

## ИМПУЛЬСНЫЕ РЕАКТОРЫ САМОГАСЯЩЕГО ДЕЙСТВИЯ (ИРСД)

Импульсные реакторы самогасящего действия на быстрых нейтронах работают в режиме редких, не периодически повторяющихся вспышек мощности малой длительности. Для них характерны очень высокие значения плотности потоков нейтронов во время импульса [до  $3 \cdot 10^{19}$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ] при малом среднем значении последних. Этим определяется основное назначение ИРСД — исследование мгновенного влияния интенсивных нейтронных и  $\gamma$ -полей на свойства веществ, материалов и приборов.

### § 1.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ИРСД

Главная особенность создания нейтронного импульса в ИРСД заключается в том, что цепная реакция на мгновенных нейтронах во время вспышки контролируется не внешними устройствами, а только внутренним механизмом самогашения.

Последовательность генерации нейтронной вспышки в ИРСД следующая. За короткое время (порядка нескольких миллисекунд) по команде с пульта управления реактор выводится из подкритического состояния на запаздывающих нейтронах в состояние надкритичности на мгновенных нейтронах и оставляется на этом постоянном уровне. Мощность реактора быстро увеличивается с периодом  $\tau/\epsilon$  начиная с уровня внешнего источника. Так как время жизни «ценности» нейтронов в реакторах с быстрым спектром весьма мало (порядка  $10^{-8}$  с), то период разгона обычно составляет всего несколько микросекунд. Энергия деления ядер целиком идет на разогрев урана; расширение урана приводит к уменьшению реактивности (увеличивается утечка нейтронов) и затуханию мощности реактора. Сразу по окончании импульса реактивность снижается принудительно быстрым выводом блока аварийной защиты, чтобы предупредить повторный разгон на запаздывающих нейтронах и срезать «хвост» импульса. Длительность импульса и его энергия определяются уровнем исходной надкритичности: чем выше надкритичность, тем больше энергия импульса и меньше его длительность. Уровень исходной над-

критичности  $\epsilon_m$  устанавливается оператором предварительным выведением реактора на запаздывающую критичность с калибровкой реактивности управляющих стержней. Верхний предел энергии импульса связан с прочностью конструктивных элементов и узлов реактора по отношению к тепловому удару (см. гл. 3). В ИРСД «второго поколения» (с топливом из легированного урана) получены импульсы с энергией  $\sim 10^{17}$  делений и полушириной 30 мкс при нагреве урана за импульс до  $500^\circ \text{C}$  без механических разрушений реактора.

### § 1.2. РЕАКТОР SPR II

Для детального ознакомления с конструкцией, способом управления и характеристиками ИРСД выбран реактор SPR II — типичный американский ИРСД, введенный в эксплуатацию в 1967 г. и работающий до настоящего времени\* [1—3].

Активная зона SPR II состоит из шести кольцевых дисков и четырех стержней, выполненных из сплава урана 93%-ного обогащения с 10% молибдена (по массе). Компонировка активной зоны показана на рис. 1.1. Общая масса уранового сплава в активной зоне — 105 кг. Внешний и внутренний диаметры урановых дисков 1 равны 205 и 41 мм соответственно; высота активной части — 209 мм. Шесть урановых дисков разделены на две группы по три диска в каждой. Нижняя часть зоны играет роль блока аварийной защиты (БАЗ). Три диска, составляющих его, скреплены вместе четырьмя болтами 4 из высокопрочной стали, ввернутыми в гайки на четырех плечах опорной крестовины 3, которая жестко фиксирована в верхней части вертикальной подвижной колонны. Верхняя и нижняя части зоны в рабочем положении контактируют; опускание БАЗ на 5 см снижает коэффициент раз-

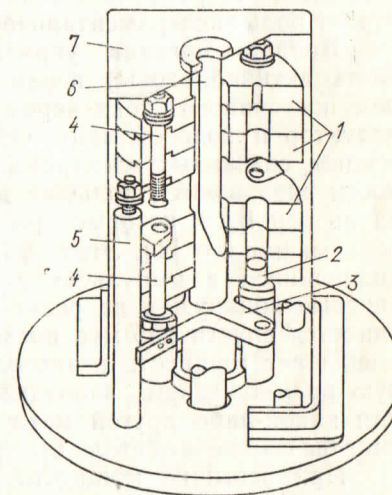


Рис. 1.1. Реактор SPR II (схема):

1 — урановые диски; 2 — стержень управления; 3 — опорная крестовина аварийного блока; 4 — скрепляющие болты; 5 — опорная колонна неподвижной части; 6 — полость для облучения; 7 — предохранительный экран

\* SPR—Sandia Pulsed Reactor.

множения более чем на 10β. Три верхние пластины также скреплены вместе стальными болтами; последние ввернуты в стальные пальцы, жестко связанные с опорными неподвижными колоннами 5. Опорные колонны покоятся на основании стенда. Четыре урановых стержня 2, каждый массой 1,2 кг, диаметром 82 мм, длиной 270 мм, играют роль органов управления. Три из них — регуляторы, а четвертый служит для быстрого ввода реактивности и инициирования импульса; будем называть его *бустер реактивности*, или сокращенно БР. Стержни управления размещены в цилиндрических каналах, которые проходят через пять урановых дисков из шести, составляющих активную зону. Между соседними урановыми дисками имеется гарантированный зазор ~0,5 мм; он введен для смягчения тепловых ударов в уране и скрепляющих болтах (см. гл. 3) и обеспечивается особой формой ключевого соединения дисков в области отверстий для болта (рис. 1.2). Внутренняя полость б играет роль экспериментального канала.

**Приводы органов управления и защиты.** БАЗ (нижняя часть активной зоны) перемещается двухскоростным двигателем постоянного тока через ременную передачу, червячный редуктор и ходовой винт. Опорная ось БАЗ состоит из двух секций, связанных электромагнитом. Во время импульса мощности развиваются большие динамические силы, направленные вдоль оси БАЗ, которые разрывают магнитное сцепление и сбрасывают его [4]. Этот эффект «самозащиты» реактора, проявляющийся в импульсах с энергией более 150° С\*, был впервые обнаружен на реакторе Godiva I. Выведение БАЗ начинается спустя 225 мкс после вспышки и весьма существенно уменьшает мощность реактора в хвосте импульса, обусловленную размножением запаздывающих нейтронов. Электронный или какой-либо другой механизм включения привода БАЗ не смог бы обеспечить столь быстрой реакции.

При вспышке мощности в реакторе, вызывающей нагрев урана меньше 150° С, для снижения фона электромагнит выключают предварительно запрограммированным сигналом.

Привод стержней регулирования имеет двигатель постоянного тока, электрическую и механическую муфты, ведущую шестерню и ведомую зубчатую рейку, фиксированную на оси стержня. Муфты регулируются таким образом, чтобы в приводной цепи отсутствовали люфты при нормальной работе (т. е. при движении стержней), но имелось проскальзывание под действием ударных нагрузок во время импульса. Последнее обстоятельство существенно для сохранения целостности зубьев шестеренок и реек. Тот же механизм самоиницированного

\* В дальнейшем будем для краткости измерять энергию нейтронной вспышки в градусах, имея в виду вспышку такой интенсивности, которая приводит к нагреванию реактора на данное количество градусов.

выключения, как и в магнитной муфте БАЗ, действует в муфтах привода стержней регулирования и вызывает их быстрый сброс. Положение стержней контролируется электрической схемой с гелиподом, на ось которого насажена шестерня, сцепленная с рейкой. Для гашения скорости стержня при его выбросе служит специальный тормозной цилиндр с маслом.

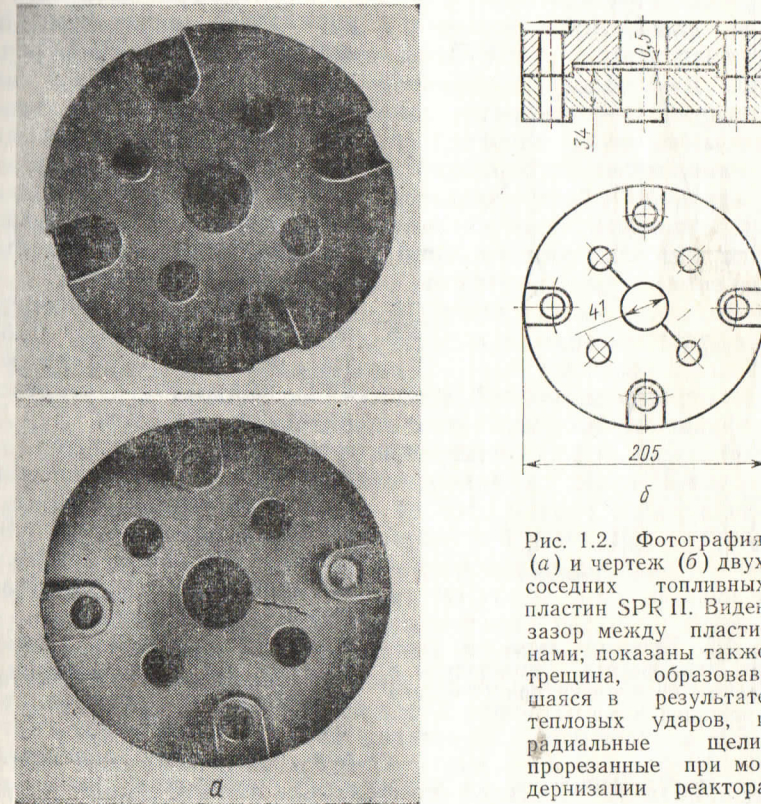


Рис. 1.2. Фотография (а) и чертеж (б) двух соседних топливных пластин SPR II. Виден зазор между пластинами; показаны также трещина, образовавшаяся в результате тепловых ударов, и радиальные щели, прорезанные при модернизации реактора

**Охлаждение и герметизация.** Продукты деления почти полностью задерживаются гальваническим алюминиевым покрытием всех компонентов активной зоны, содержащих уран. Это же покрытие предохраняет топливо от высокотемпературной коррозии. Однако на поверхностях сложной формы не удается получить хорошего покрытия. Поэтому весь реактор дополнительно экранирован тонким колпаком из алюминия (см. 7 на рис. 1.1), который задерживает радиоактивные продукты деления, а также служит направляющей для охлаждающего газа и улучшает эффективность охлаждения. Продукты

деления захватываются газом и уносятся в систему охлаждения, где оседают на специальных фильтрах. Охлаждается реактор газообразным азотом, который получается в испарителе при кипении жидкого азота. Наибольшая температура газа на входе под колпак  $\sim 15^\circ\text{C}$ . Наличие инертной среды вокруг реактора уменьшает коррозию топлива.

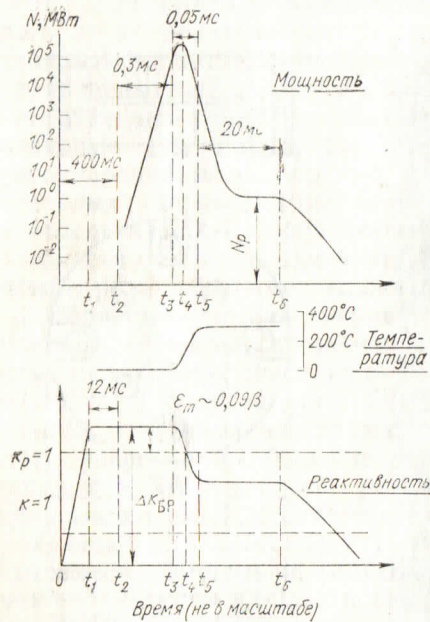


Рис. 1.3. Типичный характер изменения реактивности, температуры и мощности во времени при генерации вспышки в реакторе SPR II

**Генерация импульса и управление реактором.** Подобно другим ИРСД реактор SPR II производит импульс нейтронов, в котором четко различаются две фазы — быстрая вспышка и хвост. На рис. 1.3 вспышка происходит в интервале  $[t_2, t_5]$ , хвост наблюдается в интервале  $[t_5, t_6]$ .

Рассмотрим типичную последовательность работы реактора при генерации импульсов с нагревом реактора на  $300^\circ\text{C}$ . До момента  $t=0$  реактор находится в подкритическом состоянии; бустер реактивности выведен из активной зоны, остальные стержни управления предварительными манипуляциями (в том числе с использованием разгона на запаздывающих нейтронах) устанавливаются в положение, которое должно обеспечить

нужную надкритичность на мгновенных нейтронах при введении БР.

Для снижения уровня фона запаздывающих нейтронов, предшественники которых накапливаются во время выхода на запаздывающую критичность, БАЗ временно (на несколько минут) выводится из активной зоны и затем вводится вновь непосредственно перед моментом  $t=0$ . За время от  $t=0$  до  $t_1$  (388 мс) бустер полностью вводится в активную зону; положительная реактивность на мгновенных нейтронах достигает значения  $0,09\beta$ . Спустя 12 мс после ввода БР подается нейтронный импульс от дейтерий-тритиевого источника ( $10^8$  нейтронов за 10 мкс), который инициирует развитие цепной реакции. Конечно, последняя будет инициирована и без внешнего импульсного

источника нейтронами спонтанного деления или постоянного внешнего источника. Но при малом источнике момент вспышки случаен и меняется в широких пределах — от нескольких миллисекунд до нескольких секунд (!). При сильном же и постоянном внешнем источнике происходит инициирование вспышки раньше, чем бустер полностью введется в активную зону. Амплитуда импульса оказывается чересчур малой.

В интервале  $[t_2, t_3]$  происходит экспоненциальный разгон реактора с периодом 16 мкс. К моменту времени  $t_3$  реактор разогревается настолько, что из-за термического расширения его реактивность начинает уменьшаться. После  $t=t_4$  реактивность на мгновенных нейтронах становится отрицательной, и мощность реактора падает до значения, определяемого размножением запаздывающих нейтронов, предшественники которых образовались в течение вспышки. Чтобы оборвать хвост импульса и предотвратить разгон на запаздывающих нейтронах, сбрасывается аварийный блок. Сигнал на сброс подается предварительно, до импульса, в момент  $t_1$ . Время запаздывания выключения электромагнита составляет 12 мс; поэтому включение внешнего источника нейтронов намеренно производится с запазданием по отношению к  $t_1$ .

Скорость вывода реактивности блоком аварийной защиты такова, что через 20 мс после максимума импульса хвост его обрывается. Как уже говорилось ранее, в импульсах, больших  $150^\circ\text{C}$ , происходит самоиндуцированный сброс БАЗ. Полуширина вспышки нейтронов — 46 мкс, полное число делений —  $10^{17}$ , мощность реактора в хвосте —  $\sim 1$  МВт. Естественно, что все операции по управлению реактором при генерации импульса (включение привода БР, сигнал на сброс БАЗ, подача внешнего источника) осуществляются автоматически по программе. Контроль времени обеспечивается стокилогерцевым таймером. Сигнал на выполнение каждой последующей операции разрешается только по выполнении предыдущей.

Реактор SPR способен давать одну вспышку за 0,5—1 ч; время восстановления готовности реактора к следующему импульсу определяется временем охлаждения активной зоны до исходной температуры и настройкой системы регулирования на нужную реактивность. При нормальной эксплуатации средняя интенсивность работы — 20 импульсов в неделю. Ресурс работы реактора — несколько тысяч импульсов.

### § 1.3. РЕАКТОР VIPER

Импульсный реактор VIPER [5] построен и эксплуатируется в Олдермастоне (Англия). Главная особенность этого реактора состоит в том, что самогашение импульса при разогреве активной зоны происходит в основном вследствие доплер-эффекта, а не из-за расширения топлива. Топливом служит сплав урана

с 1,25% Мо (по массе), обогащенного  $^{235}\text{U}$  на 37,5%. В активной зоне присутствует водородсодержащее вещество — эпоксидная смола; смягченный спектр нейтронов и большое количество  $^{238}\text{U}$  обеспечивают высокое значение мгновенного отрицательного температурного коэффициента реактивности в результате доплеровского уширения резонансов поглощения.

**Конструкция реактора.** Топливо присутствует в зоне в виде тепловыделяющих элементов — тонких цилиндрических стержней (рис. 1.4). Длина сердечника твэла — 290 мм, диаметр — 10 мм; толщина оболочки — 0,38 мм. В средней части сердечника имеется круговая канавка, в которую завальцована оболочка; таким способом удается уменьшить нагрузки на конструкции реактора во время импульса, так как в средней части твэла напряжения сбалансированы.

Твэлы собраны в активной зоне в узлах треугольной решетки с шагом 13 мм. Зона состоит из трех блоков твэлов, каждый заключен в стальной корпус. Центральный неподвижный содержит 478 элементов, два боковых подвижных — по 133 элемента. Боковые блоки имеют гидравлические приводы и представляют собой органы аварийной защиты. В центральной цилиндрической полости, расположенной в неподвижной части реактора, перемещается БР. Регулирующие стержни, дополненные обогащенным бором, находятся на границе активной зоны и толстого отражателя (толщина не менее 20 см) из меди.

Твэлы фиксируются в поперечном направлении тремя решетками из стали с низким коэффициентом теплового расширения (рис. 1.5): две, 4, 9, фиксируют концы элементов, а третья 6 расположена в средней плоскости активной зоны. Отверстия под твэлы в этой центральной решетке смещены по радиусу зоны наружу на 0,25 мм относительно соответствующих отверстий в верхней и нижней плитах — мера для предотвращения искривления элементов в сторону центра активной зоны. Опираются твэлы на толстую стальную плиту 3 и поджимаются сверху пружинами 10, которые предотвращают смещение твэла во время импульса и после него.

Пространство между твэлами заполнено пластинками из меди и эпоксидной смолы 8. Количество водорода в активной зоне может варьироваться изменением соотношения количества смолы и меди.

Экспериментальные устройства на реакторе включают несколько полостей для облучения. Бустерный стержень в верхнем положении не доходит до границы активной зоны, и тем самым образуется центральная полость для облучения, доступ в которую открывается через канал в верхнем отражателе со съемной пробкой. Часть бокового отражателя реактора также может быть удалена, в результате чего образуется широкая

и глубокая полость, доходящая до границы с активной зоной, где размещается борный экран для развязки зоны от замедляющих нейтроны образцов.

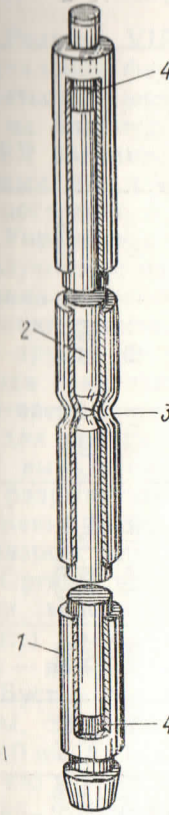


Рис. 1.4. Твэл реактора VIPER:

1 — оболочка из нержавеющей стали (диаметр 10 мм, толщина 0,38 мм); 2 — топливный сердечник из уран-молибденового сплава; 3 — место контакта сердечника и оболочки; 4 — зазор с гелем

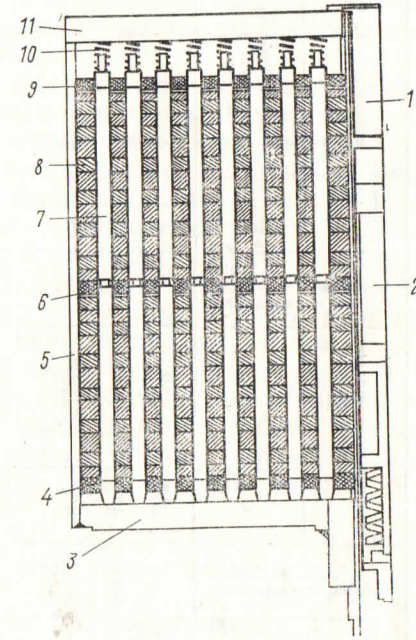


Рис. 1.5. Вертикальный разрез центральной секции активной зоны реактора VIPER (половина секции):

1 — экспериментальная полость для облучения; 2 — бустер реактивности; 3 — опорная плита; 4 — нижняя фиксирующая решетка; 5 — стальной корпус блока; 6 — центральная фиксирующая решетка; 7 — твэл; 8 — наполнитель-замедлитель нейтронов (медь и эпоксидная смола); 9 — верхняя решетка; 10 — прижимная пружина; 11 — стальная крышка

Имеется импульсный нейтронный генератор для измерения времени жизни нейтронов и спектрометрии по времени пролета. Источник связан с реактором через пробку в отражателе диаметром 10 см. Иногда он используется для инициирования импульса.

Характеристики действующих ИРСД

Наименование реактора (страна)	Год пуска	Топливо (обо- гащение, %)	Критическая нагрузка Урана, кг	Энергия максимального импульса		Минимальная дли- тельность импульса, мкс	Флюенс нейтронов, $10^{14}$ нейтр./ см <sup>2</sup>		Доза $\gamma$ -излучения, $10^5$ рад	
				°С	делений		в централь- ном канале	на поверх- ности ре- актора	в централь- ном канале	на поверхности реактора
FRAN [6] (США)	1962	U металл- ческий (93,5) U+10% Mo	63	350	5 · 10 <sup>18</sup>	~40	—	—	—	—
HPRR [7] (США)	1962	U+10% Mo (93,5)	103	~400	~10 <sup>17</sup>	~60	—	—	—	—
WSMR (Molly-G) [6] (США)	1963	U+10% Mo (93,5)	110	600	1,5 · 10 <sup>17</sup>	36	—	—	—	—
Super Kukla [6] (США)	1964	U+10% Mo (20)	~5000	350	~5 · 10 <sup>18</sup>	700	—	—	—	—
Godiva IV [8] (США)	1969	U+1,5% Mo (93,5)	66	525	8,3 · 10 <sup>16</sup>	24	~10	—	—	—
SPR II	1967	U+10% Mo (93,5)	105	560	1,6 · 10 <sup>17</sup>	32	10,0	3,2	2,3	0,5
APFER [9] (США)	1968	U+10% Mo (93,5)	125	600	2,1 · 10 <sup>17</sup>	35	9,4	2,8	36 (тканевая доза) 1,3	11 (тканевая доза) 0,01
VIPER (Англия)	1967	U+1,25% Mo (37,5)	~200	430	3,6 · 10 <sup>17</sup>	400	10	0,3	—	—
SPR III (США)	1975	U+10% Mo	227	450	2,8 · 10 <sup>17</sup>	65	6,5	—	—	—
Caliban (Франция)	1971	U+10% Mo (93,5)	113	200	0,6 · 10 <sup>17</sup>	50	3,0	0,5	—	—

Активная зона не охлаждается принудительно, но постоянно находится в атмосфере аргона. Для полного остывания реактора после импульса максимальной мощности требуется 6 ч.

Реактор VIPER вместе со всем оборудованием размещен на стальной ферме площадью 2,7×2,8 м<sup>2</sup>. Ферма может перемещаться по рельсам к месту, откуда возможен вывод нейтронов на длинную базу для спектрометрии по времени пролета. VIPER находится в том же защитном помещении с бетонными стенами, что и экспериментальный реактор на быстрых нейтронах постоянного действия VERA.

**Управление реактором.** БАЗ и регулирующие стержни используются, с одной стороны, как в обычном реакторе для увеличения безопасности реактора при его загрузке и для подгонки реактивности при смене экспериментальных образцов, а с другой стороны, выполняют функции быстрого ввода и вывода реактивности в режиме импульсной работы. Движение БАЗ вверх производится за 3 мин (ход — 30 см); при выбросе его для уменьшения плато импульса ускорение достигает 5g. БАЗ выводится из активной зоны гидравлическим приводом при разрыве электрической цепи, питающей запорный клапан. Движение блока начинается через 20 мс после подачи сигнала на разрыв цепи; через 47 мс выводится реактивность в 1 $\beta$ .

Органы регулирования представляют собой медные коробки, заполненные обогащенным бором. Грубые регуляторы (2 шт.) имеют эффективность 1,2 $\beta$  каждый; тонкие регуляторы — по 0,2 $\beta$ .

Бустер реактивности 2 (см. рис. 1.5) состоит из стальной трубы, содержащей металлический урановый цилиндр диаметром 40 мм, длиной 105 мм с таким же содержанием компонентов, что и уран активной зоны. Его эффективность 1,27 $\beta$  выбрана так, чтобы при вводе БР в активную зону из состояния критичности на запаздывающих нейтронах был генерирован импульс номинальной мощности. Эффективность БР может слегка меняться при изменении композиции материалов вокруг зоны. Быстрый ввод БР осуществляется пневматически за 220 мс при ходе 360 мм. При такой большой скорости ввода исключается развитие импульса ранее момента достижения максимальной реактивности, что привело бы к малой мощности вспышки (см. гл. 2).

Основные характеристики всех действующих ИРСД на быстрых нейтронах сведены в табл. 1.1.