

РАДИАЦИОННЫЕ АВАРИИ. ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ КАТАСТРОФА

**Научно-популярный доклад по
материалам МАГАТЭ и другим
открытым источникам**

ИСТОЧНИКИ

Авария на ЧАЭС 1986г.

- Материалы МАГАТЭ:
 - **INSAG*-1(1988)**
 - INSAG-7 (1993).
- Сборник История атомной энергетики СССР и РФ, Выпуск-4):
 - Доклад ПК от июня 1986.
 - Материалы для совещания МАГАТЭ 25–29 августа 1986г.
 - Доклад комиссии Госатомнадзора СССР от 1991г.

Обзор ядерных и радиологических событий в мире

- A Review of Criticality Accidents отчет LA-3611.
- Обзор ядерных аварий с возникновением СЦР. Отчет Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-13638.

- Самойлов О.Б. и др. Безопасность ядерных установок
- Фейнберг С.М., Шихов С.Б., Троянский В.Б. Теория ядерных реакторов.

Литература по физике реакторов

- Фейнберг С.М., Шихов С.Б., Троянский В.Б.
Теория ядерных реакторов . Т.1.
Элементарная теория реакторов: Учебник
для вузов— Москва, Атомиздат, 1978, 400 с.



Савелий Моисеевич Фейнберг (24 декабря 1910 года, Баку, Российская империя — 20 октября 1973 года, СССР)

Идеолог и руководитель создания ядерных реакторов в СССР: лодочных реакторов, реактора СМ, и т.д.

ИНЕС

МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКАЛА ЯДЕРНЫХ И РАДИОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Руководство для пользователей ИЗДАНИЕ 2008 ГОДА



Подготовлено
совместно МАГАТЭ
и ОЭСР/АЯЭ



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

Крупнейшие аварии (выб.)

Название объекта	Дата аварии	Кол. баллов по ИНЕС
ФУКУСИМА	11 марта 2011г.	7
Чернобыль	26 апреля 1986г.	7
Три Майл Айленд	28 марта 1979г.	5
Уиндскэйл	10 октября 1957г.	5
Авария на ПО Маяк	29 сентября 1957г.	6
БОРАКС-I	22 июля 1954г.	(4-5)
Лаборатория в Чок Ривер (реактор NRX)	12 December 1952г.	5

Основные понятия физики реакторов

- **Ядерное горючее** — изотопы способные к беспороговому делению, прежде всего: ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu ;
- **Замедлитель** — вещество эффективно уменьшающее энергию нейтронов (~ 2 МэВ — средняя энергия для нейтронов деления) и слабо поглощающее их;
- **ТВЭЛ** — тепловыделяющий элемент, состоит из топлива и оболочки;
- **ТВС** — тепловыделяющая сборка, состоит из ТВЭЛ-ов;
- **Управляющие стержни** — стержни состоящие из вещества эффективно поглощающего нейтроны (**B, Cd, Hf**);
- **Мгновенные нейтроны** образуются непосредственно в процессе деления, а **запаздывающие нейтроны** образуются после β -распада, доля запаздывающих нейтронов обозначается буквой β и равна 0,26%, 0,64% и 0,21% для ^{233}U , ^{235}U и ^{239}Pu соответственно.

$$W(t) = W(0) \exp(\rho t / T_{эф})$$

- Реактивность $\rho = (1 - 1/k_{эф})$, где $k_{эф} = k_{\infty} / k^{кр}_{\infty}$
- k_{∞} — коэффициент мультиплицирования нейтронов в бесконечной размножающей **среде**, для стационарной работы **реактора конечного** размера нужно, чтобы $k_{\infty} = k^{кр}_{\infty} > 1$;
- $\rho > 0$ — реактор надкритичен, $\rho = 0$ — реактор критичен, $\rho < 0$ — реактор подкритичен;
- Реактивность измеряется либо в безразмерных единицах, либо в процентах, либо в долларах.

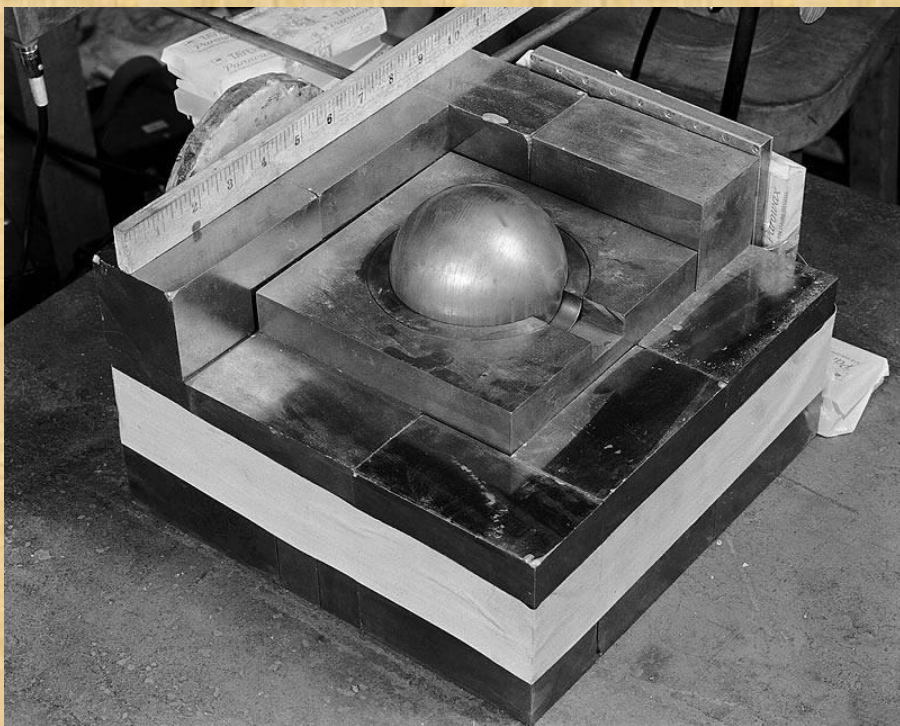
Ядерное испытание «ABLE»

**1 июля 1946г. в 09:00,
атолл Бикини**

5 кораблей разрушено
14 получили серьезные
повреждения



Дьявольское ядро



Лос-Аламос, Нью-Мексико, 21 августа 1945г.
(отражатель — карбид вольфрама)

Масса ядра **6,2 кг**, плотность $\sim 15,7 \text{ г/см}^3$ (δ -Pu)

Экспозиция составила около **800 фэр**, 10^{16}
делений. Экспериментатор (Гарри Даглян) умер
через 28 дней.



Лос-Аламос, Нью-Мексико, 21 мая 1946г.
(отражатель — бериллий)

Результат этой вспышки **3×10^{15} делений**. Восемь
человек облучены — **900, 185, 116, 93, 41, 26, 18, и
18 фэр**. Экспериментатор (Луи Злотин) умер в
течении 9 дней.

Реактор NRX

ООО Атомная энергия Канады,
Лаборатория Чок Ривер (~200 км от
Оттавы), Онтарио — 12 декабря 1952г.
Стержни из **природного урана**,
тяжеловодный замедлитель,
отражатель — **графит**, многократные
всплески мощности; незначительные
дозы облучения.



Мощность реактора была больше **1 МВт** на протяжении не более **70 с**, а общий выброс энергии оценивался в **4000 МВт-сек** или около **1.2×10^{20} делений**. Активная зона и каландр были повреждены до неузнаваемости, и около **10^4 Кюри** долгоживущих продуктов деления были унесены в подвал потоком **4000 м³** охлаждающей воды. Облучение персонала было, по-видимому, низким, и реактор был восстановлен в эксплуатацию чуть **более** чем через **1 год**.

Расчистка территории потребовала нескольких месяцев работы, частично выполненной 150 военнослужащими ВМС США, проходившими подготовку в этом районе, в том числе будущим президентом США **Джимми Картером**.

Национальная станция испытания ядерных реакторов, Айдахо, 22 июля 1954 г.

Реактор «БОРАКС»; топливо в виде сплава алюминия и урана; водный замедлитель; **единичный всплеск мощности; незначительные дозы облучения.**

Реактор «БОРАКС-I» состоял из **28 топливных элементов** типа MTR с **легководным замедлителем**. Каждый элемент содержал **18 топливных пластин** размером 2,845 X 0,060 X 24,6 дюймов (**7,226 X 0,152 X 62,48 см**), изготовленных из сплава урана и алюминия в алюминиевой оболочке толщиной 0,020 дюйма (0,05 см). Общая масса загружаемого урана составляла **4,16 кг**. Активная зона целиком помещалась внутри бака диаметром 4 фута (1,22 м) и высотой 13 футов (4 м), наполовину погруженного в шахту.

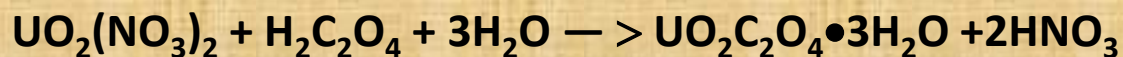
Выбрали такое значение **избыточной реактивности**, чтобы в результате увеличения энерговыхода вызвать **расплавление 4 % топливных пластин**. Всего выделилось **135 МДж** энергии вместо предполагаемых 80 МДж, или, при величине удельного энерговыделения, равной 180 МэВ на деление, **$4,68 \times 10^{18}$ делений**. Эта энергия эквивалентна 70 фунтам (**31,8 кг**) тротила. Максимальная мощность составила **$1,9 \times 10^{10}$ ватт**.



ПО «Маяк», г. Озерск, 21 апреля 1957 г

- **Накопление осадка с высокообогащенным (90 %) ураном в монжусе опасной геометрии; один летальный исход, пятеро серьезно облученных.**

Авария произошла в монжусе, который представлял собой горизонтальный цилиндрический **сосуд** диаметром 450 мм и длиной 650 мм с объемом около **100 литров**.



Приблизительно через 5,5 часа на расстоянии 1,5 м от монжуса мощность экспозиционной дозы составила **18 Р/час**. По оценкам, это значение мощности дозы соответствует полному числу делений за ядерную аварию около **10¹⁷**. Через 17 часов после аварии была измерена удельная активность **²⁴Na в пробе крови** аппаратчицы, которая составила **245 Бк/см³**. Согласно полученным в то время результатам, поглощенная доза на все **тело** аппаратчицы составила около **3000 рад**. Она скончалась через 12 дней после аварии.

Во время аварии в помещении на разных расстояниях от монжуса находились **5 человек**. По оценкам, они получили дозы свыше **300 рад**. Все они перенесли лучевую болезнь, но выздоровели.

Как показали результаты вскрытия оборудования в камере, его зачистки и измерения массы урана, масса отложений в монжусе составила **3,06 кг по урану-235**.

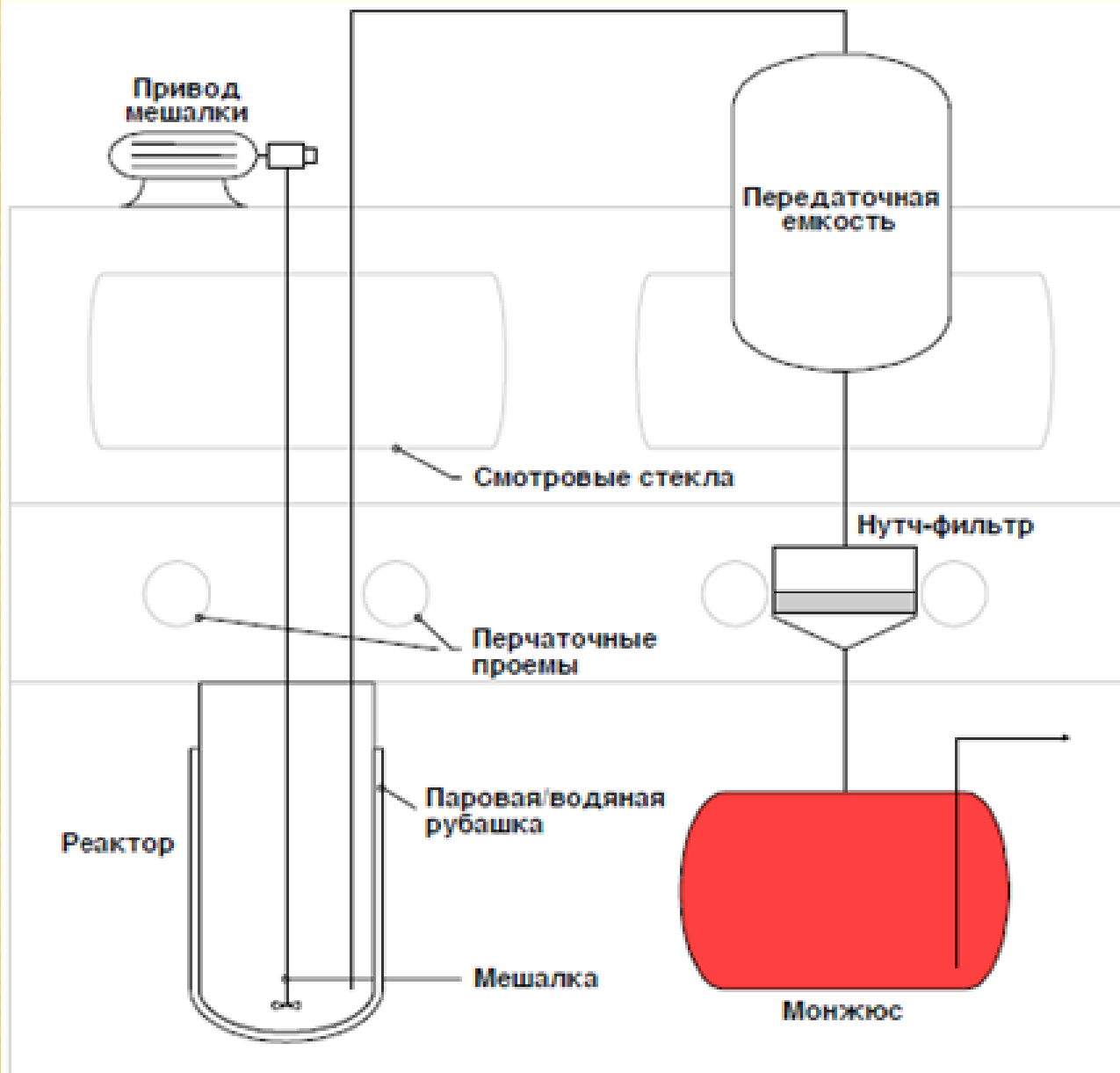


Рисунок 7. Схема расположения оборудования для оксалатного осаждения и процесса фильтрации.

Авария на ПО Маяк 29 сентября 1957г.

- **29 сентября 1957** года, в воскресный день в 16 часов 22 минуты по местному времени на химкомбинате "Маяк" взорвалась одна из емкостей банка №14 комплекса С-3, где хранились высокоактивные отходы. Взрыв полностью разрушил банку из нержавеющей стали, содержащую **70–80 тонн** жидких радиоактивных **отходов**. Эта емкость находилась в бетонном каньоне на глубине 8,2 метра, толщина перекрытия стен которого составляла около метра. Бетонная **плита** перекрытия каньона весом в **160 тонн** была сорвана взрывом и отброшена на **25 метров**.
- Из хранившихся в 14-й емкости **20 миллионов кюри** радиоактивности **10%** было **поднято** в воздух на высоту до **одного километра**.
- Общая протяженность Восточно-Уральского следа составляла **105–110 километров** в длину при ширине **4,5–6 километров**.
- **Причина:** В **1956 году** в одном из контейнеров охлаждающие трубки стали подтекать и были отключены. Прошло больше года без попыток исправить повреждения, отходы стали подсыхать в результате индуцируемого ими тепла, при этом сильновзрывчатые нитратные и ацетатные соли собирались на поверхности. От случайной искры произошла детонация солей, мощность произошедшего взрыва оценивается по воронке и разрушениям в **70-100 тонн тринитротолуола**[10].

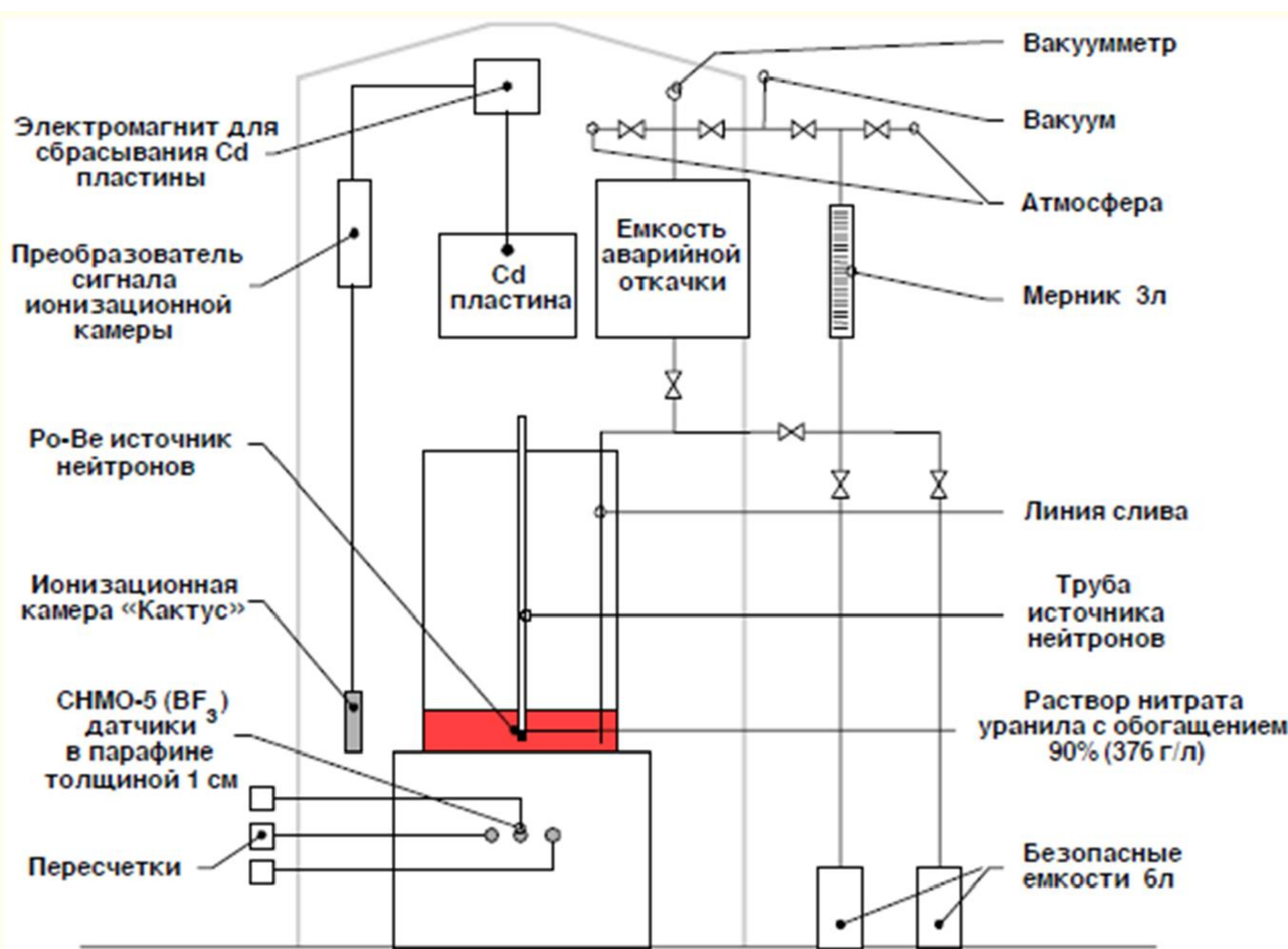
ПО «Маяк», г. Озерск, 2 января 1958 г.

- Раствор уранилнитрата, U(90 %), в экспериментальной емкости; одна вспышка; три летальных исхода, один случай значительного облучения.

Это случилось в смену с 13:00 до 19:00 в первый рабочий день после новогодних праздников, на установке для критических экспериментов после окончания эксперимента.

На основе измерений активности продуктов деления в растворе было оценено число делений за единственный пик мощности, которое составило $2,25 \times 10^{17}$.

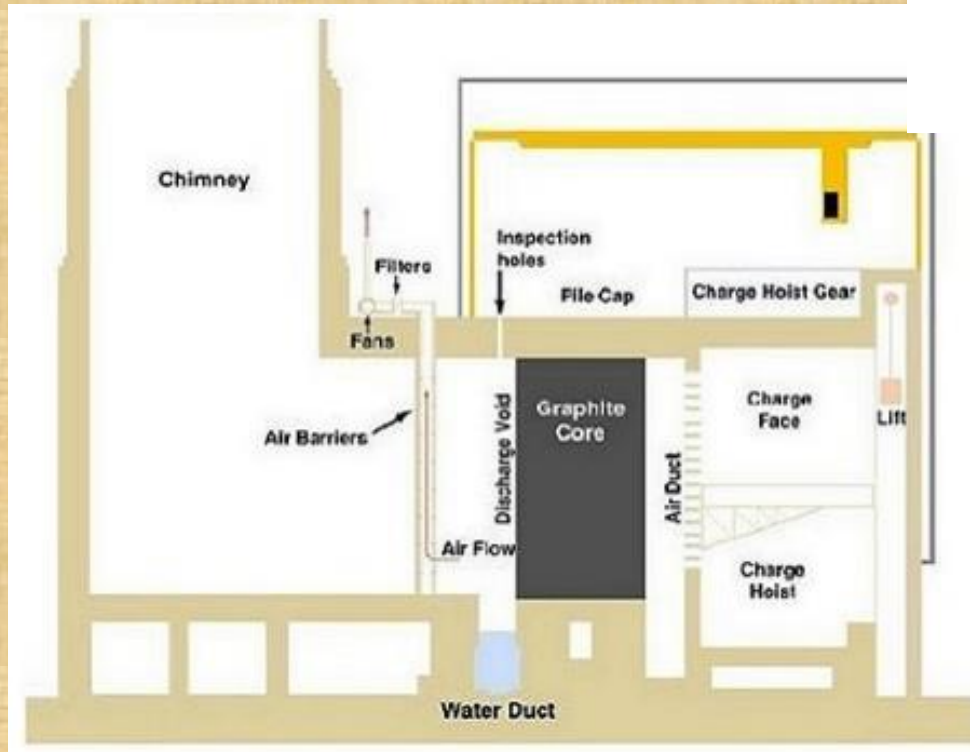
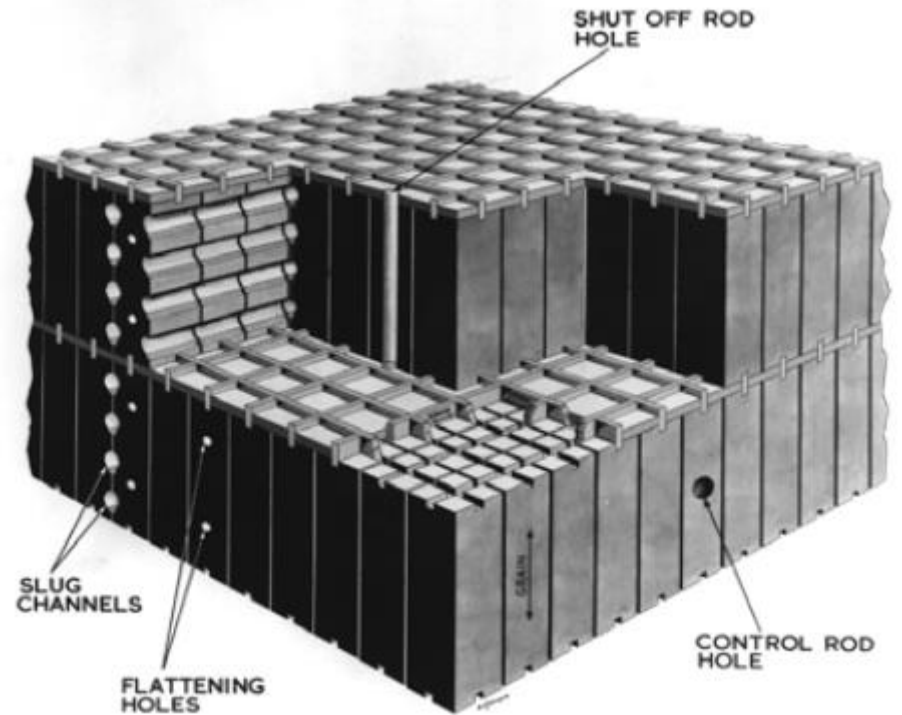
Поглощенная доза смешанного нейтронного и гамма-излучений для каждого сотрудника, находившегося вплотную к баку, составила около **6000 рад**, все **трое** скончались через 5–6 дней после аварии. **Сотрудница**, находившаяся на расстоянии 2,5 м от места происшествия, получила дозу около **600 рад**, перенесла острую лучевую болезнь с потерей в последующий период зрения из-за катаракты обоих глаз.



Пожар в Уиндскэйл. 10 октября 1957г.



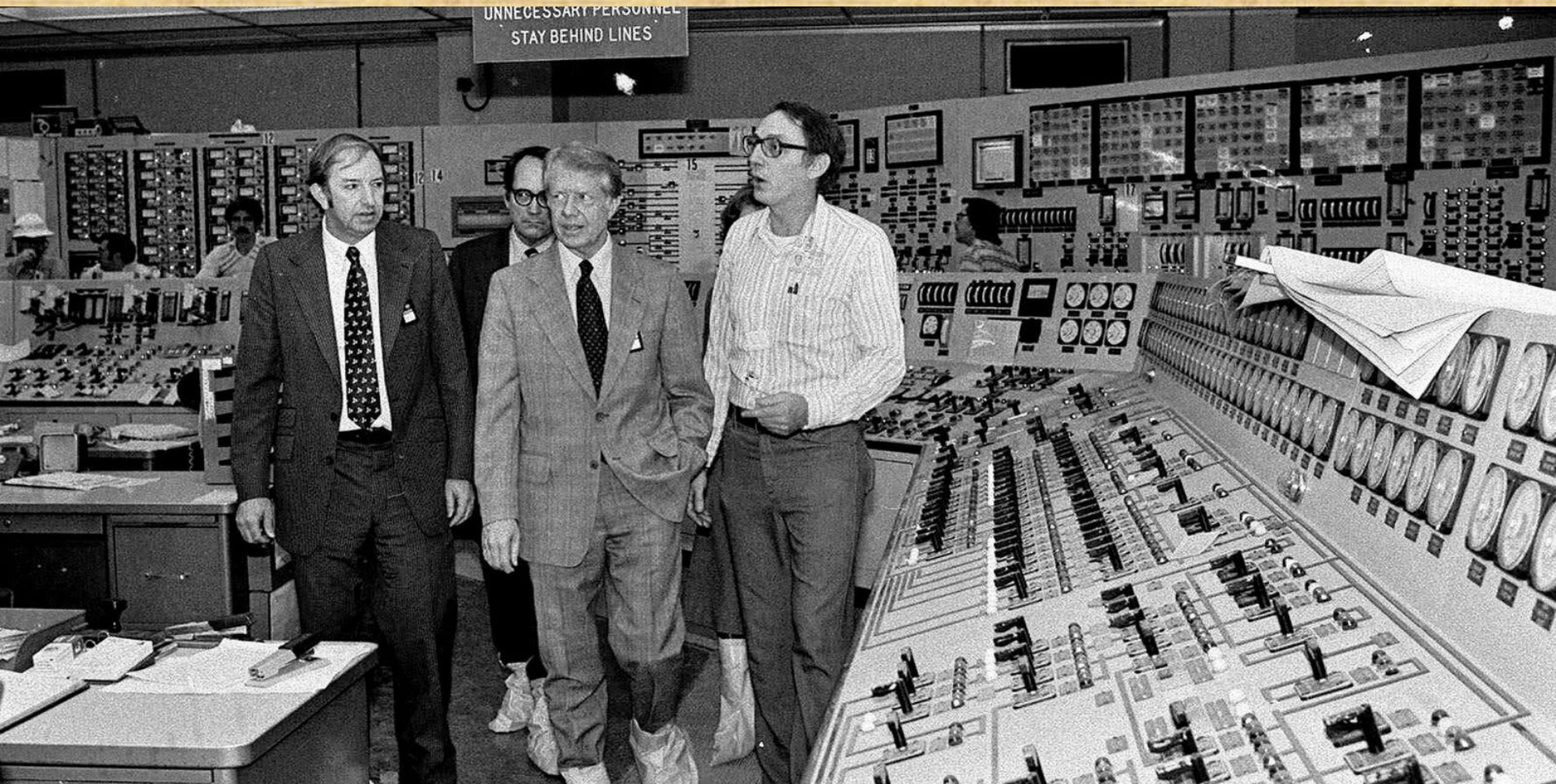
Назначением графитовых реакторов Pile 1 и 2 в Уинскейле, было **производство** оружейного **плутония** из **необогащенного** урана. Пайл 1 был введен в эксплуатацию в октябре 1950 года, Пайл 2 — в июне 1951 года.



Они были рассчитаны на пять лет и прослужили семь, пока не закрылись после пожара. Операции по выводу ядерных объектов из эксплуатации начались в 1980-х годах и, по оценкам, продлятся после 2040 года.

- **Активная зона реактора** состоит из **2000 длинных тонн графитового замедлителя/отражателя**, содержащего около 50 000 блоков графита, соединенных вместе с помощью системы графитовых планок и плиток, образующих квадрат **15x15м** в плане и глубиной **7,5 м**. Кладка пронизана **3444** горизонтальными топливными каналами диаметром 100 мм и 977 изотопными каналами диаметром 44 мм. Каждый топливный канал содержал цепочку из 21 твердого уранового металлического топливного стержня, с оболочкой из оробренного алюминия. Загрузка несколько тонн необогащенного урана. Температура в рабочем состоянии **20–153°C**.
- **Энергия Вигнера** — накопление дислокаций в материале под воздействием нейтронного потока. Дислокации приводят как к "распуханию" кладки, так и к накоплению внутренней энергии.
- **Отжиг** — с 1952г. эксплуатирующей организации приходится проводить отжиг для ликвидации дефектов решетки в графите. Температура отжига пришлось со временем увеличить с **250 до 430°C**.
- **Авария** произошла после отжига, **загорелся уран** в канале 20/53.

Три Майл Айленд, 28 марта 1979г.



Здание защитной оболочки

Градирня

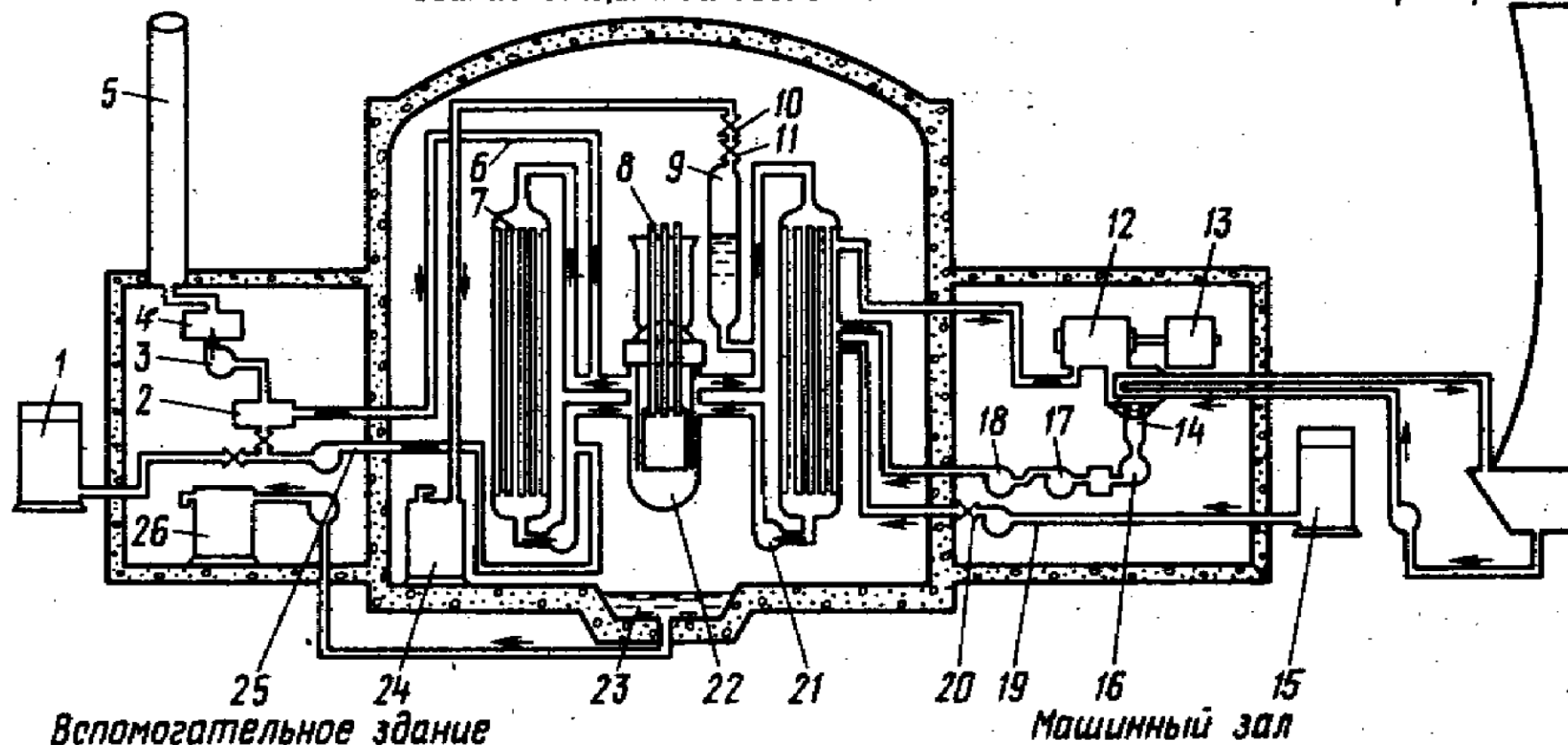


Рис. 12.1. Схема АЭС ТМА:

1— бак хранения борированной воды; 2— бак с водой для подпитки; 3— вентиляционный отсек; 4— бак выдержки радиоактивных газов; 5— вытяжная труба; 6— линия выпуска; 7— парогенератор; 8— стержни регулирования; 9— компенсатор объема; 10 — разгрузочный клапан; 11 — запорный клапан; 12 — турбина; 13 — генератор; 14 — конденсатор; 15 — бак хранения конденсата; 16 — насос конденсатора; 17 — вспомогательный насос; 18 — главный насос питательной воды; 19 — аварийная линия питательной воды; 20 — запорный клапан; 21 — циркуляционный насос первого контура; 22 — реактор; 23 — водоотстойник; 24 — дренажный бак; 25 — линия системы впрыска высокого давления; 26 — бак хранения радиоактивных сбросов

Последствия аварии на 2-ом энергоблоке АЭС ТМА

- Средняя доза облучения от радиации, полученная населением (порядка 2 миллионов человек) в результате аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд», составила не более чем 1 % от годовой дозы, получаемой в результате фонового облучения и медицинского обслуживания.
- После аварии на Три-Майл-Айленд протестное движение приобрело национальные масштабы. По всей Америке прошли демонстрации и марши протеста, на которых присутствовали и известные люди. Так в мае 1979 года антиатомный митинг в Вашингтоне собрал 65 тысяч человек, а на протестную демонстрацию в Нью-Йорке прошедшую в сентябре этого же года пришло уже двести тысяч.
- После 1979 и до 2012 года ни одной новой лицензии на строительство АЭС не было выдано, а ввод в строй 71 ранее запланированной станции был отменён.

РБМК

- РБМК — реактор большой мощности канальный. Графитоводный кипящий реактор. Теплоноситель — легкая вода.
 - Главный конструктор реакторной установки: НИКИЭТ, академик Доллежалъ Н. А.
 - Научный руководитель проекта: ИАЭ им. И. В. Курчатова, академик Александров А. П.
 - Генеральный проектировщик (ЛАЭС): ГСПИ-11 (ВНИПИЭТ), Гутов А. И.
 - Главный конструктор турбоустановки: ХТГЗ «Турбоатом», Косяк Ю. Ф.
- РБМК-1000 были установлены на Ленинградской, Чернобыльской, Курской, Смоленской АЭС.
- 2 энергоблока РБМК-1500 были установлены на Игналинской АЭС.

Основные характеристики действующих РБМК-1000

Тепловая мощность реактора, МВт	3200
Электрическая мощность блока, МВт	1000
КПД блока, %	31,25
Давление пара перед турбиной, атм	65
Температура пара перед турбиной, °С	280
Размеры активной зоны, м:	
— высота	7 (3,5-ВВЭР-1000)
— диаметр (ширина×длина)	11,8 (3,2-ВВЭР-1000)
Загрузка урана, т	192
Обогащение, % ²³⁵ U	2,6-3,0/2,0/1,8
Число каналов:	1693-1661
Среднее выгорание, МВт·сут/кг:	22,5
Размеры оболочки ТВЭЛа (диаметр×толщина), мм:	13,5×0,9
Материал оболочек твэлов:	Zr + 2,5 % Nb
Число ТВЭЛов в кассете (ТВС)	18
Количество кассет (ТВС)	1693

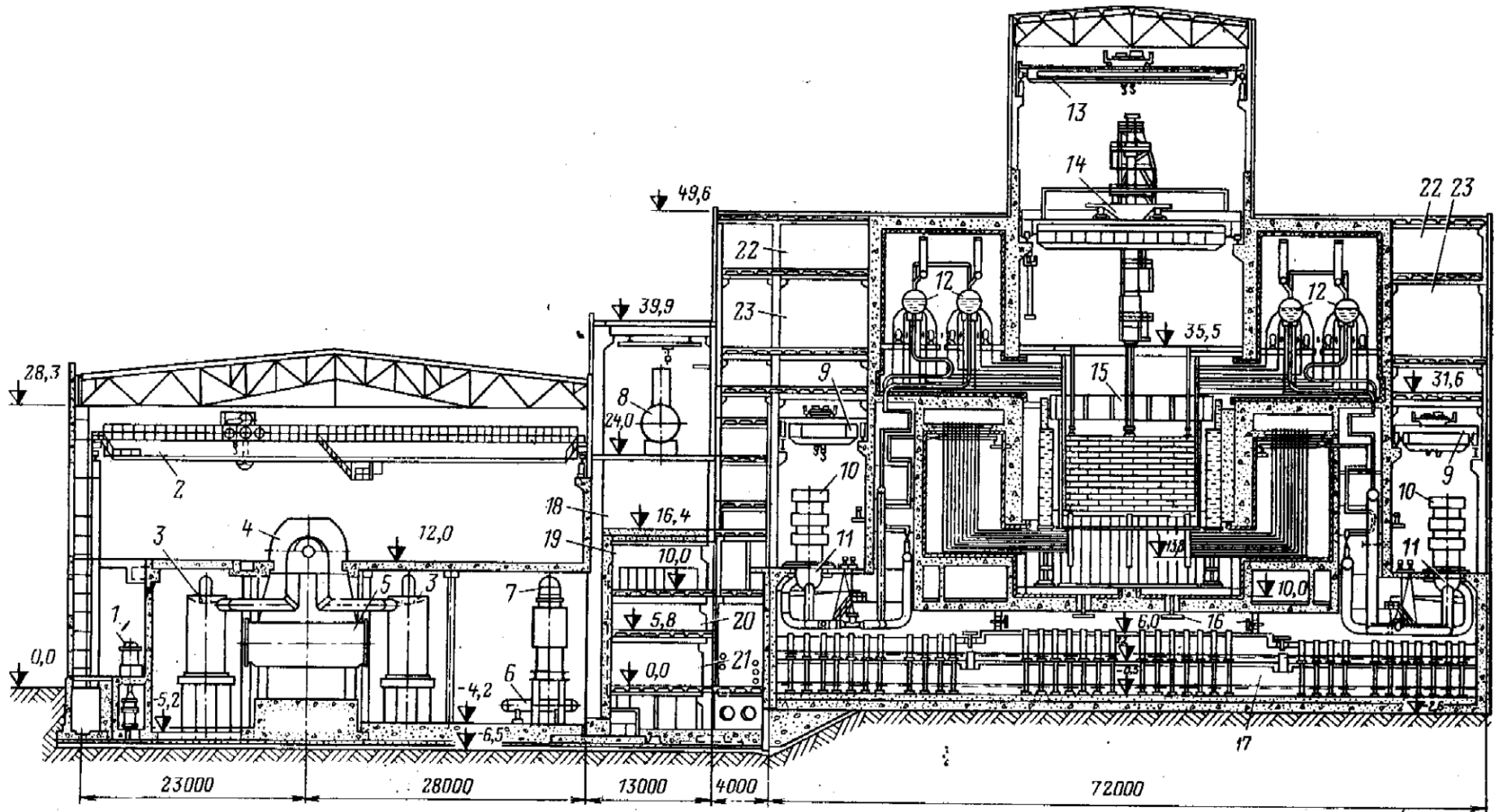


Рис. 12.3. Поперечный разрез главного корпуса АЭС с реактором РБМК-1000:

1— конденсатный насос; 2— мостовой кран машинного зала; 3— сепаратор-перегреватель пара; 4— турбина К-500-65/3000; 5— конденсатор турбины; 6— подогреватель высокого давления; 7— подогреватель низкого давления; 8— деаэратор; 9— мостовой кран; 10— двигатели ГЦН; 11— главные циркуляционные насосы; 12— барабаны-сепараторы; 13— мостовой кран; 14— разгрузочно-загрузочная машина; 15— реактор РБМК-1000; 16— обратные клапаны помещения нижних водяных камер и системы локализации аварий; 17— бассейн-барботер; 18— трубопроводный коридор; 19— помещение блочного щита управления; 20— кабельный полуэтаж; 21— помещение распределительного устройства собственных нужд; 22, 23— помещения вентиляционных систем

АКТУАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ РБМК-1000

Александров С.И., Алимов Ю.В., Жирнов А.П., Кузнецов П.Б., Сахарова Т.Ю., Рождественский И.М., Рождественский М.И.
АО «НИКИЭТ»

Дружинин В.Е., Шмонин Ю.В.
АО «ВНИИАЭС»

Физические задачи обеспечения безопасной эксплуатации реакторов РБМК-1000 являются актуальными и имеют различные области применения:

- расчетная поддержка эксплуатации;
- углубленная оценка безопасности;
- инновационные проекты;
- работы по выполнению требований и рекомендаций нормативных документов.

В основе прикладных задач обеспечения безопасной эксплуатации реакторов РБМК-1000 - развитие методик и программных средств физических расчетов и расчетно-экспериментальных методик, включая их верификацию, подготовку и проведение процедуры аттестации.

Верификация методик и программ нейтронно-физических расчетов

В 2016–2018 гг. выполнены работы по верификации и аттестации программных средств нейтронно-физических расчетов реакторов РБМК-1000:

- Программного комплекса (ПК) MSU-RBMK;
- ПК SADCO версия 10.1;
- Программы POLARIS и ТРОЙКА комплекса ЭНЕРГИЯ;
- Программы MNT-CUDA, использующей групповой метод Монте-Карло.

Расчетные коды применяются для нейтронно-физических и нейтронно-теплогидравлических расчетов реакторов РБМК-1000 со штатной и отремонтированной графитовой кладкой.

ПК MSU-RBMK

Методика нейтронно-физических расчетов реакторов РБМК-1000 основана на решении уравнения переноса нейтронов (статистических уравнений) с учетом энергии нейтронов и всех элементов активной зоны реактора. Используются точные физические законы (резонансное поглощение, диффузия, тепловое расширение).

Гетерогенная структура активной зоны в расчетной модели сохраняется. Подготовка трехмерной прецизионной модели реактора РБМК-1000 требует значительных усилий и может быть выполнена с использованием специальных программных средств. В НИКИЭТ и ВНИИАЭС для этого применяются программы GENIFER и КДМК, которые используют различные опции и приближения, что обеспечивает независимый подход в проведении прецизионных расчетов.

Объем исходной информации о состоянии реактора РБМК-1000 на энергетическом уровне мощности в прецизионной расчетной модели ПК MSU-RBMK реактора составляет 370 Мб или 18 млн. строк.

Проведена верификация расчета нейтронно-физических характеристик реакторов РБМК-1000 на энергетических уровнях мощности, определена погрешность расчетов ПК MSU-RBMK.

Расчеты $K_{эф}$ по ПК MSU-RBMK выполнены с розыгрышем не менее 60 млн. историй, статистическая погрешность расчета $K_{эф}$ составляет не более 0,0001.

Среднее значение $K_{эф}$ близко к единице (1,0000).

Среднеквадратическое отклонение (σ) составляет ~ 1 %.

Аналогичные результаты получены для расчетов на физических уровнях мощности.

Аналогичные результаты получены для расчетов на физических уровнях мощности.

Гетерогенная структура всех элементов активной зоны в расчетной модели сохраняется. Подготовка трехмерной прецизионной модели реактора РБМК-1000 требует значительных усилий и может быть выполнена с использованием специальных программных средств. В НИКИЭТ и ВНИИАЭС для этого применяются программы GENIFER и КДМК, которые используют различные опции и приближения, что обеспечивает независимый подход в проведении прецизионных расчетов.

Объем исходной информации о состоянии реактора РБМК-1000 на энергетическом уровне мощности в прецизионной расчетной модели ПК MSU-RBMK реактора составляет 370 Мб или 18 млн. строк.

Проведена верификация расчета нейтронно-физических характеристик реакторов РБМК-1000 на энергетических уровнях мощности, определена погрешность расчетов ПК MSU-RBMK.

Расчеты $K_{эф}$ по ПК MSU-RBMK выполнены с розыгрышем не менее 60 млн. историй, статистическая погрешность расчета $K_{эф}$ составляет не более 0,0001.

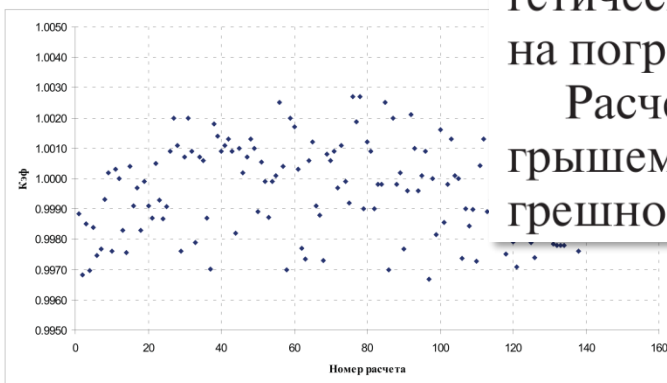
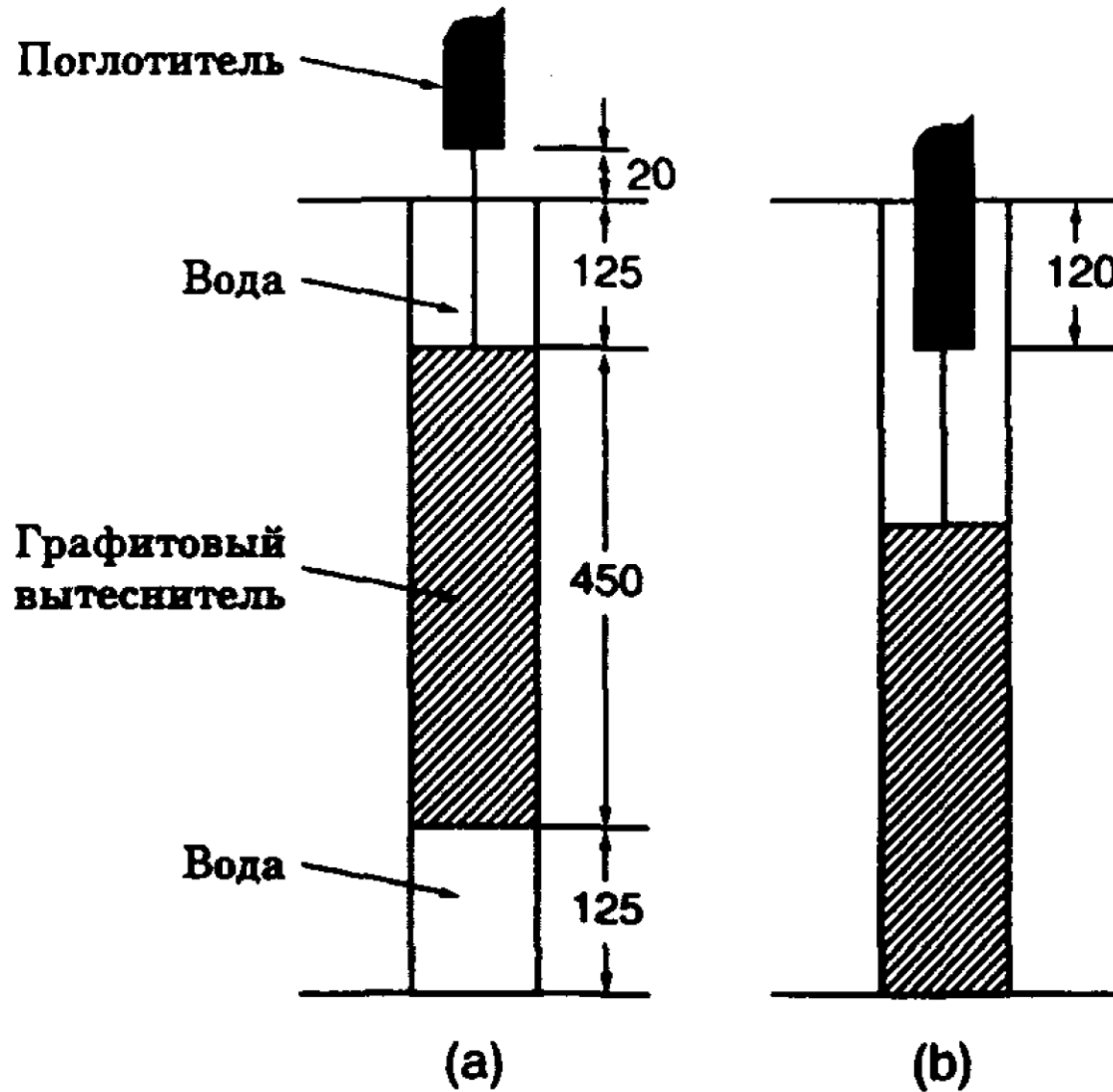


Рис. 1. Результаты расчетов $K_{эф}$ на энергетических уровнях мощности

Конструкция стержней СУЗ



Авария на ЛАЭС-1, 30 ноября 1975г.

1. Ошибочное отключение второго турбо генератора (ТГ) вместо разгруженного, который предстояло вывести в ремонт, в результате чего срабатывает защита, что приводит к отключению реактора.
2. Для запуска ТГ потребовалось около 3 часов, что привело к серьезному отравлению реактора. В результате реактор был выведен на МКУ (минимальный контролируемый уровень) мощности практически без запаса реактивности (со второй попытки).
3. Был **запущен ТГ** и начался дальнейший подъем мощности.
4. На мощности (тепловой) **~1700 МВт** СИУР (старший инженер управления реактором) остановил реактор кнопкой АЗ-5.

Результат: Разрушен ТК (топливный канал) 13-33. Вокруг ТК массовое разрушение оболочек ТВЭЛ — 33шт. Выброс радиоактивности по разным оценкам **от 700т. до 1,5млн. Кюри.**

Основные причины аварии на ЛАЭС

- Человеческий фактор* — нарушение регламента по запасу реактивности : 3,5 стержня — по регламенту не менее 8, после аварии не менее 15 (но в момент аварии уже 21!). Слишком быстрый подъем мощности (за 18 мин. на 700МВт — тепловых).
- Неравномерность нейтронно-физических полей в реакторе (после аварии установлено 24 укороченных стержня в нижней половине реактора). Количество стержней СУЗ (стержни управления и защиты реактором) увеличено до 32 и размещено на периферии реактора в топливных каналах. Внедрена 7-12-зонная система ЛАР (локального автоматического регулирования)
- Низкое обогащение топлива (после аварии повышено до 2%).
- Наличие концевго эффекта (не был устранен).

* ЛАЭС в 1975г. принадлежала Минсредмашу.

Авария на 4-м блоке Чернобыльской АЭС, 26 апреля 1986г.

- **25.04.86** Перед остановкой на плановый средний ремонт на блоке проводились испытания режима выбега ТГ № 8 с целью доработки системы возбуждения ТГ. 01:06 Начало разгрузки энергоблока.
- 03:47 Тепловая мощности реактора снижена до 1600 МВт.
- В 14:00 разгрузка генератора была приостановлена по требованию диспетчера Киевэнерго.
- В 23:10 продолжена разгрузка энергоблока.
- **26.04.86** в 00:05 мощность снижена до 720 МВт
- 00:28 мощность составила 500 МВт и затем упала до 30 МВт. Нейтронная мощность до 0. Через 4–5 мин. начат подъем мощности.
- 01:03 мощность поднята до 200 МВт и испытания начинаются на этой мощности
- 1:23:04 начался выбег турбины.
- 1:23:40 реактор остановлен по сигналу АЗ-5.
- 1:23:49 разрыв технологического канала.
- 1:24 запись в журнале о сильных толчках.

Основные причины аварии на ЧАЭС

Человеческий фактор:

- Нарушение регламента по запасу реактивности : 6–8 стержней — по регламенту не менее 15.
- Работа при малой мощности с малым ОЗР.
- Высокий расход воды перед аварией, что вызвало перегрев воды на входе в реактор и закипание, после снижения расхода (в режиме выбега)

Недостатки конструкции и регламентов:

- Наличие положительного коэффициента паровой и мощностной реактивности.
- Неравномерность нейтронно-физических полей в реакторе.
- Низкое обогащение топлива (после аварии повышено до 2.4%).
- Наличие концевго эффекта.
- Сильное выгорание топлива.

Ядерный или паровой взрыв?

- Мощность взрыва $\sim 200\text{т}$ в тротиловом эквиваленте ($8,4 \times 10^{11}$ Дж, или $2,6 \times 10^{22}$ делений, или 0,04 моль ^{235}U)
- Вес американской бомбы времен 2-ой мировой войны «AN-M56» — 1800 кг (масса взрывчатки около 75%)
- Урановая бомба Малыш, сброшенная на Хиросиму — 13 килотонн ($\sim 700\text{г}$ ^{235}U из 64 кг).

"В двухфазной смеси плотность может значительно изменяться без изменения температуры, при постоянном давлении, при этом может сильно меняться реактивность. Часто она возрастает при снижении плотности теплоносителя, т.е. при вытеснении воды паром. Именно последнее происходит при повышении мощности в **"кипящих" реакторах...**"

.....

"...В некоторых случаях возможен саморазгон реактора, если повышение температуры и мощности приводит к росту реактивности. большей частью происходит обратный процесс, но могут быть довольно широкие зоны, где температурный или **мощностный (или паровой)** коэффициенты реактивности положительны. Правда, проскочив эту зону, реактор всегда попадает в зону отрицательных температурных и мощностных коэффициентов, однако при этом "проскоке" его мощность может возрасти на столько, что неминуемо значительное разрушение активной зоны и даже авария реактора с очень тяжелыми последствиями."

С. М. Фейнберг

Генерация электроэнергии В России

- Основные источники по установленной мощности:
 - Тепловые станции на горючих ископаемых: 160,2 ГВт
 - Гидроэнергетика: 48,1 ГВт
 - Атомные станции: 27,9 ГВт
 - Ветроэнергетика: 0,01 ГВт
 - Солнцеэнергетика 0,08 ГВт
- По видам энергетики выработка:
 - Тепловые станции: 628,0 ТВт*ч
 - Гидроэнергетика: 186,7 ТВт*ч
 - Атомные станции: 196,4 ТВт*ч
 - Ветроэнергетика: 0,09 ТВт*ч
 - Солнцеэнергетика: 0,16 ТВт*ч

Производство электроэнергии в 2016 году составило 1064,1 ТВт*ч

Nuclear Power Status 2018

Reactors in operation

396 413 MW(e) total net capacity

2 563 TWh electricity supplied

450 Nuclear power reactors

Reactors under construction

56 643 MW(e) total net capacity

55 Nuclear power reactors

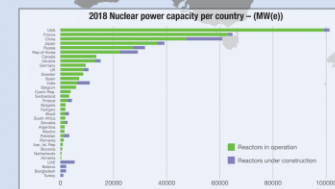
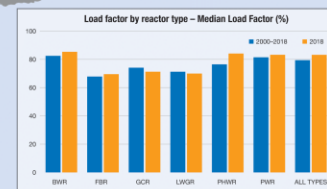
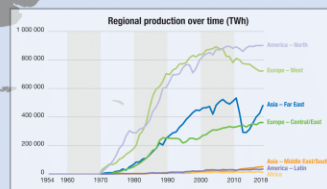
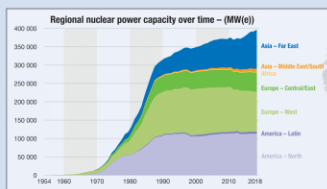
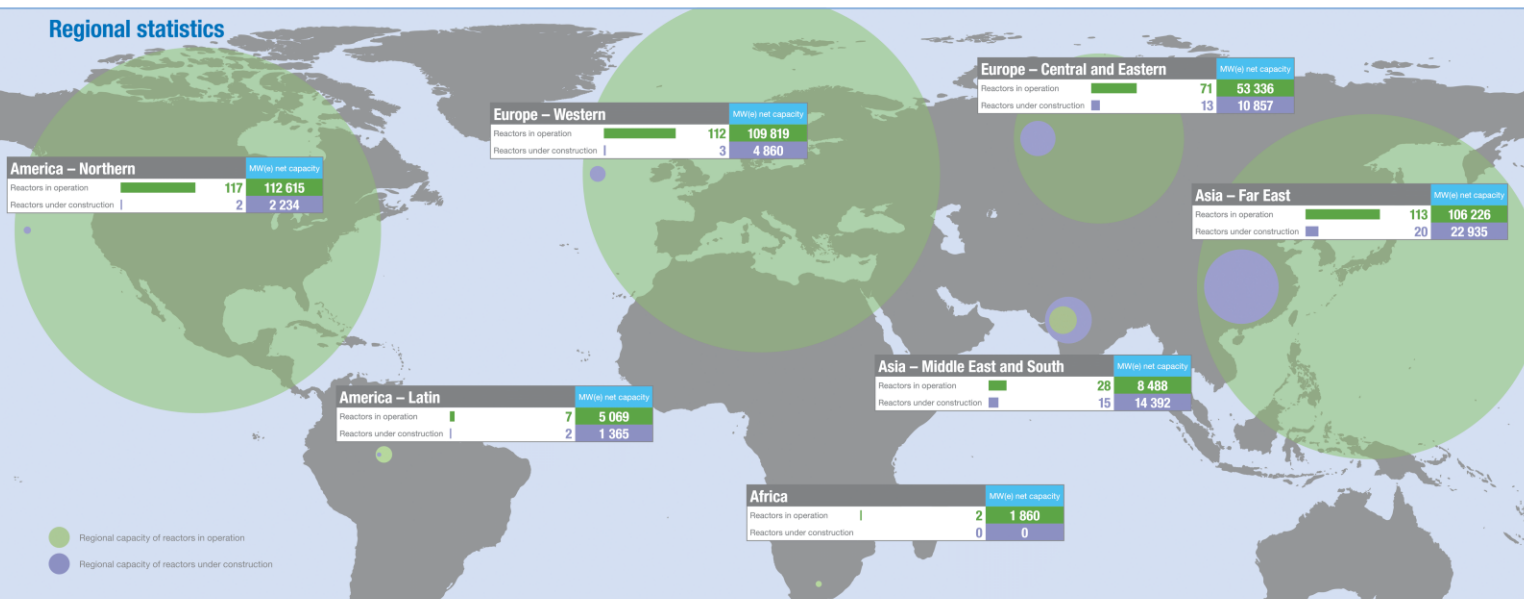
Operating experience

17 881 Reactor-years of operation

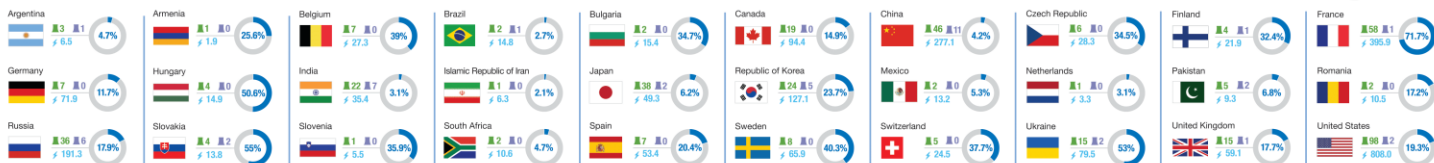
Status changes

Construction starts	AKKUYU-1	1114 MW(e), PWR, TURKEY	KURSK 2-1	1175 MW(e), PWR, RUSSIA	ROOPUR-2	1080 MW(e), PWR, BANGLADESH	SHIN-KORI-6	1340 MW(e), PWR, REP OF KOREA
	HINKLEY POINT C-1	1630 MW(e), PWR, UK						
New connections to the grid	HAIYANG-1	1126 MW(e), PWR, CHINA	ROSTOV-4	950 MW(e), PWR, RUSSIA	SANMEN-2	1157 MW(e), PWR, CHINA	TIANWAN-4	1060 MW(e), PWR, CHINA
	HAIYANG-2	1126 MW(e), PWR, CHINA	SANMEN-1	1157 MW(e), PWR, CHINA	TAISHAN-1	1660 MW(e), PWR, CHINA	YANGJIANG-5	1021 MW(e), PWR, CHINA
	LENINGRAD 2-1	1101 MW(e), PWR, RUSSIA						
Permanent shutdowns	CHINSHAN-1	604 MW(e), BWR, TAIWAN, CHINA	LENINGRAD-1	925 MW(e), LWGR, RUSSIA	OHI-2	1120 MW(e), PWR, JAPAN	OYSTER CREEK	619 MW(e), BWR, USA
	IKATA-2	538 MW(e), PWR, JAPAN	OHI-1	1120 MW(e), PWR, JAPAN	ONAGAWA-1	498 MW(e), BWR, JAPAN		

Regional statistics



Country statistics



Taiwan, China: 5 reactors, 4 448 MW(e) in operation; 2 reactors, 2 600 MW(e) under construction; 26.7 TWh electricity supplied, 11.4% nuclear share.

Data are as reported – 30 June 2019



Power Reactor Information System
PRIS