

2. ГРАФИТОВЫЕ ТЕПЛОВЫЕ РЕАКТОРЫ



Исторически первыми промышленными реакторами – наработчиками плутония – были канальные реакторы на тепловых нейтронах с графитовым замедлителем и прямым проточным водным охлаждением (сокращённо ПУГР – промышленный урано-графитовый реактор).

Рис. 1. Здание, в котором располагался первый в мире экспериментальный уран-графитовый реактор X-10 (США), на котором велась наработка оружейного плутония.

Чтобы получать плутоний в достаточном количестве, нужны сильнейшие нейтронные потоки. В принципе, любой атомный реактор является источником нейтронов, но для промышленного производства плутония используется специально разработанный для этого.



Рис. 2. Первый промышленный реактор В (Хенфорд, США) Фото 1945 г.

Первым в мире экспериментальный реактор, на котором велась наработка плутония, был охлаждаемый воздухом уран-графитовый реактор X-10 (Оак Ридж, штат Теннесси, США) вступивший в строй 4.10.1943. Реактор представлял собой большой графитовый блок (длина стороны куба 24 фута), окружённый со всех сторон бетонной стеной толщиной в несколько футов, играющей роль радиационного экрана. Блок пронизывали 1248 горизонтальных ромбовидных каналов, в которых цилиндрические куски металлические урана образовывали длинные стрежни. Охлаждающий воздух

циркулировал по каналам, со всех сторон омывая куски урана. После окончания облучения, кусок свежего урана вставляли в канал с входной стороны, при этом кусок облучённого урана выпихивался из котла и по жёлобу соскальзывал по жёлобу в расположенное под водой ведро. После нескольких недель подводного хранения уран переносили в химический цех для разделения.

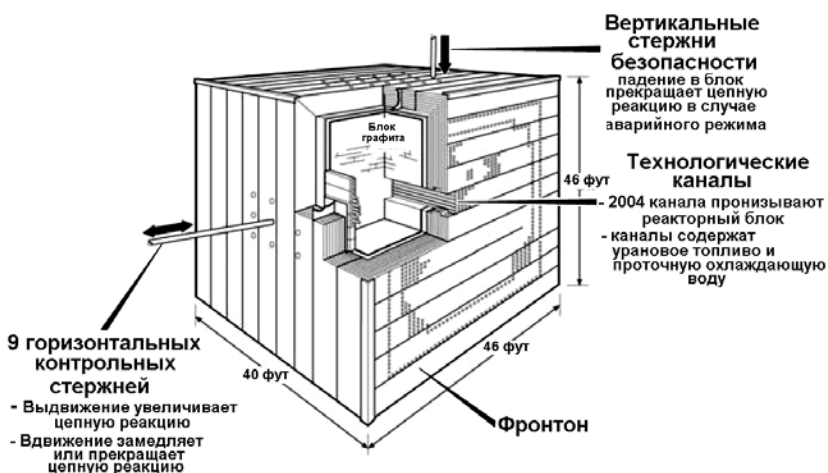


Рис. 3. Схема реактора X-10.

Реактор X-10 снабдил лабораторию Лос-Аламоса плутонием, достаточным для исследования кинетики его деления и определения критической массы, что существенно повлияло на дизайн атомной бомбы. Накопленный опыт позволил перейти к проектированию более мощного реактора.

Первым в мире промышленным реактором по производству плутония был уран-графитовый реактор «В» в Хэнфорде (штат Вашингтон, США). Пущен 26.20.1944, мощность - 250 МВт, производительность - 6 кг плутония в месяц. Количество каналов 2002. Он содержал около 200 тонн металлического необогащённого (природного) урана, 1200 тонн графита и охлаждался водой со скоростью 5 кубометров/мин. Расположение твэлов – горизонтальное. На этом реакторе был наработан плутоний-239 для бомбы «Толстяк», сброшенной на г. Нагасаки. Остановлен в феврале 1968.

Замечание. Общую меру облучённости (отработанности) топливного элемента выражают в мегаватт-днях/тонну (МВт-день/т). Плутоний оружейного качества получается из элементов, с небольшим количеством МВт-день/т, в нем образуется меньше побочных изотопов. Топливные элементы в современных водо-водяных реакторах достигают уровня в 33000 МВт-день/т. Во время Манхэттенского проекта топливо из природного урана получало всего 100 МВт-день/т, таким образом, получался очень высококачественный плутоний-239 (всего 0.9-1% Pu-240, остальные изотопы еще в меньших количествах).

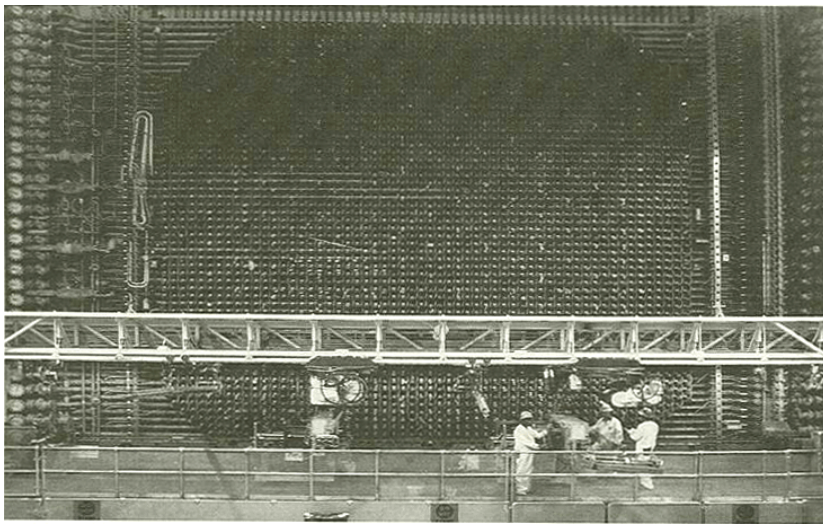


Рис. 4. Промышленный реактор В фирмы Дюпон в Хенфорде. Избыток топливных элементов позволяет успешно бороться с ксеноновым отравлением реактора.

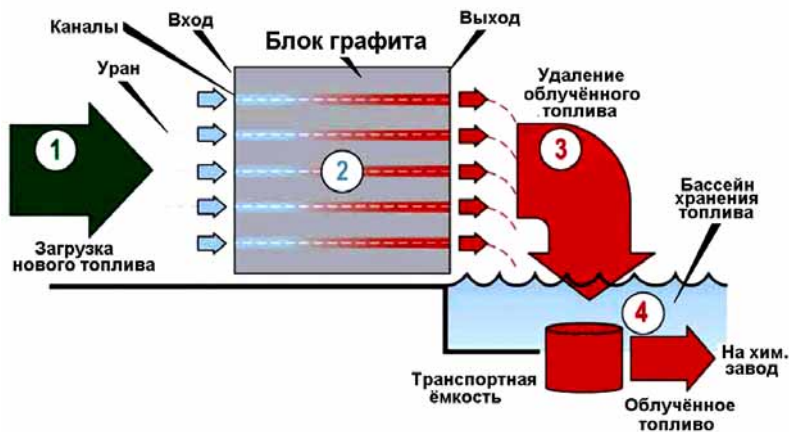


Рис. 5. Схема операций на реакторе В.

1 - топливные элементы, загружаемые в каналы с фронта; 2 - топливо, облучаемое в реакторе; 3 - облучённое топливо извлекаемое на обратной стороне и опускающееся в водный бассейн; 4 - топливо, транспортируемое в защитных контейнерах на химический завод для выделения плутония.

Рис. 6. Современный вид реактора В (после дезактивации и открытия музея).



атомной бомбы; 16.06.87 - вывод реактора из эксплуатации.

В СССР первый промышленный реактор А-1 («Аннушка») мощностью 100 МВт пущен 19.05.1948 в Челябинске-40 (Химический комбинат «Маяк», г.Озёрск Челябинской области). Этапы проекта: 1945 - начало разработки первого промышленного реактора; 22.06.48 - мощность реактора достигла проектного значения; 1949 - завершена наработка и выделение необходимого для изготовления первой бомбы количества плутония; 23.09.49 - испытание первой

Табл. 1. Промышленные реакторы США

Реактор	Начало работы	Окончание работы
Ханфорд		
B	сентябрь 1944	февраль 1968
D	декабрь 1944	июнь 1967
F	февраль 1945	июнь 1965
H	октябрь 1949	апрель 1965
DR	октябрь 1950	декабрь 1954
C	ноябрь 1952	апрель 1969
KW	январь 1955	февраль 1970
KE	апрель 1955	январь 1971
N	декабрь 1963	январь 1987
Саванна Ривер		
R	декабрь 1953	июнь 1964
P	февраль 1954	август 1988
K	октябрь 1954	июль 1992
L	июль 1954	июнь 1988
C	март 1955	июнь 1988



Рис. 7. Центральный зал реактора А-1.

Одновременно был построен и подготовлен к эксплуатации радиохимический завод для выделения плутония с высокой степенью химической чистоты (свыше 99 %).

Второй уран-графитовый реактор-наработчик плутония АВ-1 мощностью около 1000 МВт введён в строй в июле 1950 (остановлен в августе 1989). Третий подобный реактор АВ-2 мощностью 300 МВт пущен в марте 1951 (остановлен в июле 1990). Позднее его мощность была увеличена до 1400 МВт. В декабре 1951 запущен исследовательский уран-графитовый реактор АИ меньшей мощности (остановлен в мая 1987), предназначенный для испытаний тепловыделяющих элементов, а в октябре 1952 запущен четвертый уран-графитовый реактор-наработчик плутония АВ-3 мощностью 1000 МВт (остановлен в ноябре 1990). Позднее введено в строй несколько тяжёловодных реактор-наработчиков плутония.

Всего на комбинате «Маяк» в разные годы были введены в эксплуатацию 10 реакторов разной модификации, 8 из которых остановлены до 1991 года.

Тепловая мощность, МВт	- 100
Геометрические размеры графитовой кладки:	
диаметр, м	- 9,2
высота, м	- 9,2
Масса графита в кладке, т	- 1050
Количество каналов в кладке:	
рабочих каналов с ураном	- 1124
каналов аварийной защиты	- 18
каналов управления	- 8
Количество урановых блоков в канале	- 74
Общее количество урановых блоков	- 83000
Общая масса загрузки урана, т	- 150
Температура воды на выходе из канала, °С	- 85-90
Температура графита, °С	- 220
Общий расход воды, м³/час	- 2500

Табл. 2. Советский промышленный уран-графитовый реактор «А».

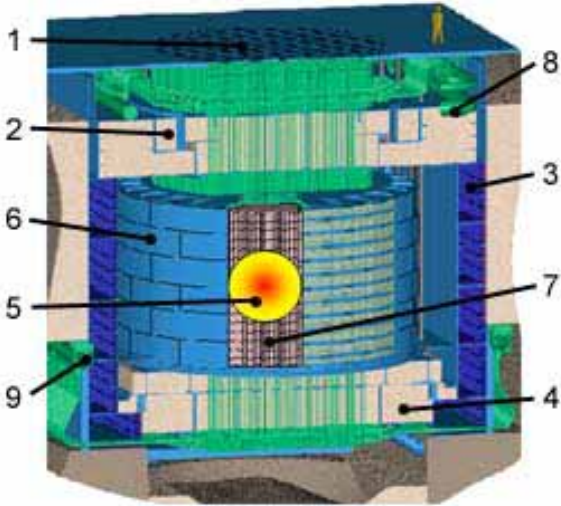


Рис. 8. Промышленный уран-графитовый реактор типа АДЭ.

Настил реактора, 2 - Верхняя защита, 3 - Боковая защита, 4 - Нижняя защита, 5 - Активная зона, 6 - Корпус реактора, 7 - Графитовая кладка, 8 - Трубопроводы, подводящие теплоноситель, 9 - Трубопроводы, отводящие теплоноситель

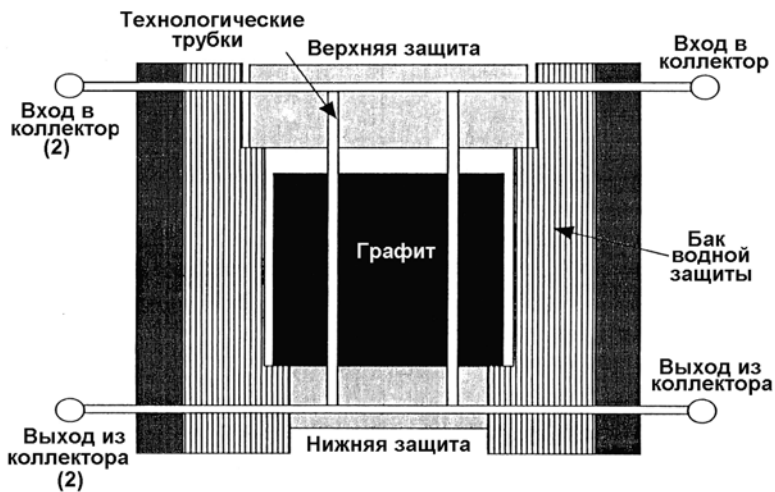


Рис. 9. Принципиальная схема советского реактора типа АДЕ.

Вторым предприятием, на котором были построены реакторы-наработчики оружейного плутония был Сибирский химический комбинат (СХК, г.Северск, Томской области области). Уран-графитовые каналные реакторы: реактор И-1 (изотопный) — проточного типа, введен в эксплуатацию в 1955 г., остановлен в 1990 г. Реакторы ЭИ-2 и АДЭ-3 — энергетические; ЭИ-2 пущен в 1955 г., эксплуатировался до 1990 г., АДЭ-3 эксплуатировался с 1961 по

1992 гг. Реакторы ЭИ-2 и АДЭ-3 предназначены для наработки плутония, выработки электроэнергии и теплоснабжения Северска и Томска. Топливом служат цилиндрические ТВЭЛы на природном (необогащенном) уране в виде металла. В качестве материала для технологических каналов и оболочки урановых твэлов применяются сплавы на основе алюминия. Теплоноситель — вода, для продувки графитовых кладок используется азот высокой чистоты.

Назначение АДЭ-4 и АДЭ-5 — реакторов типа ПУГР, наработка оружейного плутония, что изначально предопределило ряд конструктивных особенностей, обеспечивающих их повышенную внутреннюю самозащищенность по сравнению с энергетическими реакторами типа РБМК. В числе этих особенностей:

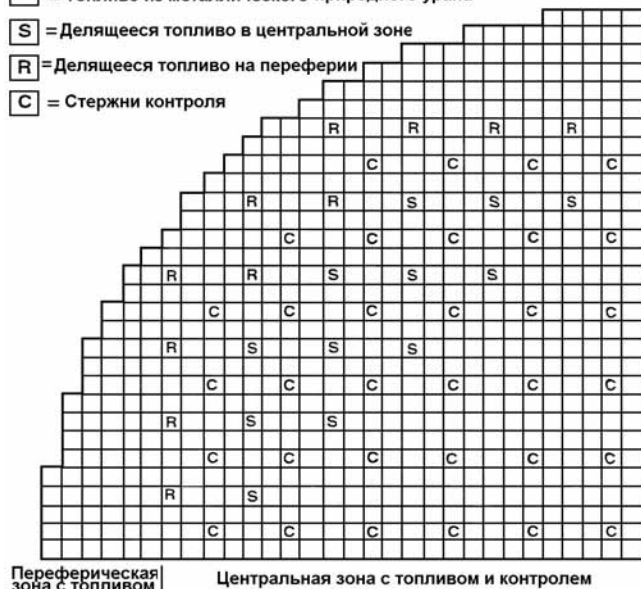
- паровой коэффициент реактивности разогретого реактора, хотя и имеет слабopоложительное значение, но оно существенно меньше, чем у РБМК, а значит, неуправляемый разгон мощности реактора исключен;
- время ввода в активную зону стержней управления и защиты не превышает 6 с, и нежелательные процессы за такой короткий срок не могут развиваться;
- в качестве основного делящегося материала используется необогащенный уран природной концентрации по изотопу уран-235, т.е. количество локальных критических масс в активной зоне ПУГР в десятки раз меньше,

□ = Топливо из металлического природного урана

[S] = Делящееся топливо в центральной зоне

[R] = Делящееся топливо на периферии

[C] = Стержни контроля



чем в РБМК;

- средняя температура графита в активной зоне ПУГР существенно меньше, чем в РБМК, т.е. ПУГР имеет значительно более низкую запасенную в активной зоне энергию.

Рис. 10. Схема активной зоны ПУГР типа АДЕ.

Замечание. Аналогом ПУГР является реактор энергетический РБМК, (чернобыльского типа). Тот и другой реакторы способны набирать плутоний. Есть, однако, и отличия. ПУГРы проектировались, изготавливались и монтировались по стандартам гораздо более высокого класса, чем реакторы гражданского назначения и отвечали более жестким требованиям, в том числе по качеству, надежности и безаварийности. Эксплуатация ПУГРов осуществляется гражданскими специалистами, но по особым, военным законам.

После чернобыльской аварии на промышленных реакторах было выполнено около 100 модернизаций, полностью исключивших возможность аварии чернобыльского типа.

Три из них заглушены, соответственно, в 1990, 1991, 1992 гг. Два реактора АДЭ-4, 5 продолжают функционировать в настоящее время. Сроки эксплуатации АДЭ-4 и АДЭ-5 продлены до 2020 г., с переводом их на малообогащенный уран и снижением мощности на 20%. Пониженная мощность ведет к меньшему выделению тепла и снижает вероятность деформации графитовых стержней.

Третьим заводом, на котором построены реакторы по наработке плутония, был Красноярский горно-химический комбинат (Железногорск, Красноярск-26). Первый уран-графитовый реактор введен в эксплуатацию в 1958 (эксплуатировался 33 года), второй - в 1961 (эксплуатировался 35 лет). Эти реакторы работали в проточном режиме, со сбросом охлаждающей воды в реку Енисей. Проточные реакторы выведены из эксплуатации. Третий реактор, АДЭ-2 с замкнутым контуром, пущен в эксплуатацию в 1964. Тепло с этого атомного реактора используется для выработки электрической энергии и нагрева сетевой воды, которая с

1966 подается для горячего водоснабжения и отопления жилого массива, школ, больниц, промышленных предприятий Железнодорожска. Реактор работает до сих пор, хотя его мощность снижена на 20%

К настоящему времени 3 ПУГР находятся в эксплуатации, 10 ПУГР остановлены. Основными причинами прекращения эксплуатации промышленных реакторов являются: – выработка ресурса реактора и реакторного оборудования; – несоответствие действующим нормам и правилам; – падение спроса на вырабатываемую продукцию

В год реакторы АДЭ-2, АДЭ-4 и АДЭ-5 вместе нарабатывают 1500 кг плутония.

Реактор	Мощность, МВт	Продолжительность работы	Кол-во, т
А	100/900	06.19.48/06.16.87	6,5
ИР-АИ	50/500	12.22.51/05.25.87	3,4
АВ-1	300/1200	04.01.50/12.08.89	8,9
АВ-2	300/1200	04.06.51/06.14.90	9,0
АВ-3	300/1200	09.15.52/11.01.90	6,3
И-1	600/1200	11.20.55/09.21.90	8,5
И-2	600/1200	09. .58/12.31.90	8,2
АДЭ-3	1600/1900	07. .61/08.14.90	11,9
АДЭ-4	1600/1900	02.26.64/ в работе	17,7
АДЭ-5	1600/1900	06.27.65/ в работе	17,1
АД	1600/1800	08.25.58/06.30.92	13,5
АДЭ-1	1600/1900	. .61/08.29.92	12,3
АДЭ-2	1600/1900	. .63/в работе	18,2
Всего			141,2

Рис. 11. Советские промышленные уран-графитовые реакторы и наработанный в них плутоний.