и не спадает с расстоянием. Это происходит из-за того, что глюоны (сами цветные объекты) не могут разбегаться

по всему пространству, а концентрируются в своего рода натянутую струну, которая и пытается вернуть кварк на место либо породить недостающие до бесцветности объекты.

Такое поведение демонстрируется в экспериментах на ускорителях. При столкновении встречных протонов реально сталкивается пара кварков. В простейшем варианте они меняют направления движения, вылетая в системе центра масс в противоположные стороны. Возникающие струны натягиваются и лопаются, порождая массу новых кварков. Поэтому продуктами реакции при высоких энергиях будут две противоположные струи разнообразных частиц, которые и наблюдаются в опытах. Подобные же струи получаются при рождении новых кварков, что возможно даже при энергичном столкновении электрона и позитрона.

Осталось добавить переносчиков слабых взаимодействий (**Z** и **W** – бозоны) – это что-то вроде тяжелых фотонов. Пока не удалось зарегистрировать **бозон Хиггса**. Эта частица, предсказанная в 1964 г., должна обеспечить наблюдаемые массы прочих частиц. По продолжительности интервала между предсказанием и обнаружением она уже превзошла нейтрино. В большой степени поиском бозона Хиггса обосновывалось строительство Большого адронного коллайдера.

## Приложение 1. Физика бомбы

Пока добывались уран-235 и плутоний, продумывалась конструкция бомб. В очень большой сверхкритической массе реакция развивалась бы чрезвычайно быстро. Бомба работает на быстрых нейтронах, так как замедляться в  $^{235}\text{U}$  либо плутонии они не станут, а будут разбивать каждое встречное ядро. Примем, что при делении выделяется  $\nu$  нейтронов (это число для  $^{235}\text{U}$  около 2,5, для плутония около 3). За время свободного пробега  $\tau$  из одного нейтрона сделается  $\nu$ , то есть добавится  $(\nu - 1)$ . Тогда уравнение размножения нейтронов в бесконечной среде имеет вид:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\nu - 1}{\tau} N. \quad (7.1)$$

Это экспоненциальный рост с характерным временем  $\tau/(\nu - 1)$ , или просто порядка  $\tau$ .

Оценим это время. Для быстрых нейтронов дебройлевская длина волны невелика, так что сечение деления  $\sigma$  порядка геометрического размера ядра и составляет несколько барн (2 для плутония, 1,3 для  $^{235}\text{U}$ ). Длина свободного пробега  $l = 1/n\sigma \sim 1/(0,5 \cdot 10^{23} \cdot 2 \cdot 10^{-24}) = 10$  см. Время  $\tau \sim l/v$ , а скорость  $v = \sqrt{2E/m} \approx 2 \cdot 10^7$  м/с при энергии 2 МэВ. Итого получаем  $\tau \sim 5 \cdot 10^{-9}$  секунды. За время  $10\tau$  получится  $e^{10} \approx 10^4$  нейтронов из одного исходного, еще за  $10\tau$  уже будет  $10^8$ , а через  $60\tau$  каждый затравочный нейтрон даст число Авогадро. И ведь это всего какие-то  $3 \cdot 10^{-7}$  секунды. А выделится энергии в миллион раз больше, чем при химическом взрыве (на единицу веса). Эти перспективы впервые обнаружил немецкий физик Флюгге в 1940 г., чем многих живо заинтересовал. На самом деле не все так просто.

В апреле 1943 г. Роберт Сербер, один из сотрудников Оппенгеймера, прочел в Лос-Аламосе вводный курс лекций для физиков, приступавших к завершающему этапу Манхэттенского проекта – разработке и изготовлению атомных бомб. Лекции были записаны и оформлены в виде машинописного отчета, первого в Лос-Аламосе (LA1, или "The Los Alamos Primer"). Только в 1965 этот документ был рассекречен и тогда же издан в США. Один экземпляр



отчета на русском языке «сложными путями попал» в советский ядерный центр. В 2004 г. лекции и комментарии к ним изданы в России (Р. Сербер. Лос-Аламосский букварь. Первые лекции на тему «Как создать атомную бомбу». Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 172 с.). Ниже используются некоторые оценки из этой книги, с поправками и иногда – упрощениями. Книга отражает уровень, достигнутый за два года до первого испытания, когда многие вопросы еще не просматривались. Сейчас часто проще сослаться на практику, что и будет делаться далее.

**Критические параметры.** Оценим критический размер  $R_c$ . Количество нейтронов, вылетающих через поверхность шара в единицу времени, при коэффициенте диффузии  $D = lv/3$ , можно оценить как  $4\pi R^2 D \partial n / \partial r \sim 4\pi R^2 D (3N/4\pi R^3) / R = 3DN/R^2$ . Уравнение (7.1) следует исправить:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\nu - 1}{\tau} N - \frac{3D}{R^2} N. \quad (7.2)$$

Если радиус  $R = R_c$ , то правая часть обращается в нуль:  $R_c \sim \sqrt{3D\tau/(\nu - 1)} = l/\sqrt{\nu - 1}$ . Более аккуратный расчет, с уравнением диффузии вместо (7.2), приводит к величине  $R_c$ , в  $\pi/\sqrt{3} \approx 1,8$  раза большей. Следовательно, нейтрон имеет разумный шанс не вылететь наружу, если длина свободного пробега не превышает размера заряда. Видим, что  $R_c$  составляет несколько сантиметров, и это облегчает задачу получения материала. При плотности  $20 \text{ г/см}^3$  и радиусе  $7 \text{ см}$  требуется около  $30 \text{ кг}$ . Но как изготовить сверхкритическую массу?

Решений найдено несколько. Можно выстрелить одним куском урана в другой. Если оба куска докритические, то до встречи они безопасны. При сближении уменьшается доля потерянных нейтронов, и на некотором расстоянии достигнутся критические условия. Или можно сжимать шар давлением взрыва одновременно со всех сторон (имплозия). Имплозия применяется для плутониевых зарядов (первое в истории испытание «Тринити» 16 июля 1945, бомба «Fat man», взорванная над Нагасаки 9 августа 1945, первое советское испытание РДС-1, проведенное 29 августа 1949). Сближение двух масс ядерного заряда эффективно для урана (первая атомная бомба «Little boy», примененная в Хиросиме 6 августа 1945). Оба способа не просты, если учесть, что переход надо проделать за времена не больше нескольких десятков  $\tau$ , то есть за доли микросекунды. Трудно развить нужные давления и скорости. Практически в бомбах достигается довольно слабая надкритичность, и взрывается небольшая доля ядер. Однако хватает и этого. Мы в основном будем рассматривать вариант имплозии, как более эффективный и применяемый на практике. Сферическая симметрия к тому же облегчает вычисления.

Длина свободного пробега  $l$  обратно пропорциональна плотности. Если сжать почти критический шар, увеличив его плотность в два раза, то  $l$ , а с ней и  $R_c$ , уменьшатся вдвое. Радиус же уменьшится только в  $2^{1/3}$  и отношение  $R/R_c$  возрастет в  $2^{2/3} \approx 1,6$  раза, а масса вчетверо превысит критическую массу для удвоенной плотности. Не так просто удвоить плотность материалов, которые уже относятся к наиболее плотным металлам. Примем для оценки менее напряженный вариант, когда масса после сжатия вдвое превосходит критическую. Легко проверить, что при этом надо увеличить плотность в  $\sqrt{2}$  раз, а отношение радиуса в сжатом состоянии к критическому радиусу в этом же состоянии  $R/R_c = 2^{1/3}$ . Удобно ввести относительную избыточную толщину  $\Delta$ , обозначив  $R/R_c = 1 + \Delta$ , тогда при указанной степени сжатия  $\Delta = 0,26$ . «Сжатый» радиус получается около  $5 \text{ см}$ .

**Размножение нейтронов.** Для оценки кпд бомбы важно знать характерное время нараста-

ния реакции  $\Delta t$ . Ищем решение уравнения (7.2) в виде  $N \propto \exp(t/\Delta t)$ :

$$\frac{N}{\Delta t} = \frac{\nu - 1}{\tau} N - \frac{3D}{R^2} N = \frac{\nu - 1}{\tau} \left( 1 - \frac{R_c^2}{R^2} \right) N \approx \frac{\nu - 1}{\tau} \cdot 2\Delta \cdot N.$$

Отсюда  $\Delta t \approx \tau / (2(\nu - 1)\Delta)$ .

Каждый нейтрон, не вылетевший наружу, за время  $\tau$  вызывает распад ядра с выделением 200 МэВ энергии. Поэтому мощность энерговыделения растет пропорционально числу нейтронов  $N$ , т.е. также экспоненциально, с таким же характерным временем  $\Delta t$ . Энергия передается осколкам деления. В отличие от нейтронов, осколки практически не вылетают, а почти мгновенно тормозятся, нагревая вещество бомбы. Поскольку энергии выделяется много, то даже при малой доле распавшихся ядер температура высока, и вещество становится идеальным газом. Это происходит через несколько десятков  $\Delta t$ . При достижении достаточно большого давления вещество бомбы начнет разлетаться. Плотность упадет, и критичность нарушится.

**Оценка кпд.** Выделенное тепло  $W$  определяется условием, что разлет произойдет за время порядка  $\Delta t$ . Нагрев приводит к росту давления:  $W \sim 3PV/2$  (энергия одноатомного газа; правильнее было бы использовать теплоемкость при постоянном давлении и писать  $5PV/2$ , причем добавок  $PV$  переходит в кинетическую энергию разлета. Но в расчетах по порядку величины такие уточнения не обязательны. Коэффициент  $3/2$  сохранен более для наглядности). Плотность энергии  $w = W/V \sim 3P/2$ . Импульс силы давления, приложенной по сечению шара  $\pi R^2$ , разгоняет половинку шара до средней скорости  $R\Delta/(2\Delta t)$ :

$$\frac{M R \Delta}{2 \Delta t} \sim P \cdot \pi R^2 \cdot \Delta t \sim \frac{2w}{3} \pi R^2 \cdot \Delta t; \quad w \sim \frac{\rho R^2 \Delta}{2 \Delta t^2} \approx \frac{2(\nu - 1)^2 \rho R^2}{\tau^2} \Delta^3.$$

Коэффициент полезного действия  $\eta$  есть отношение  $w$  к максимально возможному значению  $\rho \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – энергия деления на единицу массы (200 МэВ =  $200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13}$  Дж на  $235/6 \cdot 10^{23}$  г, т.е.  $10^{11}$  Дж/г). Получается

$$\eta \sim \frac{2(\nu - 1)^2 R^2}{\varepsilon \tau^2} \Delta^3.$$

Подставляя использованные выше данные ( $\nu = 2,5$ ,  $R = 5$  см,  $\tau = 5 \cdot 10^{-9}$  с,  $\Delta \approx 1/4$ ), получим  $\eta \sim 0,07$ . В упомянутом выше «Букваре» получена меньшая примерно в 7 раз эффективность; разница примерно в 2 раза связана с другими численными коэффициентами в формулах, а остальное – с несколько отличающимися константами и с поправками на изменение кинетики при расширении. В общем, можно сказать, что эффективность бомбы порядка нескольких процентов.

**Инициатор.** Время  $\Delta t$  мало по сравнению с временем приготовления сверхкритического состояния (сжатия заряда взрывом химического взрывчатого вещества, которое порядка микросекунд). Поэтому важно, чтобы при сжатии реакция еще не происходила. При достижении же нужной плотности следует быстро «зажечь» реакцию, что достигается срабатыванием нейтронного инициатора. В первых бомбах это была смесь бериллия с альфа-активным изотопом полония-210, которая дает поток нейтронов по реакции  ${}^9\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \text{n}$ . Смесь должна возникать именно в нужный момент, а до завершения сжатия в материале нейтронов быть не должно. Ясно, что создать такой «детонатор» достаточно трудно, но это было сделано.

**Отказ.** Пусть преждевременно, в самый момент перехода через критическое состояние, в веществе бомбы появился один нейтрон. Размножение нейтронов будет происходить уже на стадии

сжатия, что приведет к остановке процесса и резкому ослаблению эффекта. Запишем уравнение размножения в виде:

$$dN/dt = (\nu - 1 - \nu p)N/\tau.$$

Здесь  $N$  – число нейтронов в бомбе,  $p$  – вероятность нейтрону потеряться. Коэффициент в правой части уравнения вначале отрицателен, и размножения не происходит. Но по мере уменьшения зазора уменьшается вероятность потерь  $p$ , и этот коэффициент должен перейти через нуль и стать положительным. Если отсчитывать время от критического момента, то можно записать  $\nu - 1 - \nu p \sim ut/R$ , где  $u$  – характерная скорость сжатия. Тогда  $dN/dt = utN/\tau R$ . Решение этого уравнения:

$$N = N_0 \exp\left(\frac{ut^2}{2R\tau}\right).$$

Из-за переменности коэффициента роста выходит экспонента от  $t^2$ . Как и при нормальном взрыве, полная выделившаяся энергия  $W$  зависит от времени аналогично  $N$ : она также пропорциональна  $\exp(ut^2/2R\tau)$ . Из-за самоускорения реакции на данный момент времени  $t$  основная часть нейтронов и энергии выделяется в течение небольшого интервала  $\delta t$ , за который показатель экспоненты увеличивается на 1, так что  $N$  и  $E$  возрастают в  $e$  раз:

$$\delta(ut^2/2R\tau) = (ut/R\tau)\delta t \approx 1, \quad \delta t \approx R\tau/ut.$$

Например, при  $t = 3$  мкс,  $u = 1$  км/с характерное время  $\delta t \approx 10^{-7}$  с.

Вскоре вещество бомбы превратится в газ, давление газа остановит сжатие, которое сменится разлетом. Как и при оценке «нормальной» эффективности, записываем  $3PV/2 \sim E$ ,  $V = 4\pi R^3/3$ , тогда  $P \sim E/2\pi R^3$ . Время смены режима оценим так:

$$\pi R^2 P \delta t \sim \frac{M u}{2} \frac{u}{2},$$

где  $M$  – полная масса бомбы. (Считается, что давление в момент остановки действует в течение характерного интервала  $\Delta t$ ). Выражая давление через энергию, получим

$$E \sim \frac{MuR}{2\Delta t} = \frac{Mu^2 t}{2 \tau}.$$

Первый множитель – это приблизительно кинетическая энергия вещества при сжатии. Она составляет некоторую долю энергии химического взрыва, производящего сжатие бомбы. Троитловый эквивалент  $Mu^2/2 = 4$  кг (это при массе 30 кг и скорости 1 км/с). Далее стоит отношение  $t/\tau$ . Время сжатия можно оценить в несколько мкс (скорость 1 км/с = 1 мм/мкс), и отношение  $t/\tau \sim 30$ . Следовательно, ядерная реакция усиливает энергию на полтора порядка, и вместо 4 кг ТНТ получаем 120 кг. Это достаточно внушительный взрыв, чтобы совершенно разрушить бомбу. Следовательно, даже при отказе противник не сможет изучить конструкцию бомбы.

Практически испытание «Тринити» дало 18,6 кт, взрыв в Нагасаки 22 кт. Отметим, что энергия 20 кт соответствует делению 1 килограмма ядер, то есть кпд бомбы составляет несколько процентов. Согласно докладу Б.Л. Ванникова и И.В. Курчатова, направленного Л.П. Берии 15 июня 1949, кпд РДС-1 должен быть не ниже 7%, а вероятность неполного взрыва – не более 10%. Ожидаемое значение кпд оценивалось в 10%, испытание показало около 15%. См.: Негин Е.А. и др. Советский атомный проект. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2000. Стр. 178, 186.

Энергия взрыва в Хиросиме, по последним данным, была около 15 кт. Хиросимская бомба пушечного типа (выстрел одной подкритической массы в другую) работала на уране-235. Пушечная схема дает сравнительно медленное нарастание критичности, меньший КПД и совершенно не подходит для плутониевых зарядов. Плутоний менее устойчив, и в нем слишком часто появляются нейтроны из-за спонтанного деления (особенно  $^{240}\text{Pu}$ ) и альфа-распада, вызывающего реакции на примесях типа бериллия. Поэтому плутоний используют исключительно в схеме имплозии. В бомбе типа «Толстяк» имелось 32 детонатора, равномерно распределенных по сфере, и система взрывных линз, создающая сферически сходящуюся волну. Технология собственно взрыва – это грандиозное научно-инженерное достижение (и наиболее закрытая часть всей работы). В отчете Г.Д. Смита «Ядерная энергия для военных целей» (М.: Трансжелдориздат, 1946) меньше всего подробностей по этой части работы (по отделам взрывчатых веществ, артиллерии и физики бомбы).

**Медленный переход в критическое состояние.** 21 мая 1946 г. Луис Слотин, сотрудник Лос-Аламосской лаборатории, в ходе экспериментального определения критической массы плутония получил смертельную дозу облучения. Соскользнула отвертка, которой он придерживал бериллиевую полусферу – отражатель над плутониевой сферой массой 6,2 кг. Отражатель упал, что привело к вспышке из-за перехода через критическое состояние (около  $3 \cdot 10^{15}$  делений), от чего плутоний раскалился. Экспериментатор быстро убрал отражатель и позаботился о точной отметке положения всех людей в момент аварии. Слотин получил дозу 2100 бэр (биологических эквивалентов рентгена) и умер через 9 дней; остальные шесть человек, присутствовавших в комнате, получили 360, 250, 160, 65, 47 и 37 бэр. В Лос-Аламосе это был уже третий случай аварии с цепной реакцией, но он известен больше, чем два первых, по видимому, из-за облегчения режима секретности после окончания войны. С 1945 по 1999 год в мире произошло 60 инцидентов с возникновением самопроизвольной цепной реакции (СЦР), из них 8 – на исследовательских реакторах, 21 – на химико-металлургическом производстве. Инцидентов с достижением СЦР на критических сборках было 31. В России последний такой случай был 17 июня 1997 г., когда смертельную дозу (45–90 тыс. бэр) получил сотрудник РФЯЦ-ВНИИЭФ А.Н. Захаров.

Из оценок энергетического выхода видно, что при медленном переходе в критическое состояние не может произойти мощного взрыва. Реакция саморегулируется такими факторами, как тепловое расширение (в крайнем случае – плавление) активного материала или выкипание замедлителя. Например, в аварии 17 июня 1997 г. установилась постоянная мощность реакции на уровне 500 Вт; прервать ее удалось только через 5 дней, удалив медную полусферу-отражатель вакуумной присоской. Но даже такое умеренное выделение энергии опасно из-за радиоактивности. Плутоний в опыте Слотина несколько не пострадал, но для экспериментатора последствия были трагические.

Заметим, что приближение любого тела к сборке может усилить реакцию из-за отражения и замедления нейтронов. Например, в 1954 г. переход через критическое состояние был вызван приближением головы экспериментатора (Ю.Б. Харитона), с целью рассмотреть дефект конструкции. Несколько дней отмечались признаки лучевой болезни, но вскоре здоровье главного конструктора пришло в норму<sup>7</sup>.

**Условия в бомбе.** При энергии  $20 \text{ кт} = 2 \cdot 10^{10} \text{ г} \cdot 1 \text{ ккал/г} \approx 10^{14} \text{ Дж}$  рост температуры

<sup>7</sup>См.: В.А. Цукерман, З.М. Азарх. Люди и взрывы. ВНИИЭФ, Арзамас-16, 1994. С. 123.

заведомо позволяет считать вещество бомбы идеальным газом. Легко оценить максимальное давление:  $3PV/2 \approx E$ , объем порядка 1 л, так что  $P \sim 6 \cdot 10^{16}$  Па (или  $6 \cdot 10^{11}$  атм). Температура  $T \approx P/nk = 6 \cdot 10^{16}/(0,5 \cdot 10^{30} \cdot 1,4 \cdot 10^{-23}) = 8 \cdot 10^{10}$  К, если считать  $n$  как для исходного материала. Однако при этой температуре вещество практически полностью ионизуется, и энергия достается не только ядру, но и 94 электронам. Поэтому  $T$  надо поделить примерно на 100. Заметная часть энергии и давления приходится на тепловое излучение, и реально температура составляет десятки миллионов градусов. Скорость звука  $C$  в этих условиях порядка  $\sqrt{P/\rho} \approx 1,4 \cdot 10^6$  м/с. Время разлета  $R/C \approx 3 \cdot 10^{-8}$  сек. Эта оценка неплохо согласуется с величиной  $\Delta t$ , найденной выше.

**Зрительные впечатления.** Сейчас трудно найти человека, не видевшего ядерный взрыв по телевизору. Появляется яркая точка (конечно, на экране яркость ограничена), которая быстро раздувается в огненный шар. На поверхности земли или воды видна расширяющаяся окружность – след воздушной ударной волны. За ней поверхность резко светлеет от поднятой пыли или брызг. Иногда удается заметить и движение волны в воздухе как распространяющуюся прозрачную сферу, по преломлению или отражению солнечного света.

Излучение шара испаряет облака (если они были) и устанавливается солнечная погода. На более поздних стадиях облака возникают снова, а за ударной волной может наблюдаться дополнительная конденсация из-за общего расширения и охлаждения воздуха. При неглубоком подводном взрыве в первые секунды огненный шар закрыт колонной воды, и кратковременно возникает исключительно красивое сферическое облако конденсации, которое рассеивается после нагрева огненным шаром.

Через более длительное время формируется характерный гриб – кольцевой вихрь горячего воздуха, перемешанного с пылью, всплывающий вверх и тянущий за собой пылевой хвост. За исключением первой яркой вспышки, те же явления в меньшем масштабе происходят и при обычном химическом взрыве. Например, гриб каждый мог видеть при взрыве бензобаков в популярных ныне боевиках.

Образующийся огненный шар испаряет вещество оболочки и затем принимается за окружающую среду. Эффекты взрыва оценим, считая, что основные поражающие факторы берут заметные части энергии взрыва. Примеры приведем для 20-кт бомбы типа хиросимской и для 1-Мт термоядерного взрыва.

**Воронка взрыва.** Для неглубокого подземного взрыва часть энергии идет на образование ямы. Яма глубины  $H$  и радиуса  $2H$  имеет объем  $4\pi H^3/3$ , а увеличение потенциальной энергии рассыпанного грунта будет  $(4\pi H^3/3)\rho gH/3 \approx \rho gH^4$ . Если это порядка  $0,1E \approx 10^{13}$  Дж, то  $H^4 \sim 10^{13}/(3 \cdot 10^3 \cdot 10) = 3 \cdot 10^8$ , и  $H \approx 100$  м. Для энергии взрыва 1 Мт, характерной для термоядерных бомб, получится в  $50^{1/4} \approx 2,5$  раза больше, то есть порядка километра в поперечнике. Еще примерно такой же радиус засыпается выброшенным материалом.

**Огненный шар.** Нагретый объем воздуха – огненный шар – имеет огромную температуру. Поэтому теплообмен излучением очень силен, и шар примерно можно считать изотермическим. Энергия горячей области приблизительно сохраняется, так что

$$\frac{4\pi R^3}{3} \cdot \frac{3nkT}{2} \approx E,$$

откуда  $T \approx E/(2\pi R^3 nk)$ . Считая  $n$  на порядок больше числа Лошмидта  $n_0 = 2,7 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup> (из-за диссоциации и электронов), имеем  $T \approx 3 \cdot 10^9/R^3$ , где температура выражена в К, а

радиус – в метрах. Например, при радиусе 10 м температура порядка  $3 \cdot 10^6$  К, а при 100 м –  $3 \cdot 10^3$  К. При тысячах градусов распад молекул воздуха уже незначителен, и  $n$  надо вернуть к значению  $n_0$ , от чего размер растет в  $10^{1/3} \approx 2$  раза. Этот размер (200 м) и можно взять как характерный для огненного шара. При энергии 1 Мт шар будет больше в  $50^{1/3} \approx 3,5$  раз (700 м радиус).

Вначале температура шара высока, излучение от него коротковолновое, и оно сильно поглощается в воздухе. Поэтому рост шара идет за счет прогрева воздуха излучением. Затем более быстрым становится рост за счет распространения ударной волны. Три тысячи градусов соответствуют ударной стадии: примерно с такими температурами мы встречаемся при детонации газов и взрывчатых веществ, которая именно ведется ударной волной. Скорость волны при таких условиях порядка скорости звука в нагретом в 10 раз воздухе, то есть  $\sqrt{10} \cdot 330$  м/с  $\approx 1$  км/с. Время раздувания шара до указанного размера будет порядка 0,2 с для 20 кт и 0,7 с для 1 Мт. Масса воздуха в объеме  $(100 \text{ м})^3$  порядка  $10^3$  т, так что массой бомбы задолго до этого момента можно пренебречь.

После отрыва ударной волны от огненного шара волна уходит вперед, а шар растягивается общим расширением медленнее. На этой стадии примерно выравнивается давление внутри ударной волны, а температура становится неоднородной. Шар гораздо более горячий, чем остальной воздух за волной. Соответственно плотность в шаре сравнительно мала. В результате шар способен достичь (и достигает) в несколько раз больших размеров, чем приведенные выше, за времена, в несколько раз более длинные.

После выравнивания давления шар остается легче воздуха. При его всплывании и образуется грибовидное облако. Скорость всплывания можно оценить, приравняв  $\Delta \rho g R$  и  $\rho v^2$ , получается порядка 100 м/с. Взаимодействие обтекающего шар потока сверху и поднимающейся за шаром снизу запыленной струи воздуха (ножка гриба) порождает характерную «юбочку», почти как у опенка.

**Световая вспышка.** Постепенно шар высвечивается. Очень приблизительно время выделения световой энергии можно оценить из равенства  $\sigma T^4 \cdot 4\pi R^2 t \approx 0,1E$ . Температуру разумно взять 6000 К, как у Солнца. Свет с такой температурой хорошо проходит через воздух, чем мы в жизни и пользуемся. При более высокой температуре излучение будет застревать в воздухе, отчего на начальных стадиях и растет шар, а при более низкой излучается мало энергии. Для радиуса 200 м время  $t \sim 10^{13} / (5,5 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{15} \cdot 12 \cdot 4 \cdot 10^4) \approx 0,4$  с. Реально считается, что для 20 кт световая энергия выделяется около 1 с. Конечно, свечение продолжается и дальше, но с малым выходом энергии. От энергии время вспышки зависит как  $E/R^2 \sim E^{1/3}$ , так как  $R \sim E^{1/3}$ , и составит 3 – 4 секунды для 1 Мт.

Для оценки действия света условно положим, что 10 процентов энергии взрыва излучается в полный телесный угол ( $4\pi$ ). На человека, стоящего в 1 км от взрыва, придется телесный угол  $\Delta \Omega = \Delta S/R^2 \sim 0,5 \cdot 10^4 / 10^{10} = 5 \cdot 10^{-7}$  стер  $\approx 5 \cdot 10^{-8}$  от всей энергии света, то есть  $10^{13}$  эрг, или  $2,5 \cdot 10^5$  калорий. Этого хватит, чтобы нагреть человека массой 50 кг на 5 градусов. На самом деле нагревается тонкий слой (практически кожа на освещенной стороне), масса которой порядка процента массы тела, а температура может достичь 500 градусов. Получается световой ожог, явно смертельный. Правильнее считать калории на квадратный см, в этом случае их будет 50 (считается, что для смертельного ожога достаточно примерно 10).

На таких же примерно расстояниях будут загораться деревянные строения и пр. Хиросим-

ская бомба была взорвана на высоте 600 м для большего использования светового импульса (как и ударной волны). Для 1 Мт тот же эффект будет в 7 км от взрыва (спадание по квадрату расстояния). Поскольку в этом случае свет излучается в течение секунд, от него можно успеть спрятаться, кстати это полезно и от ударной волны.

**Ударная волна.** Эффект воздушной ударной волны оценим из  $5\Delta PV/2 \sim 0,5E \approx 5 \cdot 10^{13}$  Дж, здесь  $V = 4\pi R^3/3$ . Считая избыточное давление порядка 1 атм (при этом разрушаются почти любые здания), получаем радиус опасной зоны  $R \approx 1000$  м. Для 1 Мт опасный радиус будет в  $50^{1/3}$  раза больше, то есть около 3,5 км. Человек несколько устойчивее к ударной волне, чем строения. Прямое действие волны опасно для жизни, начиная примерно с 10 атм (повреждения внутренних органов). Однако обломки зданий и пр., метаемые волной, опасны на гораздо больших расстояниях; чувствительные места, как барабанные перепонки, тоже могут пострадать и при малых давлениях.

Время подхода ударной волны (с минимальной скоростью звука 330 м/с) на расстояние 1 км будет 3 с, а на 3 км – около 10 с. За это время можно поискать укрытие, если зрение не пострадало от вспышки, либо просто лечь на землю, заткнув уши.

**Радиация.** Наконец, есть еще некоторая энергия в виде вспышки радиации (в основном  $\gamma$ -излучение), которые человек поглощает не кожей, а всем организмом. Если допустить, что энергия излучения порядка световой, то получится пять калорий на грамм веса в виде радиации. Это очень много. Опасная доза – так называемый грей (Гр), то есть 1 Дж/кг, примерно соответствует 100 рентгенам, а безусловно смертельная – 10 Гр. Это всего 2 калории на килограмм, так что радиация опаснее света. Тем не менее этот фактор принято считать примерно аналогичным остальным, поскольку больше половины энергии  $\gamma$ -излучения не поглощается в организме (пробег в воде для ослабления вдвое порядка 30 – 40 см), часть застревает в воздухе (тоже порядка половины для расстояния 1 км), а главное, почти все  $\gamma$  – излучение деления поглощается в оболочке бомбы.

Причина вредности радиоактивного излучения – в его жесткости, то есть большой энергии частиц. Проникая в организм, частицы ионизируют и разбивают молекулы; образуются совершенно несвойственные клетке вещества и радикалы. Нормальный ход реакций в организме возможен исключительно благодаря биологическим катализаторам – ферментам. Например, из-за них «горение» пищи идет при  $36,6^\circ\text{C}$ , а не при тысячах градусов. Повреждения этих сложных молекул и производящих их структур клетки нарушают тонкий механизм жизнедеятельности. Многие ткани особо чувствительны к такому воздействию и просто перестают работать. В частности, весьма уязвим костный мозг, в котором производятся клетки крови. Понять опасность радиации можно из житейской аналогии: пуля, масса которой на четыре порядка меньше массы человека, легко может этого человека убить за счет большой удельной кинетической энергии.

После взрыва территория заражается осколками деления (их примерно килограмм), которые в основном  $\beta$ -радиоактивны, а также остальным материалом бомбы и оболочки, в которых наводится радиоактивность, в частности, при поглощении нейтронов. При воздушном взрыве это все поднимается вверх, рассеивается на большой площади и не идет в сравнение с чернобыльским инцидентом (в реакторе сотни тонн урана). Опаснее комбинированные бомбы, когда термоядерные нейтроны улавливаются оболочкой из урана 238. Здесь получается дополнительная энергия деления ядер оболочки, а осколков могут быть уже тонны, и их хватает

для интенсивного заражения целой области или небольшой страны.

## Приложение 2. Кинетика реактора

Более внимательное рассмотрение работы реактора приводит к уравнениям:

$$dN/dt = (\rho - \beta)N/\tau + C/T, \quad dC/dt = \beta N/\tau - C/T.$$

Из  $N$  нейтронов часть производит мгновенные осколки, которые дают  $N(\rho - \beta)$  новых, а часть делает запаздывающие ядра в количестве  $\beta N$  за время  $\tau$ ;  $C$  – это количество ядер с запаздывающим делением,  $T$  – время их жизни, то есть время вылета запоздавшего нейтрона, очень большое по сравнению с  $\tau$ . Распадаясь, запаздывающие ядра дают вклад в производство нейтронов.

Из первого уравнения видно, что при  $\rho > \beta$  по-прежнему будет очень быстрое размножение на мгновенных нейтронах. По сравнению с простейшим случаем ( $\beta = 0$ ) время разгона несколько возрастает, но особой качественной разницы нет. Значит, этот диапазон реактивности не годится для работы.

Наоборот, при  $0 < \rho < \beta$  будет  $(\rho - \beta)N/\tau < 0$ , то есть мгновенных нейтронов недостаточно для размножения, и оно идет за счет запаздывающих. Подставляя стандартным образом  $N = N_0 \exp(\lambda t)$ ,  $C = C_0 \exp(\lambda t)$ , получим

$$\lambda N = \frac{\rho - \beta}{\tau} N + \frac{C}{T}, \quad \lambda C = \frac{\beta}{\tau} N - \frac{C}{T}.$$

Исключая  $N$ ,  $C$ , найдем характеристическое уравнение системы, которое удобно разрешить относительно  $\rho$ . Получается так называемая **формула обратных часов**:

$$\rho = \frac{\lambda T}{1 + \lambda T} \beta + \lambda \tau. \quad (7.3)$$

На рис. 7.1 показана зависимость  $\rho(\lambda)$  (кривая 1, имеющая две ветви; значения констант  $\beta = 0,015$ ,  $\tau = 0,001$  с,  $T = 2,5$  с). Разгон реактора соответствует положительным значениям  $\lambda$ . Видно, что для этого необходима положительная реактивность  $\rho$ . Два характерных времени –  $\tau$  (миллисекунда) и  $T$  (секунды) резко различаются. Поэтому кривая имеет два участка роста – сравнительно быстрый вблизи нуля (первое слагаемое в (7.3)) и очень медленный при больших  $\lambda$  (второе слагаемое).

При больших реактивностях ( $\rho > \beta$ ) значения  $\lambda$  также велики. Например, при  $\rho = 0,018$  (горизонтальная линия 2)  $\lambda \approx 4,5$  1/с, т.е. время разгона  $1/\lambda \approx 0,22$  с неприемлемо мало. При таких условиях первое слагаемое в (7.3) практически равно  $\beta$ , приближенное значение  $\lambda \approx (\rho - \beta)/\tau$ , а время разгона  $1/\lambda \approx \tau/(\rho - \beta)$ .

При  $\rho < \beta$  получаются умеренные  $\lambda$ . Например, при  $\rho = 0,008$  (горизонтальная линия 3)  $\lambda \approx 0,4$  1/с. Тогда можно пренебречь вторым слагаемым в (7.3); получаем  $\lambda = \rho/(T(\beta - \rho))$ , а время разгона  $1/\lambda = T(\beta - \rho)/\rho$ . При  $\rho = 0,1\beta$  это будет около  $10T \approx 25$  секунд. 100 сек выйдет при  $\rho \approx 0,025\beta$ , или  $3,75 \cdot 10^{-4}$  в абсолютных цифрах. Это в 37,5 раза больше, чем было бы нужно в отсутствие запаздывания. Во столько же раз легче управлять реактором<sup>8</sup>. Поэтому все реакторы работают при  $\rho < \beta$ . Предел  $\rho = \beta$  называют долларом реактивности, а допустимые значения  $\rho$  измеряются центами.

<sup>8</sup>В переходном режиме, при  $\rho \approx \beta$ , упрощенные формулы не годятся. По ним время получается нулевым в масштабе  $T$  и бесконечным в масштабе  $\tau$ . На самом деле оно будет порядка  $\sqrt{\tau T}$ .



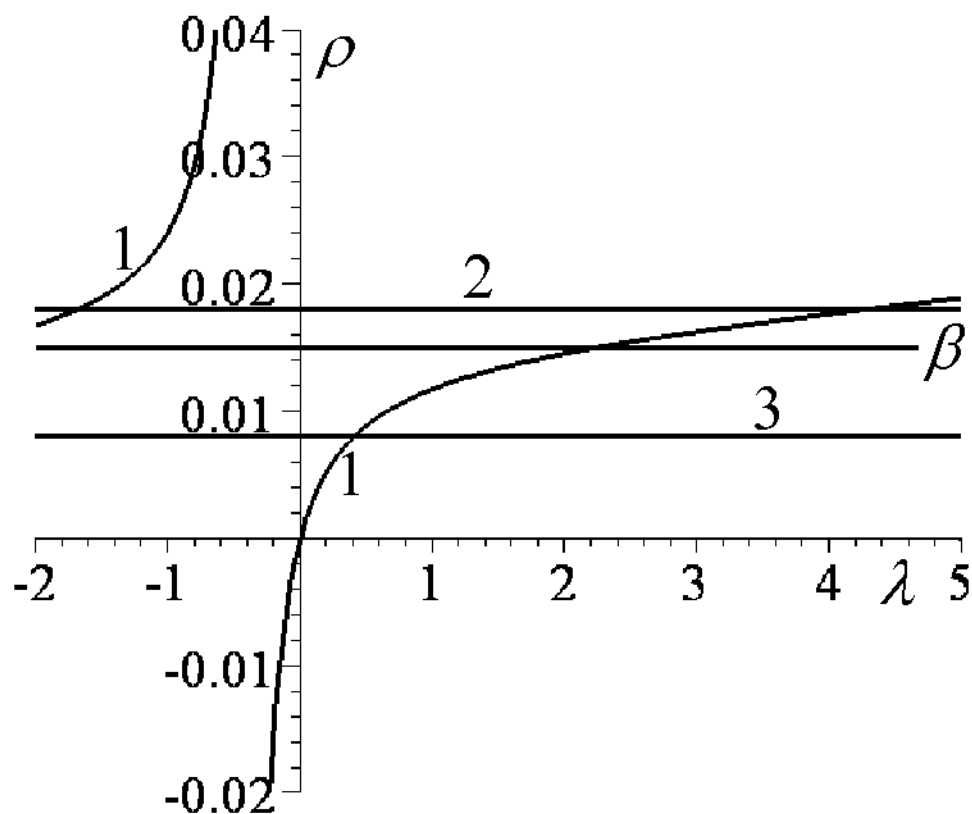


Рис. 7.1.

### Приложение 3. Ядерные инциденты

Ясно, что полной гарантии от катастрофы дать невозможно. Вдруг случится землетрясение, или купол атомной станции разобьет метеорит. А иногда может испортиться любое оборудование. Редкие, но опасные неприятности оценивались с помощью вероятностного анализа. Выходило, что станции должны работать тысячи лет до первой серьезной катастрофы.

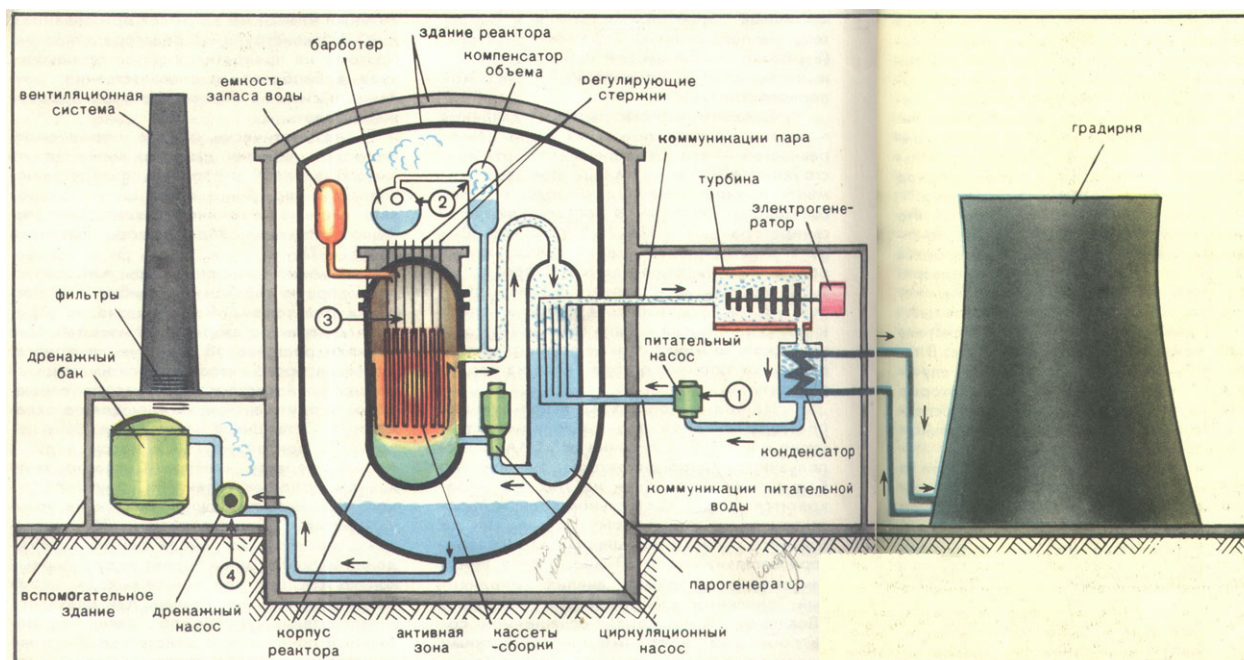
В теории это звучит хорошо. Но теперь мы знаем, что эти оценки не оправдались. Несколько аварий оказались неожиданно тяжелыми.

**Browns Ferry.** 22 марта 1975 произошел пожар на АЭС Browns Ferry (шт. Алабама). Причиной была свечка, с которой рабочий пытался (по сквозняку) найти дыру в стене, через которую проходили связки кабелей. Вблизи одной из связок поток воздуха направил пламя на пенопластовую затычку, которая тут же вспыхнула. Пламя распространилось по кабелям, от чего не сработала автоматика тушения пожара.

Персонал пытался потушить пожар своими силами. После безуспешных усилий вызвали пожарных и сообщили на пульт управления. Операторы остановили реакторы. Что же до пожарной команды, ее телефон оказался перепутан. Пока нашли правильный телефон и пока прибыли пожарные, огонь разгорелся как следует. Потом оказалось, что нехватает респираторов и что неизвестно, как тушить пожар на атомной станции, да еще среди электропроводки. Наконец, стали тушить попросту водой, и только через семь часов после возгорания пожар был ликвидирован. К счастью, помещение реактора не было затронуто, хотя дальнейшее промедление было уже крайне опасно. Жертв и утечки радиоактивности не было.

**TMI.** Ночью 28 марта 1979 произошла серьезная авария на втором блоке АЭС Three Mile

Island возле Гаррисбурга, шт. Пенсильвания. Схема станции показана на рис. 7.2<sup>9</sup>. Это типичная АЭС с водо-водяным реактором.



Перегорел предохранитель, и неожиданно остановились питательные насосы (① на рис. 7.2), гонящие воду во втором (нерадиоактивном) контуре. Парогенератор стал перегреваться. На этот случай имелось запасное водоснабжение. Автоматически включились резервные насосы, но вода не пошла. Потом выяснилось, что во время недавних учений по технике безопасности закрыли задвижку на питающей трубе, да так и оставили. Когда наконец это заметили и пустили воду, парогенератор уже высох, перегрелся, и холодная вода вызвала температурные напряжения, от чего в нем появились трещины.

Тем временем активная зона перестала отдавать тепло в парогенератор и также перегрелась. Автоматика опустила регулирующие стержни и остановила цепную реакцию. Но остаточное тепло продолжало выделяться, давление в реакторе росло. Как положено, открылся клапан, чтобы стравить избыток давления. И здесь случилась неприятность – клапан не закрылся сам, и давление продолжало падать. Неисправность клапана отобразилась на мнемосхеме реактора. Но именно это место оказалось закрыто плакатом по технике безопасности, так что операторы не заметили неисправности. Мало того, манометр показывал опасное давление, так как стрелку зашкалило и она так и залипла в этом положении. Тогда операторы выпустили еще часть воды, от чего температура еще повысилась и началась опасная вибрация главных насосов первого контура, не приспособленных для перекачки пароводяной смеси.

Все еще не понимая, что происходит, операторы выключили насосы. В результате падения давления и остаточного нагрева в верхней части активной зоны образовался паровой пузырь. В норме оставшаяся в реакторе вода обеспечивает достаточный теплообмен с твэлами за счет естественной конвекции. Но в пузыре теплоотдача, конечно, гораздо ниже.

Только утренняя смена разобралась в ситуации, закрыла клапан, повысила давление и

<sup>9</sup>Рисунок и описание аварии взяты из статьи: М.С. Бабаев, И.И. Кузьмин, В.А. Легасов, В.А. Сидоренко. Проблемы безопасности на атомных электростанциях. Природа, 1980, №6, стр. 30–43.

ликвидировала газовый пузырь. Своевременное охлаждение локализовало аварию, но часть активной зоны расплавилась. На полу реакторного зала оказалось  $\approx 3000$  тонн радиоактивной воды. Блок вышел из строя навсегда, и только через десять лет стала возможна разборка активной зоны с помощью роботов.

Заражения местности не произошло (только некоторое количество изотопов благородных газов, которые не поглощаются никакими фильтрами, вышло в атмосферу через трубу). Никаких последствий для персонала, населения и окружающей среды не удалось заметить. Тем не менее, имела место некоторая паника в городе, отчасти вызванная избытком информации плохого качества.

**Чернобыльская авария.** Реакторы РБМК (большой мощности канальный) развились из реакторов, производящих плутоний. Сначала военные реакторы приспособили для производства электричества, а потом разработали уже гражданские РБМК. Замедление нейтронов происходит в графитовой кладке, пронизанной топливными каналами (которых около 1600). В каналы вставлены трубы, по которым циркулирует вода – теплоноситель. Прямо в воду опущены пучки твэлов (тепловыделяющие сборки). Реактор одноконтурный (полученный пар прямо идет в турбину) и не имеет внешнего прочного корпуса. Предполагалось, что трубы обеспечивают прочность, а при повреждении оболочки твэла данная труба выключается и производится ремонт.

26 апреля 1986 г. произошла самая крупная (пока что) авария. 4 блок АЭС останавливался на профилактику, и по этому случаю планировался эксперимент по использованию инерции турбогенератора после отключения пара для питания аварийных потребностей станции.

Вначале предполагалось провести отключение от уровня 1000 МВт (тепловых). Из-за задержки отключения на несколько часов (до 23.00 25.04) и последующей ошибки оператора мощность внезапно упала до 30 МВт, и только к 1.00 25.04 удалось довести мощность до 200 МВт. Уместно отметить, что при резком снижении мощности реактор стремится сам выключиться из-за ксенонового отравления. Один из осколков деления  $^{135}\text{J}$  распадается в  $^{135}\text{Xe}$ , имеющий рекордное сечение поглощения нейтронов (2,7 миллиона барн, то есть порядка квадрата длины волны нейтрона). В норме этот ксенон выжигается нейтронами деления. При падении же мощности нейтронов становится меньше, а запасенный иод продолжает распадаться (характерное время – несколько часов), и концентрация ксенона растет. Из-за этого падает реактивность, еще сильнее падает мощность, и такой shut down прогрессирует (говорят, что реактор проваливается в иодную яму). Для поддержания мощности операторам пришлось вытащить почти все регулирующие стержни.

При этом управляемость реактора резко уменьшилась. Предусмотрено несколько автоматических блокировок, которые в норме должны были бы остановить реактор. Стремясь продолжить злосчастный эксперимент, операторы отключили эти блокировки, разумеется, нарушив все правила и инструкции. На момент начала опыта характерное время реактора уменьшилось до 20 секунд, и приходилось регулировать мощность каждые несколько секунд оставшимися 6 стержнями (в норме надо не менее 30).

Наконец в 01.23.04 эксперимент начался (был отключен турбогенератор; при этом еще отключили аварийную защиту по остановке всех генераторов, чтобы иметь возможность повторить эксперимент в случае неудачи). Замедляя вращение, генератор стал давать меньше энергии, в том числе на циркуляционные насосы. Меньше стал поток охлаждающей воды, ста-

ло быть повысилась ее температура. Нагрев повысил содержание паровых пузырьков и снизил плотность жидкости.

Для дальнейшего важно, что реактор РБМК имеет положительный паровой коэффициент реактивности. Вода в каналах приводит к некоторому поглощению нейтронов. Поэтому, когда при кипении ее плотность падает из-за пузырей, падает и поглощение, и мощность растет. (В водо-водяном реакторе та же вода служит и замедлителем. Поэтому при ее выкипании реактор, наоборот, останавливается. В РБМК основной замедлитель – графит, а эффект замедления водой слабее эффекта поглощения). В результате развился лавинообразный процесс роста мощности (примерно до 100 номинальных значений). Давление пара порвало трубы и разрушило корпус (около 01.24.00).

В 01.23.40 оператор нажал кнопку аварийной защиты. Стержни пошли вниз, но застряли из-за тепловых деформаций. Надо добавить, что нижние отрезки стержней не поглощают, но зато вытесняют воду из каналов. Поэтому на начальном этапе движения стержни еще добавляют реактивности (в норме этот эффект безопасен).

Далее начался пожар, потушенный без всяких предосторожностей. Затем реактор засыпали с вертолетов песком, свинцом, доломитом и т.п. Под реактором залили толстую бетонную плиту, а вокруг возвели объект «Укрытие». (Размеры здания – сотни метров, что сопоставимо с пирамидой Хеопса). Несколько процентов топлива рассеялось по всей Европе. Поскольку нагрузка урана около 200 тонн, радиоактивный выброс гораздо сильнее, чем при взрыве атомной бомбы.

Причина катастрофы – недостатки конструкции реактора (отсутствие внутренней стабильности) в сочетании с лихостью персонала и неверной организацией. Добавим, что незадолго до события атомные электростанции, как доказавшие свою надежность, из министерства среднего машиностроения были переданы местным энергетикам (в данном случае украинскому министерству энергетики). Это с очевидностью снизило компетентность персонала.

**Авария на станции «Фукусима-1».** Пока поступающие сообщения об этой крупнейшей аварии противоречивы, как это всегда бывает, когда за дело берутся СМИ. Появления официального отчета можно ожидать через несколько месяцев. Здесь ограничимся только надежными данными, а предположительные заключения будем помечать соответственно.

11 марта 2011 г. в Тихом океане вблизи северо-восточного побережья Японии произошло сильное землетрясение. Эпицентр находился в 70 км от ближайшего берега, на глубине около 32 км под уровнем моря. Само по себе землетрясение не вызвало крупных разрушений и жертв, так как инфраструктура и население Японии хорошо подготовлены к таким явлениям. За минуту до начала землетрясения в Токио система раннего предупреждения, объединяющая около 1000 сейсмографов в Японии, передала по телевидению сообщение о приближающемся землетрясении. Это стало возможным благодаря тому, что сейсмические S-волны распространяются со скоростью 4 км/с и им потребовалось 90 секунд для преодоления расстояния в 373 км до Токио. Считается, что это сохранило большое количество жизней.

подавляющая часть трагических последствий была связана со спровоцированной землетрясением волной цунами высотой до 10 м. В Японии также развита система предупреждения о цунами. По специальным сигналам население должно эвакуироваться из прибрежной зоны. Однако из-за близости источника волнам цунами потребовалось всего 10 – 30 минут, чтобы достичь первых пострадавших областей Японии. Около 30 тысяч человек погибли, не успев

покинуть опасную зону. Для 13116 человек в течение последующего месяца была подтверждена гибель (найжены и идентифицированы тела), более 14 тысяч считаются пропавшими без вести. Для сравнения: сходное по силе цунами 2004 года в Индийском океане, при отсутствии системы предупреждения, привело к гибели от 225 до 300 тыс. человек.

Станция «Фукусима-1», имеющая 6 реакторов, находится непосредственно на берегу океана. В момент катастрофы работали реакторы № 1, 2 и 3, остальные находились на профилактике. От землетрясения станция как будто не пострадала. По сигналу, выработанному датчиками землетрясения, работавшие энергоблоки были сразу остановлены. Включились независимые источники энергии (дизель-генераторы), от которых работает система расхолаживания, отбирающая тепло бета-распада.

Однако пришедшая примерно через час волна цунами преодолела защитную стену и залила помещения дизелей. Генераторы остановились, и вода в реакторах перестала циркулировать. Топливо начало перегреваться. Реакторы этой станции, в отличие от описанных выше PWR, относятся к кипящим (BWR), они работают при давлении примерно вдвое меньшем (до критическом). Меньшее давление в норме снижает опасность разрыва трубопроводов, так что пар из реактора отправляется сразу на турбину (одноконтурная схема). Однако при аварии такая облегченная конструкция оказалась более уязвимой. Перегрев вызвал интенсивное парообразование, и операторы, видимо, вынуждены были стравливать пар. Топливные стержни вскоре оказались выше уровня воды и стали резко разогреваться. Оболочки стержней выполнены из циркония, который при высокой температуре реагирует с водяным паром с выделением водорода. В течение первых нескольких дней на четырех энергоблоках последовательно произошли взрывы водорода и пожары, разрушившие крыши и стены зданий. В том числе взорвался и четвертый блок, не работавший на момент землетрясения. Видимо, на нем водород образовался в хранилище отработанного топлива, которое на этих блоках находится почти над реакторами. Постоянно появляющиеся данные о высоких уровнях радиоактивности говорят, что проплавление корпусов реакторов, скорее всего, произошло.

Руководство станции, насколько можно судить, не проявило должной решительности (несколько раз проводилась полная эвакуация персонала, принимались сомнительной полезности меры вроде полива реакторных зданий из пожарных машин). Ошибки допустило и правительство, задержавшее эвакуацию 30-км зоны вокруг станции и не принимавшее предложения о помощи специалистов из других стран. Однако главную роль сыграла ошибка проектирования: не было должной защиты от сочетания двух опасных природных факторов: землетрясения и цунами. Достаточно было построить станцию всего на 10 метров выше.

На данный момент представляется, что авария в Фукусиме может серьезно затормозить развитие атомной энергетики. Ожидается, что большее внимание будет уделяться пассивной безопасности (например, аварийному охлаждению топлива за счет естественной конвекции теплоносителя).