



Catx2
17 часов назад

РБМК: enfant terrible

🕒 29 мин 👁 9.3К

Научно-популярное, Энергия и элементы питания, Физика

Тени Чернобыля пали на всю советскую ядерную энергетику в принципе. После аварии внезапно выяснилось, что укрощение мирного атома не так просто, как кажется.

Под угрозу была поставлена репутация ведущих инженеров-конструкторов и физиков-ядерщиков СССР. Их руками была создана реакторная установка РБМК-1000, которая должна была стать проводником советского государства в светлое атомное будущее. Но случилось совсем наоборот. И по каким причинам так вышло, стоит разобраться.

Об создателях реактора, истории его создания, преимуществах и недостатках установки будет сегодняшний лонг. Я попытался объяснить простыми словами процессы, произошедшие в реакторе ночью рокового дня, не отвлекаясь на прочие факторы аварии.

Начало

Женева, 1955 г. Страны-лидеры научно-технического прогресса отправили цвет своей науки на I Международную конференцию по мирному использованию ядерной энергии. За 12 дней 1260 делегатов и 800 наблюдателей, в совокупности представлявшие 73 страны, прослушали и обсудили 1067 докладов.

Дворец Наций, Женева. Там расположено отделение ООН, в котором и проходила Конференция

Советская сторона, отправившая 300 представителей в отдельных делегациях СССР, УССР и БССР, представила на выставке радиотехнических достижений «блестящую коллекцию машин для производства электроэнергии, лечения рака, контроля за прокатом стали и даже подсчёта пивных бутылок». Советские радионуклидные дефектоскопы, маркировщики, счётчики вместе с обычными дозиметрами привлекли внимание других гостей конференции.

Но триумфом советской делегации стал доклад **Дмитрия Ивановича Блохинцева**, директора Лаборатории «В» (будущего Физико-энергетического института, ФЭИ) о последнем достижении своей страны — реакторе АМ Первой АЭС в городе Обнинск.

Среди участников конференции распускались слухи, что доклад о советской АЭС чисто пропагандистский и ничего по существу дела советские ученые не сообщат. На самом же деле он был строго научно-техническим, основанным на точных фактах и очень осторожным в смысле прогнозов и обещаний на будущее. Тем не менее, доклад произвел огромное впечатление на тысячную аудиторию.

... Несмотря на запрещение правилами конференции аплодисментов, окончание доклада об АЭС было встречено бурной овацией.

Д. И. Блохинцев. *Первая атомная. Статья в журнале «Вопросы истории» за 1974 г.*

В число прогнозов входил и анализ перспективной электростанции на 100 МВт. Из обзора экономических характеристик энергоблока с 2-мя реакторами явно видно, что атомная станция превосходит тепловую по практически всем экономическим характеристикам, кроме стоимости одного киловатт-часа — она была высокая за счёт дешёвого ядерного топлива.

На сегодняшний день такой анализ кажется странным, ведь при перечислении систем управления,

защиты и безопасности, а также оглашения стоимости необходимых на них материалов, для современных установок у неподготовленного человека начнёт дёргаться глаз.

Но на заре атомной энергетики к реакторам применялись **общепромышленные нормы безопасности**, так как возможность ядерной аварии была очевидна далеко не для всех. В те времена не было накоплено опыта анализа возникновения и ликвидации инцидентов в силу их малочисленности.

Вернёмся пока в конец 1950-х годов:

Атомная электростанция уже сейчас более экономична по сравнению с угольной станцией, находящейся далеко от района добычи угля или работающей на низкосортном топливе. Это открывает перспективу использования атомных электростанций для удовлетворения возрастающих потребностей в электроэнергии как промышленности, так и сельского хозяйства.

Д. И. Блохинцев. *Первая атомная электростанция СССР и пути развития атомной энергетики*

Это было высказанное всему миру официальное мнение советского Министерства среднего машиностроения (именно так назывался главный управляющий орган советской ядерной отрасли). Оно начало претворяться в жизнь: ещё в середине-конце 1954 г., вскоре после ввода в эксплуатацию Первой АЭС, были запущены работы по созданию нескольких типов реакторов сразу:

- к 1956 году ЛИПАН, ставшая как раз Институтом атомной энергии (получившим после смерти своего директора **Игоря Васильевича Курчатова** его имя. Сейчас это **Курчатовский институт**, г. Москва) подготовила несколько технических заданий на **водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР)**. В отличие от АМ, в нём не было графитового *замедлителя*: его роль играл водяной *теплоноситель*. Впоследствии, к концу 1960-х годов, были введены в эксплуатацию реакторы ВВЭР-2 (он же ВВЭР-70, АЭС Райнсберг, ГДР), ВВЭР-1 (он же ВВЭР-210) и ВВЭР-365 (он же ВВЭР-3М, оба — Нововоронежская АЭС), ставшие родоначальниками новой ветки развития атомной техники;

АЭС Райнсберг, Германия. Первая атомная станция в ГДР. В настоящий момент выведена из эксплуатации

- важным направлением работ было строительство реакторов-наработчиков оружейного плутония. Ещё до пуска Первой АЭС были введены в строй реакторы А (Челябинск-25, ныне Озёрск) и И-1 (Томск-7, сегодня Северск). Но успех эксплуатации реактора АМ Первой (Обнинской) атомной станции привёл к желанию совместить получение новых изотопов и выработку электроэнергии, что было сделано на установках ЭИ-2 и АДЭ-4 (оба в Северске). Генеральным конструктором реактора был НИИ-8, выделенный в 1953 г. из известного вам по прошлой части НИИХиммаша,

На данный момент реакторы-наработчики плутония выведены из эксплуатации

- а развитием успешного реактора АМ стали энергетические установки нового уровня: реакторы АМБ-100 и АМБ-200 Белоярской АЭС. В них происходило не только кипение водяного теплоносителя, но и перегрев получившегося пара. Каждый из реакторов АМБ (то есть Атом Мирный Большой) вырабатывал более 100 МВт электроэнергии.

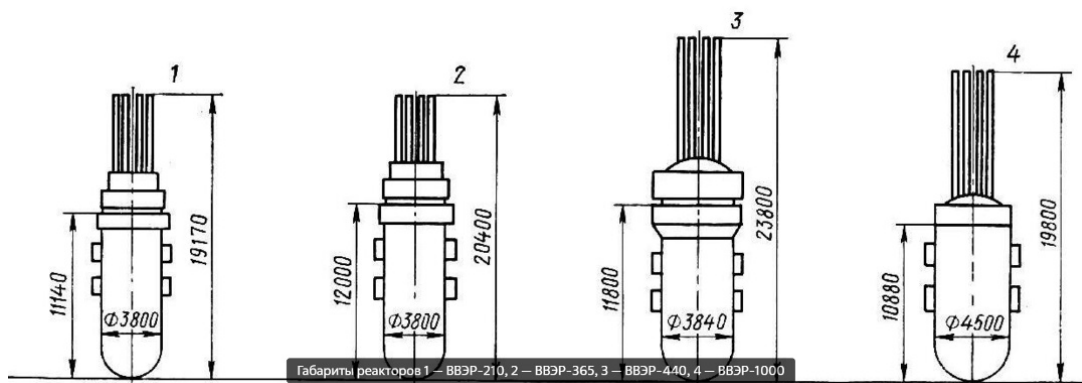


Первые три блока Белоярской АЭС. Слева находится здание с обоими реакторами АМБ, а справа — 3-й энергоблок с уникальным быстрым натриевым реактором БН-600. Если АМБ вывели из эксплуатации, то БН работает до сих пор

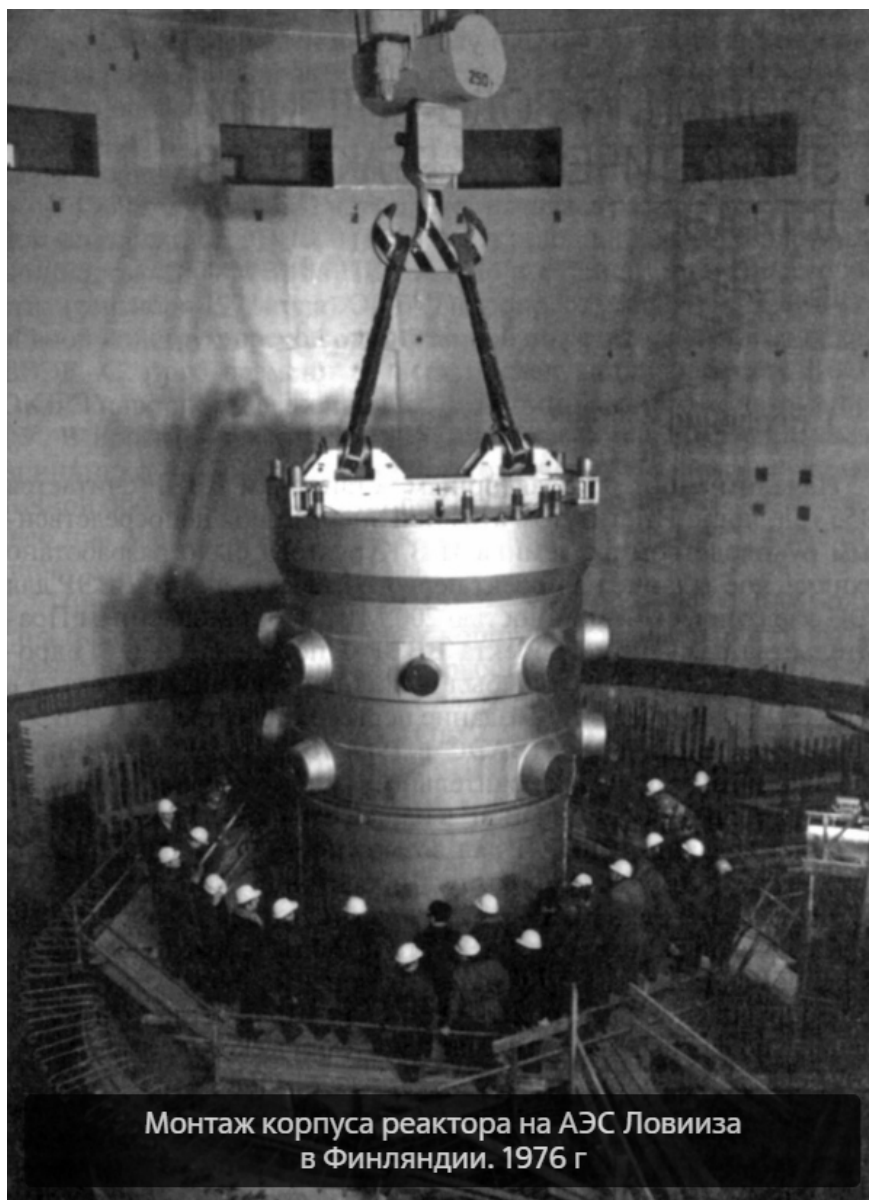
Реакторов действительно стали строить много. Но при этом директивами XX Съезда КПСС и постановлением Совета министров СССР в от 16 марта 1956 года установки планировалось ввести в строй за пятилетку — к 1960 году — когда как в реальности опоздали более, чем на пять лет, и выдали реакторы с мощностью меньше желаемой (первый АМБ-100 не дотягивал до требуемых 200 МВт). А от части станций, например Уральской АЭС с 2-мя 200-МВт газоохлаждаемыми реакторами с тяжеловодным замедлителем (!), Ленинградской и Ховринской (на территории Москвы!) отказались вообще. Госплан в 1959 году вообще хотел урезать Белоярскую АЭС до одного АМБ и зарубить Нововоронежскую АЭС на корню, но министерство среднего машиностроения и академик Курчатов лично свои планы отстаивали.

Причины задержки ввода в эксплуатацию новых атомных станций были прозаичны: возможности промышленности. Качество выполнения технологических операций изготовления оборудования реакторов не позволяло выполнить все хотелки генерального конструктора, вследствие чего планируемые уровни мощности приходилось урезать.

Как это было связано? Вот смотрите, большой размер корпуса позволяет вместить больше топлива, а утолщение стенок корпуса даёт возможность выдержать большее давление теплоносителя. Последнее необходимо для увеличения подогрева воды так, чтобы она не закипала. Такие меры необходимы для снятия с топлива увеличившейся мощности. Но чтобы раздуть внешний диаметр корпуса с 3,8 до 4,5 м надо было, чтобы Ижорский завод научился делать стальные слитки массой не 290, а 420 т. И на освоение промышленностью такой возможности потребовалось десятилетие — ВВЭР-365 запустили в 1971 году, а ВВЭР-1000 лишь в 1980 году.



Сравнение габаритов ранних ВВЭР



Вид корпуса ВВЭР-440

А стране электричество нужно было здесь и сейчас. В 1970 году установленная мощность всех электростанций СССР составляла 105 000 МВт. При этом в стране чувствовался дефицит электроэнергии в 25-30%. Закрыть его можно было массовым вводом в строй единичных крупных мощностей. Альтернативой АЭС в этом плане были ГЭС. Они давали электричество по цене за кВт в 2-3 раза меньше, но были и подводные камни (буквально):

- значительную часть пригодных для ГЭС крупных рек уже заняли;
- ГЭС сильно бьют по экологии: каскад плотин на Волге уменьшил скорость течения реки и

усилил её заболоченность, в водохранилище Братской ГЭС осталось много леса, который начал гнить, а Новосибирская ГЭС нанесла урон популяции осетра, которому было негде нереститься.

Но ГЭС могли делать то, что не позволяли сделать тогдашние АЭС — одновременно ввести в строй огромную мощность, десятки гигаватт. Так что для решения вопросов энергетики страны атомщикам необходимо было сделать качественный рывок вперёд.

Ленинград, 1965 г. Завод «Большевик». 12 января первый заместитель министра среднего машиностроения А. И. Чурин и академик **Анатолий Петрович Александров** поставили предприятию задачу разработать проект реактора с *электрической мощностью сразу 1000 МВт*, что кратно превышало выработку действующих реакторов.

Параллельно, и чуть раньше, в 1964 году, НИИ-8 (здесь и далее буду называть его современным наименованием — **Научно-исследовательский конструкторский институт энергетической техники, НИКИЭТ**) под руководством **Николая Антоновича Доллежала** начались инициативные работы по поиску технических решений для *водографитового канального реактора тепловой мощностью 4000 МВт*.

Советской науке и промышленности была поставлена новая нетривиальная задача.

Старт

В 1965 году оба проекта — ленинградский Б-190 и доллежалевский Э-7 — представили в Министерство среднего машиностроения. Комиссия во главе с министром Е.П. Славским рассматривала также вариант улучшения запущенного незадолго до этого ВВЭР-210.

Но помимо указанных выше причин (сложность технического исполнения многотонных сплошных стальных отливок и поковок без дефектов) удар по ВВЭР нанесла эксплуатационная авария — в 1965 году из-за вибрационных и тепловых нагрузок, вызванных обтекающим *активную зону* теплоносителем, отвалился прикреплённый снаружи активной зоны теплозащитный экран. Он перегородил тракт циркуляции теплоносителя, поэтому для предотвращения перегрева активной зоны реактор остановили. На восстановление работоспособности установки потребовалось два года. Впоследствии толщина стенок активной зоны была увеличена, и от теплозащитного экрана отказались вовсе.

Теперь дело оставалось за малым — доказать эффективность проекта Э-7. Его главный конструктор Доллежал привёл неоспоримые аргументы в пользу своего детища:

- *канальная схема* (то есть теплоноситель течёт по трубам — направляющим каналам — в графитовой кладке) позволяла отказаться от толстостенного корпуса, ведь давление воды держится трубами;
- направляющие каналы можно поодиночке отключать от контура циркуляции, что позволяет перегружать топливо в процессе работы реактора, когда как для перезагрузки ВВЭР необходимо останавливать реактор, разгерметизировать его и снимать крышку корпуса;
- отсутствие деталей корпуса позволяет привлекать к постройке реактора широкий круг предприятий, не связанных с атомной отраслью;
- конструкция *ТВС* (о ней ниже) позволяла закладывать вместо *твэлов* сырьевые нуклиды для наработки радиоактивных изотопов, применяющихся в радиотерапии.

Главный наш довод был такой. При сооружении канального уран-графитового реактора мы сможем использовать кооперативные связи между машиностроительными заводами, сложившиеся еще при изготовлении первых промышленных реакторов (наработчики плутония А, ЭИ-2 — А. Х.). И это позволит справиться с задачей за 5- 6 лет. Американцы же, как известно, тратят на строительство больших корпусных реакторов 8- 10 лет (своего опыта в таком строительстве у нас просто не было, корпусный реактор в

Нововоронежском (совр. город Нововоронеж — А. Х.) был небольшой мощности). А все, что касалось сроков, имело тогда большую актуальность: в стране сложилась трудная обстановка с энергоснабжением.

Н.А. Доллежалъ. У истоков рукотворного мира

Экономическая целесообразность нового реактора была поставлена во главу угла, что определило выбор в пользу водо-графитового реактора. Специальным постановлением Совмина СССР от 29 сентября 1966 года работам был дан старт. Участниками разработки стали:

- научный руководитель — Курчатовский институт, в лице **Савелия Моисеевича Фейнберга**;
- проектировщик станции — ГСПИ-11 (потом **ВНИПИЭТ**, сейчас Атомэнергопроект);
- главный конструктор реактора — **НИКИЭТ** (тогда НИИ-8) в лице **Доллежала**.

Новая установка получила название РБМК — реактор большой мощности канальный. На электрическую мощность в 1000 МВт указывал добавленный индекс 1000. Тепловая мощность установки составляла 3200 МВт, что давало КПД в 31% — вполне нормальное значение для ядерного реактора.

Конструкция РБМК-1000

Основу реактора составляли 2488 графитовых колонн сечением 250х250 мм. Это давало огромные размеры активной зоны: 11,8 м в диаметре и 7 м в высоту. В 1693 из них проделаны отверстия диаметром 114 мм для направляющих каналов. Остальные 795 колонн играли роль отражателя.

Плитный настил реактора РБМК-1000 на Ленинградской АЭС

Графитовую кладку окружает кожух реактора. Он герметизирует активную зону, в которую закачана смесь азота и гелия для предотвращения окисления графита.

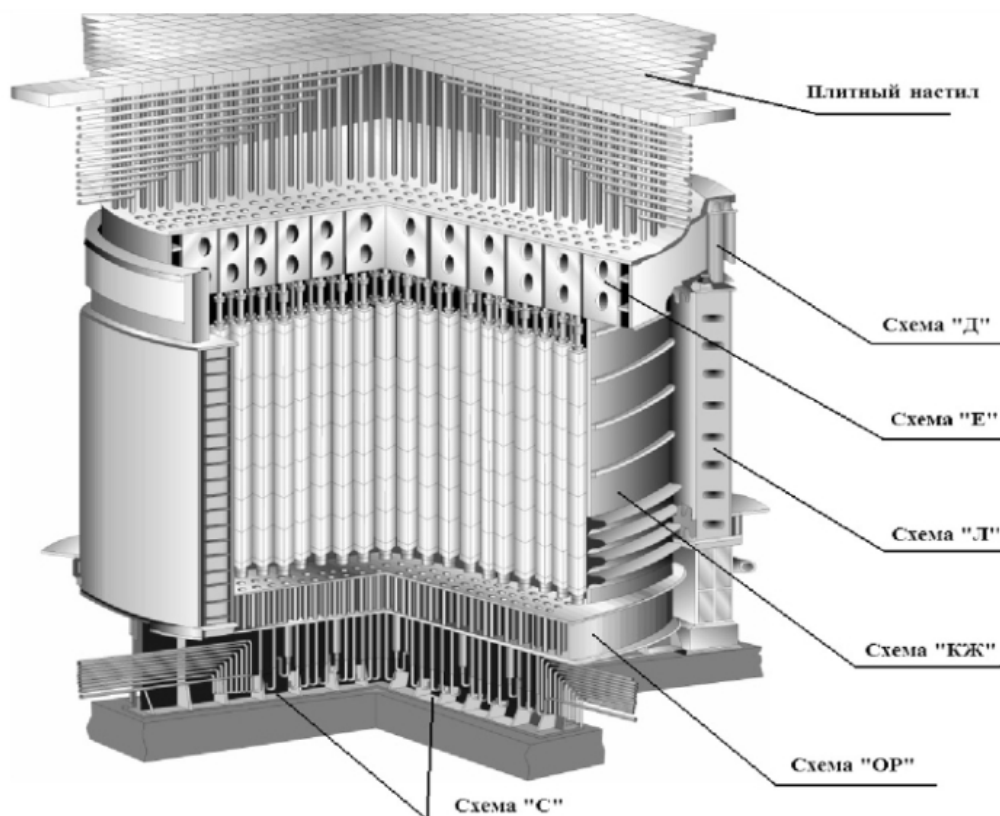


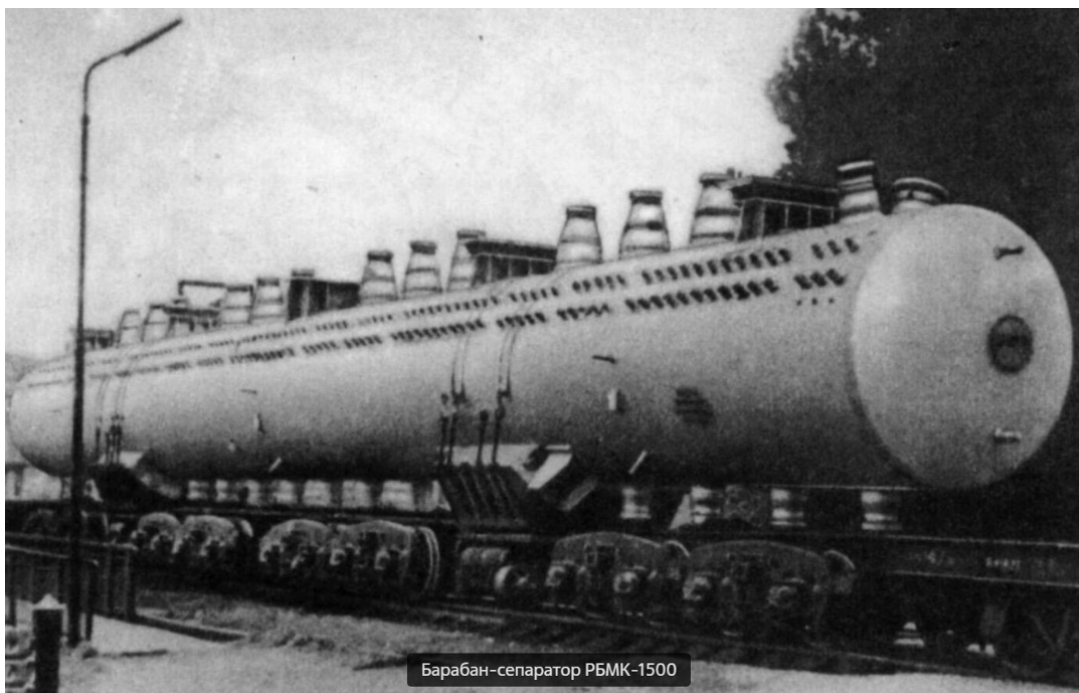
Схема «КЖ» — кожух. Его окружает схема «Л» — биологическая защита, состоящая из баков с водой

В направляющих каналах с ТВС — технологических каналах — подвешена сама тепловыделяющая кассета. Она состоит из двух топливных сборок, расположенных друг под другом. В каждой сборке находится 18 твэлов с циркониевой оболочкой, заполненной таблетками диоксидом урана с обогащением по делящемуся изотопу уран-235 1,8-2,0%. Это мало, если сравнить с ВВЭР-1000, у которого обогащение в пределах зоны меняется от 3,8 до 4,4%. Близкая мощность у обеих установок при разном обогащении достигается за счёт разных размеров активной зоны: низкое энерговыделение РБМК компенсируется большой загрузкой топлива.

Технологический канал РБМК

РБМК аналогично предшественникам — АМБ и реакторам-наработчикам — является **одноконтурным**. Его конструктора придерживались **кипящей схемы**. Выбор связано не только отработанной реализацией, но и удешевлением установки благодаря отказу от сложных парогенераторов с многими тысячами тонких трубок, а также недостатками сплава циркония, из которого были выполнены оболочки твэлов — металл плохо держал высокую температуру.

Кипящая схема РБМК заключается в выработке пара в активной зоне. Давление теплоносителя составляет 7 МПа, поэтому он начинает кипеть при 284 °С. Температура выхода теплоносителя из зоны незначительно превышает эту величину — как следствие тот представляет собой пароводяную смесь с паросодержанием в 14%. Она проходит через барабан-сепаратор, где пар и вода разделяются — пузырьки **барботируют** через толщу жидкости.



Барабан-сепаратор РБМК-1500

Не смотрите, что реактор другой, идея ровно такая же, просто оцените масштаб конструкции

Далее потоки разделяются, пар идёт на турбину, а вода — к **главным циркуляционным насосам (ГЦН)**, которые прокачивают её через активную зону. Пар же после турбины конденсируется и возвращается в барабан-сепаратор.

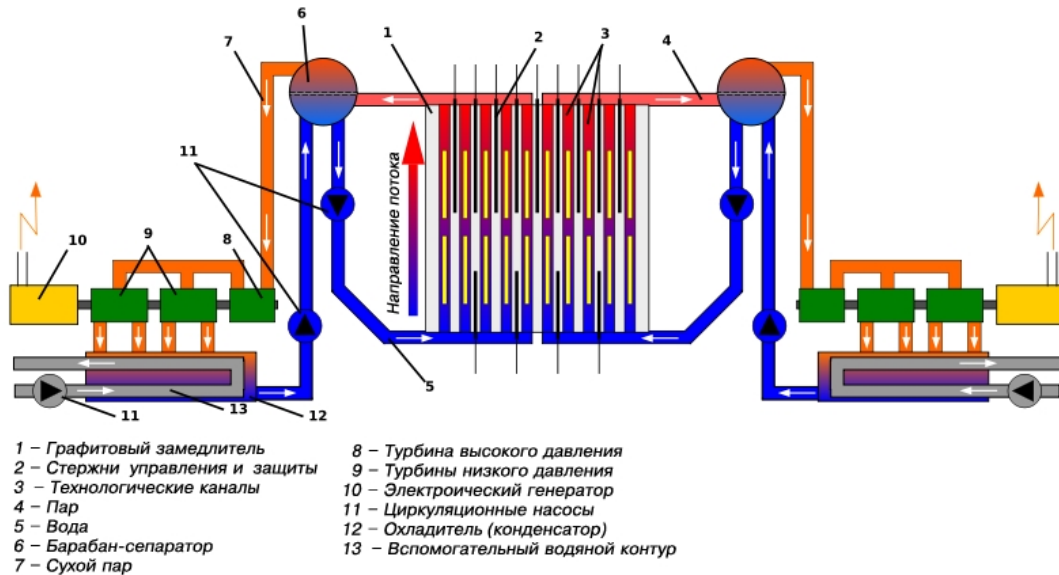


Схема звучит довольно просто и понятно — вода греется, частично превращается в пар, последний сепарируется и крутит турбину. Но дьявол скрывается в деталях.

Отступление I. Эффекты реактивности

Как известно (особенно если вы читали [мои предыдущие тексты](#)), тепло в реакторе выделяется за счёт ядерной реакции деления, вызываемой нейтронами, поглощёнными ядрами урана-235. Но есть некоторые загвоздки:

1. Нейтроны так или иначе поглощаются всем, что есть в активной зоне:

- *теплоносителем* (водой),
- конструкционными материалами,
- *продуктами деления* урана;

2. Деление это не единственная ядерная реакция нейтронов и вещества. Важную роль играет рассеивание, обеспечивающее *замедление* нейтронов. Оно обеспечивается

- графитовым *замедлителем* (если он в реакторе есть),
- и водой! В *водо-водяных* реакторах вода является **и теплоносителем, и замедлителем одновременно**.

3. Параметры взаимодействия нейтронов с веществом зависят от его температуры. Зависимость включает в себя три явления:

- во-первых, от температуры зависит скорость колебания ядер около положения равновесия. Чем она выше, тем сложнее нейтрону поглотиться в топливе — **мощностной эффект реактивности**,
- во-вторых, от температуры зависит плотность материала — и жидкого, и твёрдого. При повышении температуры вещество расширяется, плотность падает, поглощающая способность падает (см. пункт 1), мощность растёт. У замедлителя наоборот: замедляющая способность падает (см. пункт 2), нейтроны меньше реагируют с веществом, мощность падает — **температурный эффект реактивности**. Какой вклад в мощность — положительный или отрицательный — окажется сильнее, зависит от вещества (**и соотношения веществ в данном объёме!**). Но вне зависимости от знака изменения мощности оно влияет на самого себя. Это называется **обратная связь**;
- в-третьих, вода в РБМК частично превращается в пар. Это снижает плотность воды (см. пункт 3b), поэтому при кипении реактор разгоняется — **паровой (пустотный) эффект реактивности**.

4. АЭС не ТЭЦ, на ней нельзя просто включить форсунку, чтобы процесс пошёл. Если масса топлива в реакторе меньше критической, то ядерная реакция просто не пойдёт. Таким образом, загрузка активной зоны должна быть избыточной, а лишние нейтроны должны подавляться стержнями-поглотителями.

Коэффициенты реактивности показывают зависимость скорости приращения мощности при увеличении температуры на один градус. Обратите внимание, что $\alpha_{\text{ф}}$ — паровой (пустотный) коэффициент и $\alpha_{\text{ив}}$ — по температуре воды, **положительные**. Также из-за наличия у воды способности замедлителя, эффект от графита **положительный** — реактор *может разогнаться* при повышении температуры

Обратим внимание на последний пункт: **загрузка топлива всегда избыточная**. Она рассчитана на:

- компенсацию *теплового и мощностного эффектов реактивности*;
- компенсацию выгорания;
- компенсацию продуктов деления урана, являющихся сильными поглотителями нейтронов — ксенона-135 и самария-149. Их накопление называется **отравлением реактора**;
- наличие некоторого запаса на повышение или понижение мощности — **оперативного запаса реактивности**. На РБМК он измеряется в количестве стержней, которые этот запас компенсируют.

Инструкции для персонала запрещают работу при низком *оперативном запасе*, так как условия в реакторе могут сложиться так, что внезапно проявится какой-нибудь эффект из указанных выше, а *веса стержней* не хватит, чтобы его компенсировать.

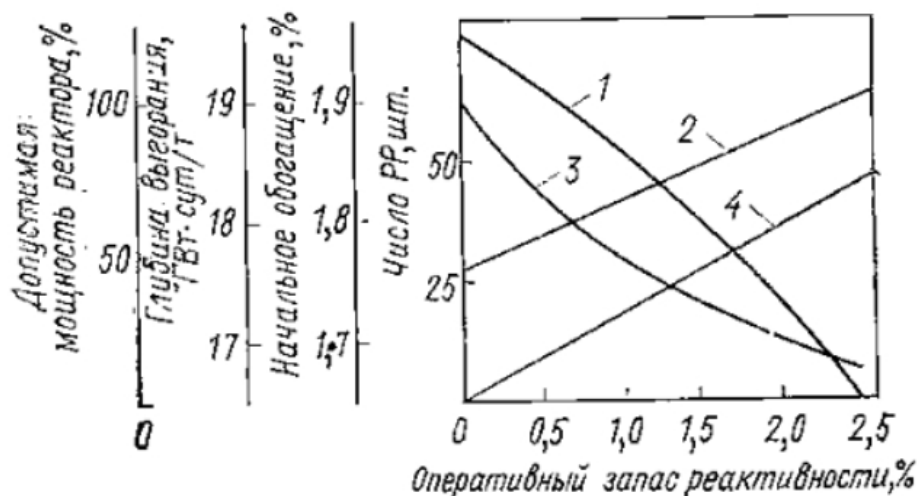


Рис. 2.5. Зависимость характеристик реактора от оперативного запаса реактивности:

1 — глубина выгорания при начальном обогащении 1,8%;
 2 — начальное обогащение при выгорании 18,5 ГВт·сут/т;
 3 — допустимая мощность; 4 — число стержней РР, введенных в активную зону

Как видите, вес стержней (то есть подавляемая ими избыточная реактивность) меняется от множества параметров. Как видите, с ростом выгорания ОЗР падает

К слову о птичках,

Регулирование и защита реактора

Реактор регулируется системой управления и защиты (СУЗ), состоящей из стержней-поглотителей

нейтронов. СУЗ позволяет:

- регулировать мощность вручную или автоматически;
- заглушить реактор при аварийной ситуации;
- подавлять *запас реактивности* (см. выше).

Стержни СУЗ находятся в 211 специально выделенных для этого каналах, через которые также прокачивается вода. Она там необходима, так как поглотитель из борированной стали при реакциях с нейтронами нагревается.

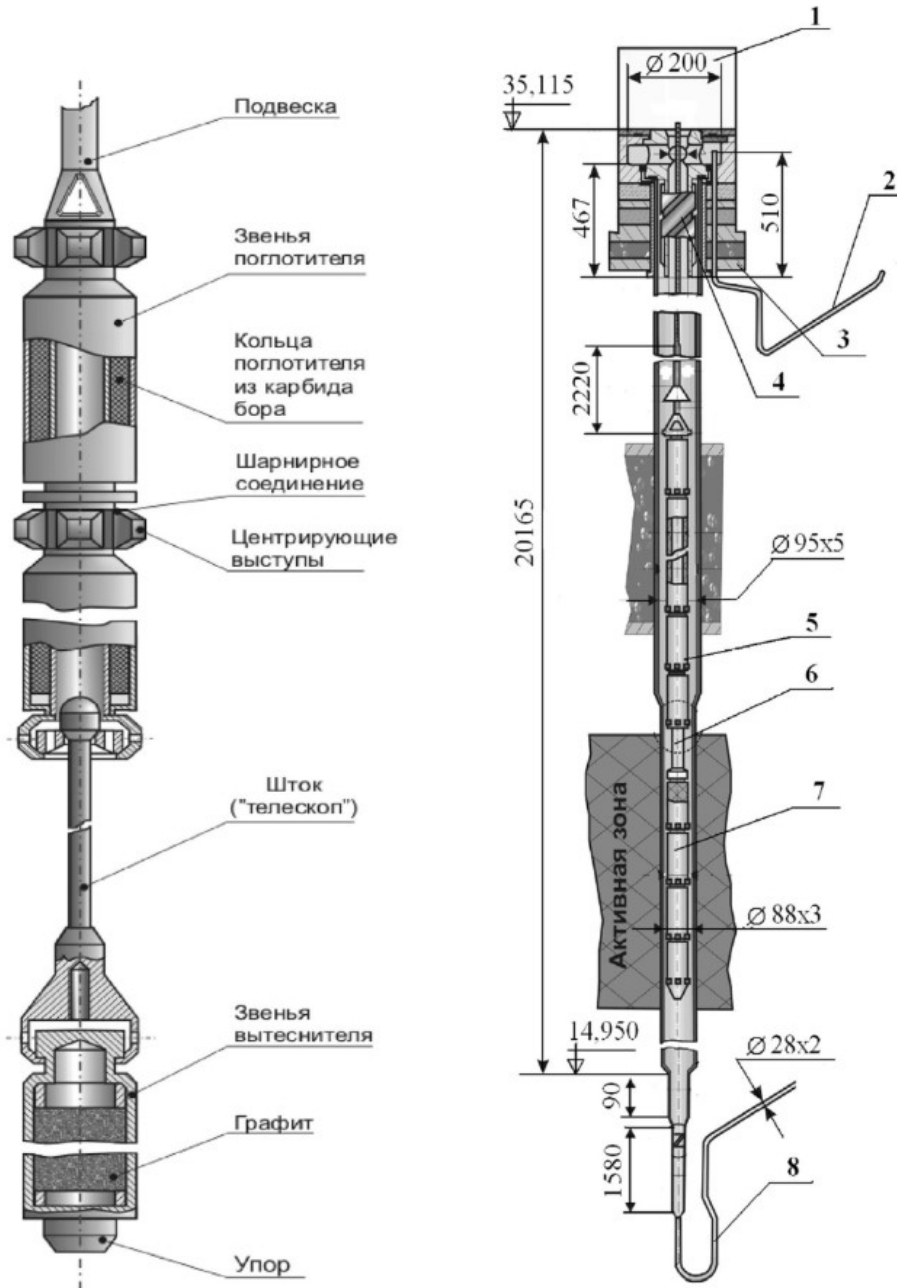


Рис. 3.1. Конструкция и расположение стержня РР канале СУЗ:
1 – сервопривод; 2 – напорный трубопровод; 3 – головка канала; 4 – защитная пробка; 5 – поглощающий стержень; 6 – телескопическая штанга вытеснителя; 7 – вытеснитель; 8 – сливной трубопровод

Под поглотителем стержней СУЗ на телескопической штанге прикреплен графитовый вытеснитель. Необходимость его применения связана с фундаментальной особенностью нейтронной физики реактора РБМК.

Отступление II. Обратные связи в РБМК

Необходимо понимать, что, несмотря на наличие графитового замедлителя нейтронов, вода является *замедлителем* тоже. Но **вода** также неплохо так **поглощает нейтроны**, и делает это сильнее, чем графит. И, раз на фоне графита *замедляющая* способность воды плохая, то на первый план выходит *поглощающая*. Таким образом, если воды в активной зоне прибавляется, то мощность падает — нейтронов становится меньше. И наоборот, **при потере воды в активной зоне реактор разгоняется**. Запомните этот факт.

Как вода может пропасть из контура циркуляции?

- банально вытечь — если трубопровод разорвало;
- выкипеть — если расхода воды недостаточно, она выкипает быстрее, чем прибывает.

А раз повышении мощности вода кипит быстрее, её плотность падает (так как появляются пузырьки пара), поглощающая способность падает, рост мощности ускоряется! Это и есть **положительная обратная связь по мощности**. А причина ей называется **пустотный эффект реактивности**.

Но есть ещё и третий момент: при извлечении стержня-поглотителя из активной зоны его место в канале занимает вода. Соотношение поглощающих способностей воды и борированной стали поглотителя СУЗ в РБМК таково, **что при подъёме стержня мощность упадёт, а не вырастет**. Поэтому воде не дают занять объём поглотителя, вводя вместо него вытеснитель.

Но есть нюанс: между поглотителем и вытеснителем есть водяной слой толщиной 1,25-2 м (размер меняется из-за закрепления на телескопической штанге. А жёсткую поставить нельзя, так как при неравномерном нагреве и давлении стержень может погнуться, и тогда его заклинит).

Таким образом, при вводе стержня в активную зону слой воды под вытеснителем заменяется графитом, что локально увеличивает мощность. И при определённом сочетании условий — концентрация пара, плотность воды, температуры материалов, отравление реактора — это увеличение на несколько секунд может перебить отрицательный эффект от стержня-поглотителя. Такое явление называется **концевой эффект реактивности**.

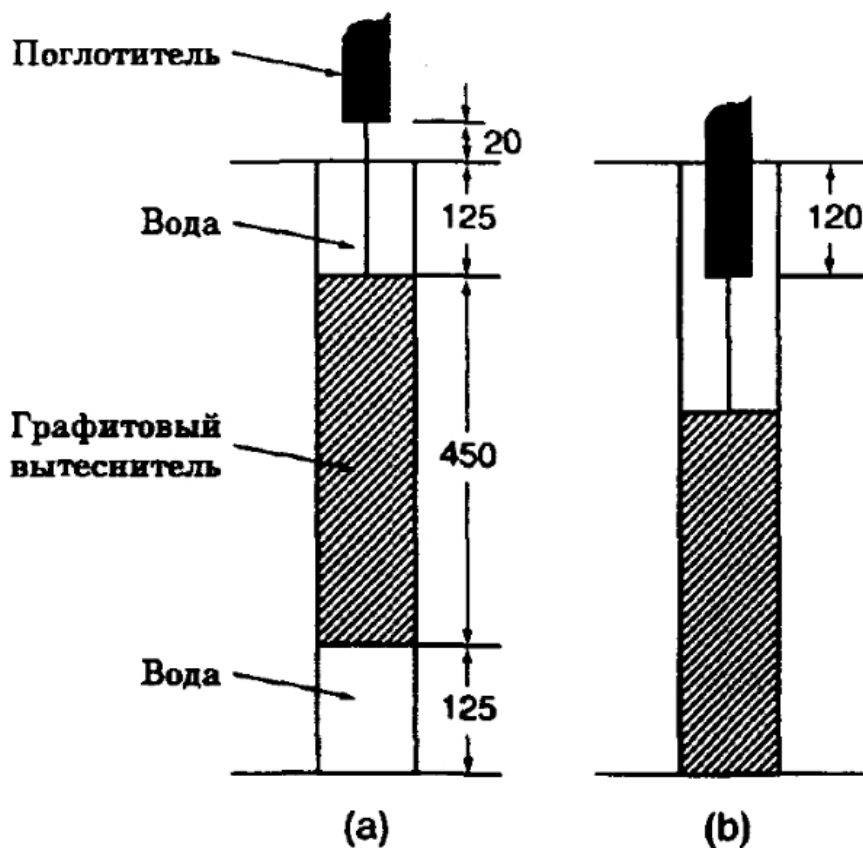


Схема расположения вытеснителя в активной зоне в (а) до-чернобыльской серии РБМК-1000, (б) пост-чернобыльской модернизации реакторов

Такой исход событий не был учтен на стадии конструирования реактора. Ведь, даже несмотря на применение ЭВМ при расчёте нейтронной физики, точность расчётов необходимо было проверять. А проверить можно было только на действующей установке.

Сама возможность появления *положительных обратных связей* была запрограммирована типом реактора РБМК, где необходимо было учесть вклад и графита, и воды, и борного поглотителя, неравномерно распределённых по площади активной зоны, с неравномерными характеристиками веществ по объёму реактора, который был достаточно огромен, чтобы в нём могли появляться области локального повышения мощности!

ВВЭР в этом плане проще, у него водный теплоноситель является замедлителем, что обеспечивает гарантированную *отрицательную обратную связь по мощности* благодаря *отрицательному эффекту реактивности по плотности воды*: рост энерговыделения замедляется со временем, что приводит реактор в устойчивое равновесие. Высокая стабильность ВВЭР и стала основной причиной отказа от РБМК после Чернобыля.

Но в начале 1970-х годов желание решения задачи государственной важности затмило понимание необходимости более подробного обоснования безопасности. РБМК за 10-летний период работы до Чернобыля показал наличие как **положительных обратных связей** с связи с **пустотным эффектом** и **концевым эффектом**, так и других недостатков. Но меры противодействия оказались недостаточны, так как могли сорвать готовность реактора к вводу в строй.

Ввод в эксплуатацию

Запущенные в 1966 году работы продвигались форсированно. Как и при создании Первой (Обнинской) АЭС, одновременно проектировались и реактор, и станция в целом. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы планировалось завершить во II квартале 1967 года.

Объём работ был колоссальным: реактор обсчитывался на самой производительной в Европе ЭВМ БЭСМ-6. Его гидравлические характеристики (давление воды, её расход, сопротивление при течении) проверялись на стенде, который повторял собой технологический канал активной зоны. Расположение всех узлов и систем РБМК-1000 проверялось на масштабном макете.

Такие задачи уже неоднократно решались конструкторами, так что реальное продвижение процесса конструирования в целом придерживалось графика: за 1968-1969 года НИКИЭТ подготовил всю документацию по реактору.



Главную станцию решили строить на давно планировавшейся площадке на берегу Финского залива в 100 км от Ленинграда, рядом с посёлком Сосновый Бор (сейчас город при АЭС). В 1967 году начась подготовка под строительство станции, а через четыре года начался монтаж реактора. Дело продвигалось непросто, ведь предстояло сложить 28 тыс. графитовых блоков, сварить 1,5 тыс. трубок подвода теплоносителя от контура к направляющим каналам и закрепить многометровые металлоконструкции, при этом проверив каждый сварной шов!

Монтажные работы шли тяжело: графитовые колонны падали, металлоконструкции, технология которых не была достаточно отработана изготовителями, коробились и отбраковывались; а проверять качество многометровых трубок оказалось просто нечем. Из положения выходили разными способами — продували трубки паром, простукивали их и даже использовали медицинский фонендоскоп.

Все эти проблемы затягивали готовность реактора, и вместо 1972 года он был достроен лишь летом 1973 года. Но после этого процесс был уже отработан: 10 сентября прошла приёмка, 12 сентября была запущена ядерная реакция, а к 14 ноября загрузка была окончательно завершена, и первый РБМК вывели на минимально контролируемый уровень мощности.

А 21 декабря 1973 года, в канун Дня энергетика, Ленинградская АЭС была подключена к электросети.



Эксплуатация

После успешного ввода в строй головного энергоблока РБМК-1000 вошёл в стадию массового тиражирования. Хотя не получалось вводить в строй по два энергоблока в год, как желали в Минсредмаше, темпы ввода РБМК в строй всё равно были высоки. При этом конструктор получал *положительную обратную связь* (от эксплуатирующей организации, не по мощности!) и модернизировал установку. Таким образом в каждом поколении реализовывались реакторы с определёнными улучшениями:

1. 1973-1979: первые два блока Ленинградской АЭС, 1-я очередь Курской АЭС, 1-я очередь Чернобыльской АЭС. Были доработаны алгоритмы работы СУЗ и АЗ и улучшены требования по безопасности при эксплуатации;
2. 1979-1986: 2-я очередь ЛАЭС, 2-я очередь КАЭС, 2-я очередь ЧАЭС, три блока Смоленской АЭС. Были введены система аварийного расхолаживания реактора (САОР), представляющая собой баки с водой, которая при сигнале падения давления теплоносителя (что говорило о течи) заливалась в контур, охлаждая активную зону и препятствуя её расплавлению; и система локализации аварии, которая улавливала вышедшие из контура с протёкшим теплоносителем радиоактивные продукты деления.

10-летняя эксплуатация РБМК подтвердила высокие экономические показатели этого типа реакторов. Что же с ними получалось:

- затраты природного урана на единицу энерговыработки были на 25% ниже, чем у ВВЭР;
- *выгорание* ядерного топлива было глубже вследствие меньшего по сравнению с ВВЭР поглощения нейтронов. Оно позволяло расходовать топливо экономичнее;
- возможность регулирования каждого технологического канала обеспечивала высокую ремонтпригодность;
- большой объём графита долго остывал, что облегчало маневрирование мощностью из-за инертности *эффектов реактивности*;
- и так далее.

Но также в процессе эксплуатации были выявлены серьёзные недостатки установки по части конструкции и эксплуатации.

Звоночки

Все блоки кроме 1-й очереди ЛАЭС, эксплуатировались Министерством энергетики СССР, что подразумевало необходимость в большем числе систем безопасности вследствие того, что работники реакторного зала не были работниками атомной отрасли. То, насколько это было важно, показывает авария на 1-м блоке ЛАЭС 30 ноября 1975 года.



Этой ночью планировался вывод на ремонт одной из двух турбин реакторной установки. Но вместо отключения разгруженной от пара турбины старший инженер управления турбиной по неизвестной причине отключил рабочую, из-за чего сработала АЗ.

Персонал пункта управления решил повесить мощность обратно, забыв про *отравление реактора*.

Отступление III. Йодная яма

Если на стабильном уровне мощности отравляющий продукт деления-поглотитель нейтронов ксенон-135 выгорает (от нейтронной мощности) и распадается (независимо от нейтронной мощности) в таком же темпе, что и прибывает (от бета-распада йода-135), то при заглушении реактора ксенон выгорать перестаёт. Его концентрация зависит теперь только от соотношения скорости собственного бета-распада со скоростью распада материнского изотопа йода-135.

И в первые часы от заглушения реактора ксенон-135 распадается медленнее, чем распадается йод-135 (рождая ксенон), в результате чего ксенон-135 съедает мощность. И если не подождать, когда уровень йода и ксенона стабилизируется, то скачок мощности при её повышении вследствие ускоренного распада ксенона-135 будет очень неприятным сюрпризом для оперативного персонала...

По вертикальной оси — высвобождаемая *реактивность* (читай: мощность)

Так что исход действий персонала на ЛАЭС был немного предсказуем:

- удивившись медленным ростом мощности (из-за отравления) персонал стал вытаскивать стержни ручного регулирования, **уменьшая оперативный запас**;
- веса оставшихся в зоне стержней не хватило, чтобы перекрыть скачок мощности;

- сработала АЗ.

Старший инженер управления реактором М.П. Карраск, в прошлом работавший на Сибирской АЭС в Северске, где тогда стояли реакторы-наработчики, сделал правильное действие. Он решил снизить мощность, **подождать, чтоб не было скачка мощности из-за резкого изменения концентрации ксенона-135**, и лишь затем заглушить реактор. И после команды на глушение реактора произошло нехорошее:

- при высоком отравлении зоны сработали поглощающие свойства теплоносителя, так что при движении стержней проявился **концевой эффект**. Мощность на части тех. канала скакнула, вода там закипела, теплообмен нарушился, температура тех. канала подскочила, его стенка расплавилась, вода начала выливаться во внутрореакторное пространство между блоками графита.

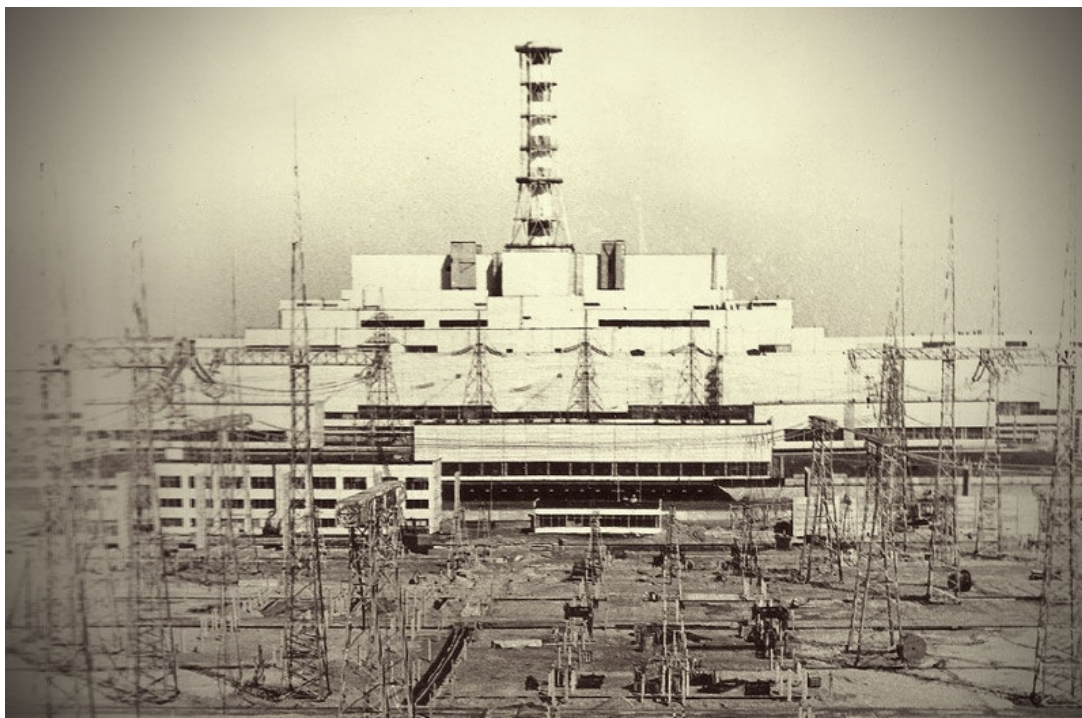
Сразу появились сигналы нарушения целостности нескольких десятков технологических каналов, содержимое которых, щедро сдобренное топливом из расплавившихся твэлов (в нормальном состоянии топлива в теплоносителе нет!), из внутрореакторного пространства вылилось в Финский залив.

Таким образом:

1. Концевой эффект проявился, но его не заметили, посчитав причиной протечки заводской брак трубы тех. канала;
2. Из-за долгого нахождения на низком уровне мощности температуры топлива и воды были ниже номинальных, из-за чего повреждения оказались невелики;
3. Персонал совершил ошибку, но смог нивелировать последствия.
4. Были сделаны выводы, результатом которых стало увеличение минимального количества стержней СУЗ в зоне, чтобы ОЗР хватило на преодоление йодной ямы.

С учётом послезнания невозможно не сказать, что это был именно первый звонок, ибо на ЛАЭС проявились те же самые проблемы, что и в Чернобыле. Но тогда вследствие действий персонала можно считать, что легко отделались.

Чернобыль



Здание 3-го и 4-го блоков до взрыва

4-й блок ЧАЭС решено было остановить для планово-предупредительного ремонта. Чтоб два раза не вставать, на реакторной установке решили провести испытания турбогенератора в режиме выбега с нагрузкой собственных нужд. Предполагалось, что при полном отключении энергии в результате чрезвычайной ситуации блок будет заглушен, но турбина продолжит крутиться по инерции (то есть совершит выбег), в течение нескольких минут вырабатывая ток для приборов контроля мощности и СУЗ.

Эксперимент хотели провести днём 25 апреля 1986 года. Но диспетчер энергосети не разрешил глушить реактор, в результате чего 4-й энергоблок проработал на мощности в половину номинальной весь день. Выдержка на низком уровне мощности усилила выход ксенона-135 (см. выше), что ставило для реактора риск попасть в йодную яму.

К ночи на 26 апреля 1986 года мощность реактора была снижена до 22% от номинальной тепловой. На этом уровне мощности и планировалось проводить испытания. Вследствие того, что давление теплоносителя в активной зоне было ниже номинального, была отключена САОР, что являлось **серьёзным недостатком программы испытаний** — в случае чрезвычайной ситуации зона могла поплавиться.

В 00 ч 28 мин при переключении с автоматического режима управления на ручной мощность рухнула до 30 МВт (0,9% от номинала). Персонал, не представлявший угрозу от *йодной ямы*, стал выдвигать стержни-поглотители, чтобы повысить мощность, уменьшая таким образом *оперативный запас реактивности* и приводя реактор в такое состояние, в котором он работать не был должен — поскольку именно при низком ОЗР хорошо проявлялся **концевой эффект**.

К часу ночи мощность была поднята до 6% от номинала. На этом этапе можно было избежать катастрофы, заглушив реактор для избегания йодной ямы. Но от проведения эксперимента отказываться не стали, опасаясь взыскания за срыв плана испытаний.

В 01:03-01:07 для повышения нагрузки потребителей электричества на генератор выбегающей турбины и для удержания уровня воды в барабанах-сепараторах (пара стало меньше, а воды больше, объём барабана стал неудержимо ей заполняться) к 3-м имеющимся ГЦН был подключён 4-й запасной. Это увеличивало расход воды через активную зону. Из-за этого уменьшался её подогрев, так что выработка пара упала. Тогда холодной *питательной воды*, в которую конденсировался пар, прошедший через турбину, стало меньше. Таким образом, при повышении расхода воды в контуре, ГЦН стали гонять воду вхолостую так, что она безостановочно

нагревалась и не разбавлялась холодной. И в случае соответствия давления в контуре давлению насыщенного пара при температуре воды та бы мгновенно закипела прямо в трубах контура.

Персонал этого даже представить себе не мог, но

в тот момент могла сработать АЗ по падению давления пара в турбине. Но, поскольку экспериментом планировалась работа на низких мощностях, её отключили.

В 01:22:30 оператор на распечатке программы быстрой оценки запаса реактивности увидел, что ОЗР составил значение, требующее немедленной остановки реактора. Это также было проигнорировано, реактор продолжал падать в йодную яму.

01:23:04 — установка стабилизировалась, и оператор прекратил подачу пара на турбину. Испытания начались.

И тут произошло страшное:

- пар, который должен был пойти на турбину, пошёл в контур;
- из-за **пустотного эффекта** мощность подросла;
- выросла температура воды и приблизилась к температуре кипения при давлении контура;
- мощность стала разгоняться.

01:23:40 — была дана команда АЗ, по условиям эксперимента реактор заглушили. И тут в дело вступил концевой эффект, проявившийся в полной мере:

- мощность ещё скаканула;
- вода внизу активной зоны закипела;
- из-за слоя пара на твэлах их температура выросла;
- началась реакция водяного пара с циркониевой оболочкой, выделилось ещё тепло и стал появляться водород;

Сочетание высокой температуры топлива из-за нарушения теплоотвода (из-за пара и водорода), наличия большого количества пара, закупорившего контур, и смешанного с паром водорода привели:

1. К нарушению циркуляции (описывается очевидцами как шум и скрежет в контуре);
2. Затем твэлы расплавились;
3. Расплавленное топливо соприкоснулось с паром, тот мгновенно расширился. Очевидцы описывали это как первый взрыв;
4. Из разорванных труб во внутрореакторное пространство потекли расплавленное топливо, горячая вода, пар, водород;
5. Из-за продолжающегося тепловыделения водород взорвался.



После случившегося финала стоит обратиться к причинам произошедшего:

- недостаточное обоснование безопасности реактора РБМК-1000. Значения *эффектов реактивности* были рассчитаны не на все значения выгорания топлива. А для мощностей ниже 50% номинала расчёты просто отсутствовали. Это допустило возможность проявления положительного пустотного эффекта при условиях работы 4-го энергоблока;
- недостаточность системы контроля и информирования персонала, которая давала задержки в показаниях при сложившихся условиях работы;
- грубая ошибка проекта — положительный концевой эффект реактивности стержней СУЗ;
- конструктор (НИКИЭТ, Минсредмаш) не довёл до сведения эксплуатирующей организации (Минэнерго) риски работы РБМК на низких мощностях. Это незнание и повлекло решение проводить эксперимент после работы на низком уровне мощности, и отключение автоматики АЗ, которая могла заглушить РБМК в любой момент пути к аварии.

Указанные выше факторы были названы в отчёте МАГАТЭ проявлениями **низкой культуры безопасности** — как на уровне разработчика, так и на уровне эксплуатирующей организации. Осознание опасности ядерной энергетики и ответственного подхода и её реализации стало главным уроком Чернобыля.

Последствия и перспективы

Если убрать из рассмотрения социальные, политические и психологические последствия аварии и сосредоточиться только на судьбе РБМК-1000, то в сухом остатке получим:

- остановку строительства всех РБМК в Советском Союзе (а за пределами СССР таких реакторов и не было). Среди них были 3-я очередь ЧАЭС, 3-я очередь КАЭС, три блока Игналинской АЭС (Литовская ССР), оба блока Костромской АЭС, один блок Смоленской АЭС. Из вышеуказанных были достроены только 2-й блок в Игналине и один блок САЭС. Один блок КАЭС был к 2012 году готов на 80%, когда его строительство было официально отменено;
- оставшиеся в строю реакторы были модернизированы: обогащение топлива было повышено с 1,8% до 2,4%, что увеличивало *избыточную реактивность* (и как следствие ОЗР); количество стержней-поглотителей возросло; наверху активной зоны были поставлены неподвижные поглотители, компенсирующие *паровой (пустотный) эффект*;

- были модернизированы стержни-поглотители: их перестали выводить из зоны до конца, а также применили охлаждение направляющего канала тонким слоем стекающей по стенке воды, что уменьшило *концевой эффект*.
- ввели стержни новых типов — укороченного, вводящегося снизу, для компенсации *положительного температурного эффекта по воде*, и быстрой АЗ, вводящейся по сигналу автоматики за 2,5 с и гарантированно глушащей реактор даже при отказе других групп органов СУЗ.

Потраченные на модернизацию РБМК-1000 силы и средства позволили максимально уменьшить пустотный эффект. Но свести к нулю его удалось не на всех уровнях мощности. При этом беспокоиться не стоит — на данный момент сделано достаточно много, чтобы повысить безопасность реактора.

Последними представителями станций с РБМК являются Ленинградская, Смоленская и Курская. На данный момент (апрель 2026 года — А. Х.) на них остаются в строю соответственно два, три и два энергоблока — итого семь.

По мере исчерпания ресурса РБМК выводятся из эксплуатации, заменяясь энергоблоками с ВВЭР — в строй уже введены два блока ЛАЭС-2 и один блок КАЭС-2. Но пока из РБМК-1000 ещё выжимают максимум: разбухающую из-за облучения графитовую кладку распиливают и точат так, чтобы она сохраняла свою форму и продолжала держаться, а в различные места активной зоны ставят оборудование для наработки радионуклидов медицинского назначения.



Работник САЭС достаёт из канала для наработки изотопов ампулы с изотопом, скорее всего кобальтом-60

Несмотря на остающуюся актуальную экономическую эффективность по топливу, подкрепляемую возможностью наработки медицинских изотопов, на данный момент РБМК считается тупиковой веткой развития советской и российской реакторной техники. Уроки Чернобыля были усвоены — во главе угла в ядерной отрасли стоит безопасность. Как мы видели выше, на установках типа РБМК её обеспечить очень проблематично.

Но что было бы, если? Кто же мешает нам помечтать о светлом ядерном будущем?

РБМК-1500

При эксплуатации РБМК-1000 был замечен высокий потенциал по модернизации. Мощность реактора решили форсировать, поставив на ТВС *дистанционирующие решётки* новой конструкции, обеспечивающие перемешивание теплоносителя. Это интенсифицировало теплообмен, что позволяло вытягивать из реактора ещё больше тепла, уменьшая температуры конструкций!

Новую станцию было решено строить в Литве, в Игналинском районе. Энергоблок № 1 Игналинской АЭС был принят в промышленную эксплуатацию 1 мая 1984 года.

Во время физического пуска реактора РБМК-1500 энергоблока № 1 Игналинской АЭС при измерении веса стержней СУЗ был обнаружен **концевой эффект** в начальный момент движения стержня. Его причиной оказалось вытеснение воды в нижней части канала СУЗ, что потребовало изменения конструкции стержня. Но до Чернобыля работы по данному направлению проведены не были.

А 2-й блок ввели в строй уже после аварии, 18 августа 1987 года.



Игналинская АЭС узнаётся по своей необычной трубе для сброса радиоактивных аэрозолей

За время их эксплуатации не произошло ни одного значимого инцидента, хотя отдельные происшествия имели место. Так, в начале эксплуатации были выявлены случаи массовой течи в каналах СУЗ, вызванные браком труб, что потребовало их замены. Также стало известно, что из-за высоких неравномерностей энерговыделения локальные повышения мощности в отдельных каналах приводят к растрескиванию оболочек твэлов. В связи с этим министерство решило снизить номинальную электрическую мощность реактора РБМК-1500 до 1250 МВт.

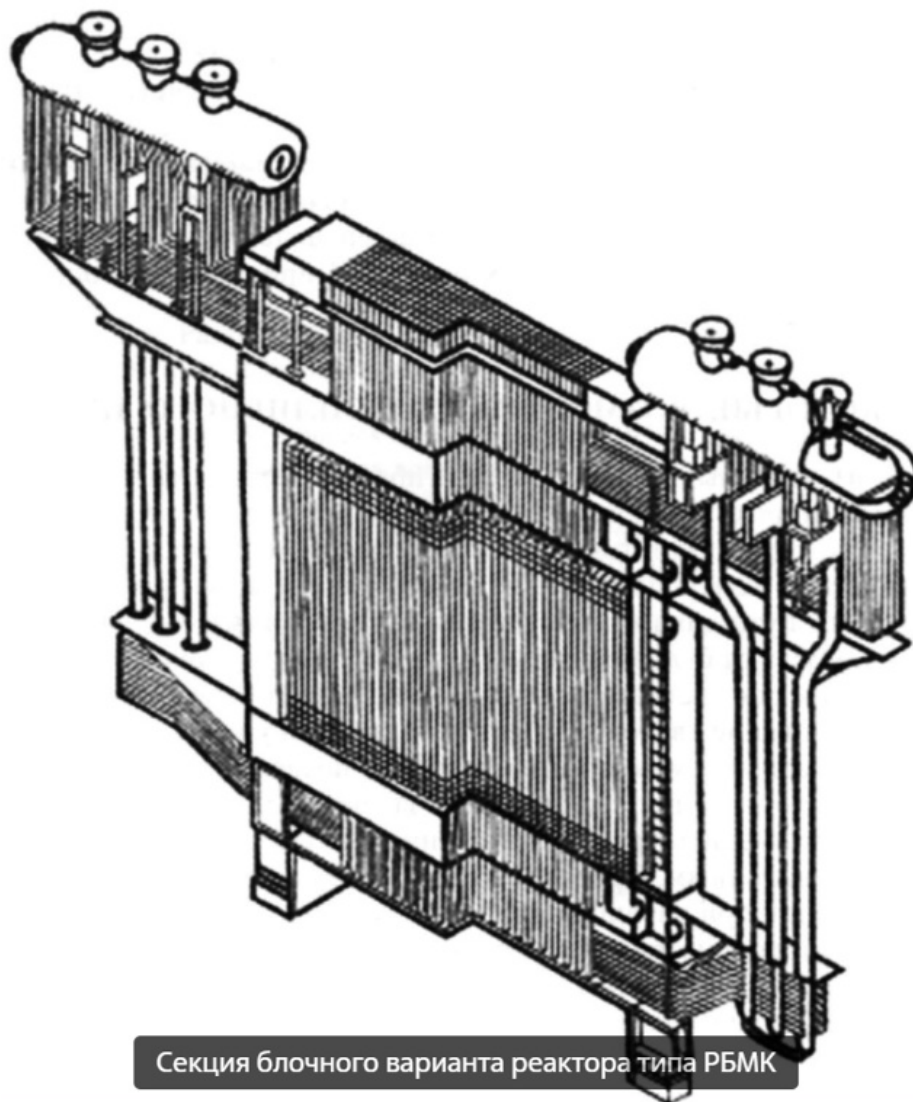


После распада СССР бремя по обслуживанию Игналинской АЭС легло на плечи независимой

Литвы. Эксплуатация атомной станции была выгодна для молодой республики, так как оба РБМК-1500 закрывали более 80% потребности страны в энергии, и позволяли продавать электричество за границу.

Но ничто не вечно под луной, и до Литвы добрался Евросоюз со своим лобби зелёной энергетики, объединившимся с желанием устранить конкурента на атомном поле. Игналинская АЭС была полностью остановлена в 2009 году.

РБМКП-2400



Второй перспективный реактор должен был повторить успех концепцию первой очереди Белоярской АЭС с реакторами АМБ. В отличие от РБМК-1000, планировался не только полный переход воды в пар, но и дальнейший перегрев пара в реакторе. А следующим шагом хотели сделать квадратную активную зону, набираемую из независимых блоков, каждый с отдельной петлёй циркуляции. А это в перспективе давало возможность повышать мощность до умопомрачительных значений вплоть до 5000 МВт.

Мне было бы интересно посмотреть на дальнейший полёт мысли авторов проекта, но сдаётся мне, что проект, рождённый до Чернобыля, на данный момент скорее мёртв, чем жив, поскольку все указанные выше проблемы там были усугублялись. А пример второго прародителя — АМБ, проработавшего всего 30 лет из-за проблем с перегревом пара — забивает проекту кол в сердце.

МКЭР

Многопетлевой канальный энергетический реактор (МКЭР) должен был стать как РБМК-1000,

только лучше. Для этого РБМК скрестили с ЭГП-6, у которого взяли идею естественной циркуляции теплоносителя без ГЦН.

Этот проект тоже звучит интересно, и даже имел развитие в начале 2000-х годов, но политическая воля похоронила МКЭР в закромах НИКИЭТа. И даже если очень сильно захотеть, мало какая политическая воля сможет с нуля возобновить производство реакторного графита высокой чистоты, необходимого для кладки активной зоны.

Итоги

История РБМК это история человеческих ошибок и недочётов, как и в проектировании, так и в эксплуатации. Конструкторы реакторной установки слишком далеко зашли вглубь неизведанного, работая со стихией, которая оказалась неподвластна им. Плата за этот просчёт была слишком высока, и последствия Чернобыля не изжиты до сих пор.

Но нам, людям современности, стоит на примере РБМК-1000 помнить, что техника даёт свои возможности только при грамотном применении и следовании инструкциям и правилам, поскольку безопасность — превыше всего!

Этот лонг посвящается Александру Старостину, чей цикл вдохновил меня поступить на инженера-конструктора ядерной техники

Словарь терминов

Активная зона — объём реактора, где загружено топливо и происходит реакция деления;

Аварийная защита (АЗ) — система безопасности, которая вводит все возможные поглотители в активную зону для полной остановки реактора. Срабатывает или по сигналу автоматики при изменении параметров работы установки или по команде оператора;

Барaban-сепаратор — элемент реакторной установки, в котором пар отделяется от воды путём барботажа;

Барботажа — процесс пропускания газа или пара через слой жидкости

Вес регулирующего органа — величина реактивности, которую может подавить один стержень. Зависит от глубины погружения, места расположения стержня в активной зоне, величины плотности потока нейтронов в данном участке;

Водо-водяной реактор — реактор, у которого и теплоносителем, и замедлителем, является вода;

Выгорание — уменьшение количества делящегося нуклида (урана-235 или плутония-239, если он есть) в результате радиоактивного распада. Измеряется или в % тяжёлых атомов или в энергии, которая выработалась при их распаде (МВт·сут/кг топлива)

Главный циркуляционный насос (ГЦН) — электрический насос, который перекачивает воду по контуру циркуляции

Дистанционирующая решётка — элемент ТВС, который удерживает твэлы от колебаний и соприкосновения друг с другом;

Замедлитель — вещество, рассеивающее нейтроны так, что их скорость падает, и им легче поглотиться в ядре урана. В качестве замедлителя применяются вода, графит, тяжёлая вода (самый лучший замедлитель, но дорогой).

Канальный реактор — тип реактора, в котором давление теплоносителя удерживается стенками труб-технологических каналов в активной зоне

Канал направляющий — труба, проложенная в графитовой кладке активной зоны;

Канал технологический — направляющий канал, в котором расположена ТВС;

Корпусной реактор — тип реактора, в котором давление теплоносителя удерживается толстостенным корпусом. Направляющие каналы в его активной зоне отсутствуют.

Мощность тепловая — количество энергии, которое снимается теплоносителем с активной зоны;

Мощность электрическая — мощность, которую реакторная установка выдаёт в сеть;

Обратная связь — это процесс, приводящий к тому, что результат функционирования какой-либо системы влияет на параметры, от которых зависит функционирование этой системы. Если он ускоряет функционирование, то обратная связь **положительная**;

Оперативный запас реактивности — избыточная реактивность, необходимая для изменения мощности;

Продукты деления — все радионуклиды, получающиеся в результате ядерных реакций топлива. Если продукты деления радиоактивные, то их дочерние нуклиды также входят в состав продуктов деления;

Реактивность — прирост нейтронов по отношению к предыдущему поколению относительно количества нейтронов в этом поколении. Если реактивность равна нулю, то мощность постоянна. Если реактивность положительна, количество нейтронов растёт, реактор разгоняется. Наоборот аналогично. Реактивность показывает скорость экспоненциального роста мощности реактора и является удобной величиной, к которой можно привести эффекты нейтронной физики;

Система аварийного охлаждения реактора (САОР) — система безопасности, которая хранит в себе воду для заливки ей активной зоны в случае аварии;

Система управления и защиты (СУЗ) — система нормальной эксплуатации, включающая в себя органы регулирования (в основном стержни-поглотители) и автоматику для их перемещения;

Тепловыделяющая сборка (ТВС) — совокупность твэлов, закрепляемая в активной зоне;

Тепловыделяющий элемент (твэл) — элемент ТВС, содержащий ядерное топливо;

Теплоноситель — вещество, поток которого охлаждает твэлы в ТВС, снимая с них тепловую энергию и передавая дальше для генерации пара. Бывает водяной, газовый и жидкометаллический;

Эффект реактивности — приращение реактивности при изменении какого-либо параметра активной зоны: плотности теплоносителя, температур топлива, замедлителя, выгорания топлива, паросодержания.

▸ [Источники](#)

Автор: Аким Халиуллин

Оригинал

Теги: РБМК, Чернобыль, Йодная яма, ЛАЭС, ЧАЭС

Хабы: Научно-популярное, Энергия и элементы питания, Физика

**64K+****488**

Охват за 30 дней Карма

Cat.Cat @Catx2

Обозреватель

Подписаться

[Сайт](#) [Сайт](#) [ВКонтакте](#) [GitHub](#) [Telegram](#)**Комментарии 10**

saag
17 часов назад

Могу предложить в дополнение почитать интервью академика Валерия Легасова https://scepsis.net/library/id_3208.html



Ответить



Raegdan
16 часов назад

Инструкции для персонала запрещают работу при низком оперативном запасе, так как условия в реакторе могут сложиться так, что внезапно проявится какой-нибудь эффект из указанных выше, а веса стержней не хватит, чтобы его компенсировать

Ключевое непонимание сути ОЗР. ОЗР - это выраженное в эквивалентных "полностью введённых стержнях" количество отрицательной реактивности, которое в данный момент можно **убрать** из активной зоны. То есть, низкий ОЗР - это как нажатый почти в пол газ у автомобиля: некуда больше разогнаться, но очень много есть куда тормозить.

поскольку именно при низком ОЗР хорошо проявлялся концевой эффект

Алексея Фатахова на вас нет! Для концевого важен не ОЗР, а конкретное геометрическое распределение стержней. Значение ОЗР это математическая свёртка этого распределения, действие с потерей информации: "ОЗР 15 стержней" - это может быть как "30 стержней введены на 50%", так и "150 на 10%". При одном и том же его значении выраженность концевого эффекта может отличаться в разы.

ОЗР составил значение, требующее немедленной остановки реактора

Да не было по состоянию на 86 год такого требования в мануале на реактор! Хватит уже повторять гебистскую джину Медведева, ну серьёзно. Если хочется изучать ЧАЭС, начните хотя бы с Купного и Фатахова.



Ответить



Mysterio
12 часов назад

Да не было по состоянию на 86 год такого требования в мануале на реактор!

Действовавший в апреле 1986 года технологический регламент, глава 9: "При снижении ОЗР до 15 стержней реактор должен быть немедленно заглушен".



Ответить



Raegdan
11 часов назад

О, оказывается Фатахов есть на Хабре даже, @VIUR

И он отвечал на этот вопрос 5 лет назад, посмотрите его комментарии в профиле.



Ответить



Advixum
16 часов назад

Работник САЭС достаёт из канала для наработки изотопов ампулы с изотопом, скорее всего кобальтом-60

Кобальтовые облучатели могут фонить 1,5 - 2 млн рентген в час. Радиорезистентный работник однако))



Ответить



 **qweweqweweqweweqweweqwe**
16 часов назад

Работник САЭС достаёт из канала для наработки изотопов ампулы с изотопом, скорее всего кобальтом-60

Это шутка? На таком расстоянии от ампулы с кобальтом-60 находится смертельно опасно.



Ответить



 **Mihrutkin**
15 часов назад

Между схемой ор и с куча труб, если они потекут, как их ремонтировать



Ответить



 **RTFM13**
12 часов назад

Не вижу фразы "разгон реактора на мгновенных нейтронах" даже в теоретической части.

Тем временем взрыв водорода в реакторном зале не раскидает по округе практически всё содержимое активной зоны.



Ответить



 **ru_vlad**
10 часов назад

"Один блок КАЭС был к 2012 году готов на 80%," - КАЭС это Курская или Кольская? все же там разные реакторы



Ответить



 **Voldemaar**
4 часа назад

Тени Фукусимы пали на всю американскую ядерную энергетику в принципе.



Ответить



[Зарегистрируйтесь на Хабре](#), чтобы оставить комментарий

Публикации

[ЛУЧШИЕ ЗА СУТКИ](#)

[ПОХОЖИЕ](#)



ANTON62

19 часов назад

Мессенджер Ласточка. Нас не пустили в Rustore

 Простой

 3 мин

 15K

Обзор

 +62

 24

 85