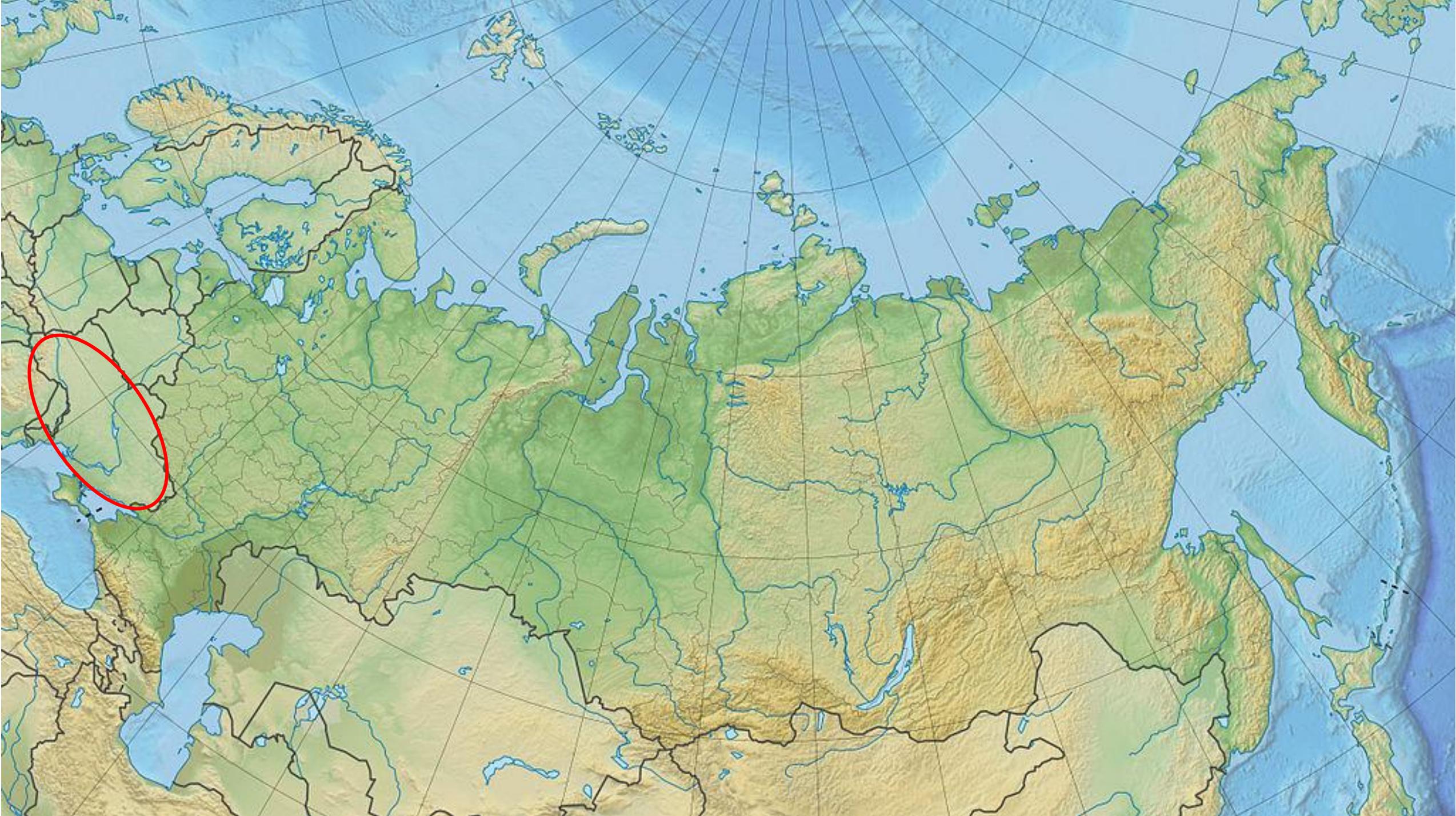


Авария на Чернобыльской АЭС

26 апреля 1986 года



- Чернобыльская АЭС расположена на севере Украины в 11 км от границы с Республикой Беларусь, на берегу реки Припять, впадающей в Днепр.
- 3 км на запад – город Припять;
- 18 км на юго-восток – город Чернобыль;
- в 110 км к югу — город Киев.





- Первая очередь ЧАЭС (блоки 1 и 2) была построена в 1970—1977 годах.
- Вторая очередь (блоки 3 и 4) была построена к концу 1983 года.
- В 1981 году было начато строительство третьей очереди (блоки 5 и 6), остановленное после аварии на четвёртом энергоблоке при высокой степени готовности объектов.
- Проектная мощность ЧАЭС составляла 6000 МВт.
- В апреле 1986 года работали 4 энергоблока с реакторами РБМК-1000 суммарной генерирующей мощностью 4000 МВт.
- 15 декабря 2000 года станция прекратила генерацию электроэнергии. В настоящее время ведутся работы по выводу из эксплуатации Чернобыльской АЭС и преобразованию разрушенного в результате аварии четвёртого энергоблока в экологически безопасную систему.

О реактивности реактора

- В течение всей кампании реактор должен оставаться критичным.
- Как создаётся первое критическое состояние реактора?
- Активную зону реактора постепенно заполняют тепловыделяющими сборками до тех пор, пока в ней не начнётся самоподдерживающаяся цепная реакция деления. В этом случае говорят, что в активной зоне набрана первая критическая масса.
- Долго ли сможет работать реактор с таким количеством загруженного топлива?

О реактивности реактора

- Долго ли сможет работать реактор с таким количеством загруженного топлива?
- Небольшая часть загруженного топлива будет истрачена на деление.
- На месте разделившихся ядер появятся осколки деления (они являются поглотителями нейтронов), - реактор **станет подкритическим и остановится.**
- Значит, для длительной работы реактора необходимо загружать в его активную зону топливо сверх критического его количества.
- Можно ли так делать? Не опасно ли это?

О реактивности реактора

- Просто так этого делать нельзя: как только мы загрузим в активную зону некоторое сверхкритическое количество топлива и реактору будет сообщена положительная реактивность, - реактор станет неуправляемым.
- Поэтому загружать сверхкритическое количество топлива в реактор следует с одновременной загрузкой в активную зону **компенсирующих поглотителей**.
- Они служат для компенсации возникающей положительной реактивности при загрузке в активную зону топлива сверх критического его количества.
- Таким образом загрузка в активную зону сверхкритического количества ядерного топлива приводит к возникновению **положительной реактивности**, которая сразу же подавляется компенсирующими

Оперативный запас реактивности

- ОЗР — часть общего запаса реактивности реактора, компенсируемая только лишь подвижными поглотителями (стержнями) СУЗ.
- Для РБМК принято измерять ОЗР в эффективном количестве полностью погруженных стержней ручного регулирования СУЗ.
- ОЗР, выраженный в стержнях, примерно показывает:
 - какой запас есть у оператора для увеличения мощности;
 - максимальную положительную реактивность, которую можно внести в реактор, поднимая стержни СУЗ.

Оперативный запас реактивности

- При этом суммарная длина погружённых частей стержней не равна произведению длины стержня на ОЗР.
- Пояснение:
 - реактивность, вносимая стержнем, имеет нелинейную зависимость от глубины погружения стержня;
 - количество нейтронов, поглощаемых стержнем СУЗ, зависит от потока нейтронов в области стержня, в том числе распределения потока нейтронов по высоте активной зоны реактора.

Оперативный запас реактивности

- Хорошо или плохо иметь большую величину оперативного запаса реактивности?

Оперативный запас реактивности

- Хорошо или плохо иметь большую величину оперативного запаса реактивности?
- С одной стороны, хорошо: большой ОЗР позволяет скомпенсировать большие режимные потери или высвобождения реактивности в быстрых переходных процессах.
- С другой стороны, опасно: большой ОЗР, будучи случайно высвобожденным в результате ошибки оператора, приведёт к взрыву.
- С третьей стороны, большой ОЗР - это большое число подвижных поглотителей в активной зоне. Их перемещение в активной зоне вызывает большие изменения неравномерности нейтронного поля (и поля энерговыделения) в объёме активной зоны, что делает реактор неэкономичным.
- С четвёртой стороны, большое количество подвижных поглотителей требует большого количества и повышения мощности сервоприводов для их групп

Оперативный запас реактивности

- С точки зрения экономики и безопасности реактора, наиболее благоприятной является минимальная величина ОЗР.
- В этом случае:
 - снижается «непродуктивное» поглощение нейтронов стержнями СУЗ (которые могли бы быть затрачены на деление делящихся изотопов, то есть производство энергии),
 - уменьшается риск внесения существенной положительной реактивности из-за непредвиденного извлечения поглощающего стержня СУЗ.
- До аварии на ЧАЭС реакторы РБМК имели весьма низкую величину ОЗР, что дополнительно увеличивало их экономическую эффективность.
- Однако слишком низкое значение ОЗР способствовало **снижению**

Оперативный запас реактивности

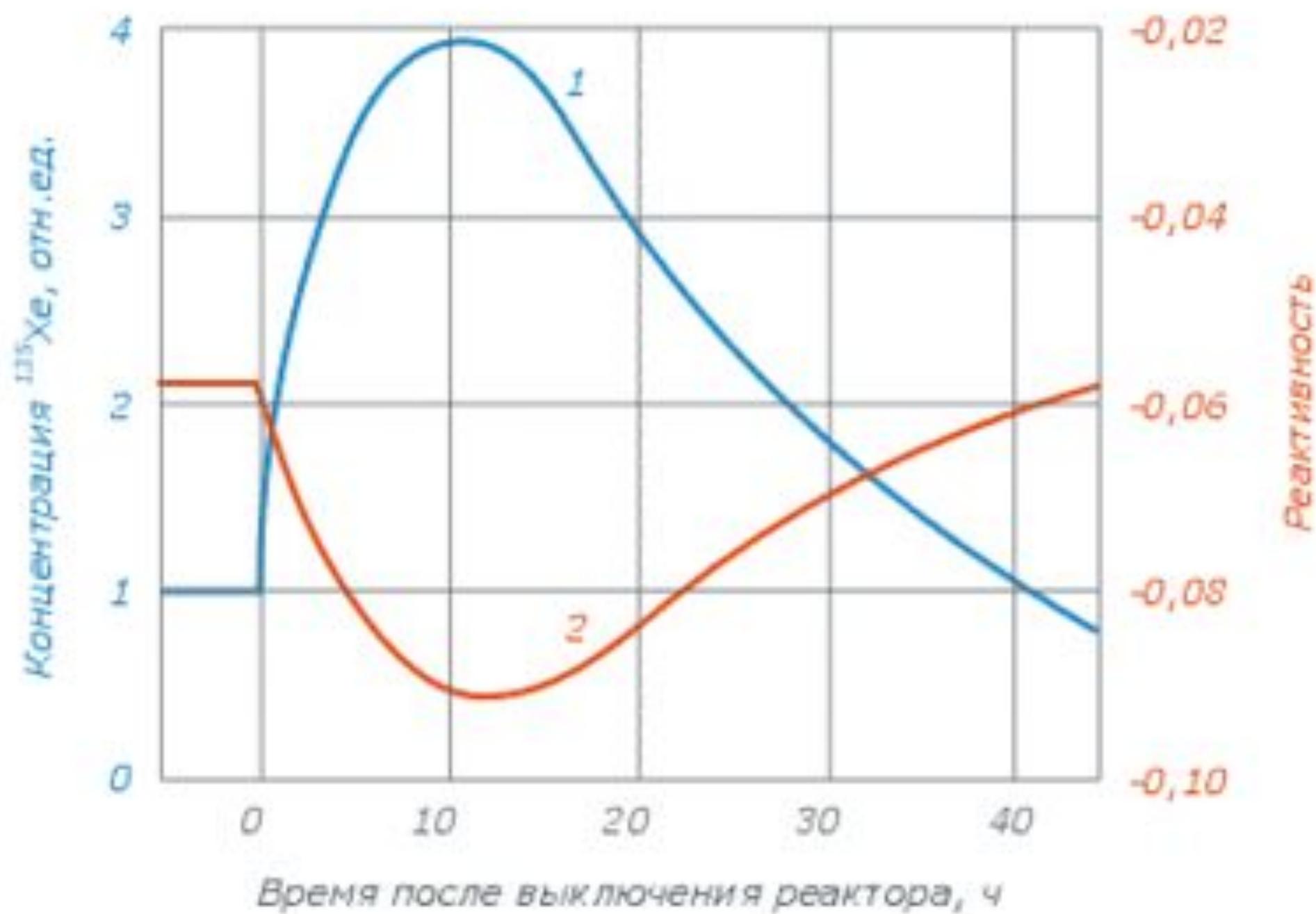
- Вот почему в реакторах ВВЭР введено **борное регулирование**, позволяющее постоянно поддерживать ОЗР в пределах, гарантирующих ядерную безопасность реактора.
- При нормальной эксплуатации в активную зону частично опущена только регулирующая группа стержней, остальные поглотители полностью извлечены из активной зоны.
- Остальная часть общего ЗР компенсируется неподвижными выгорающими поглотителями и, главным образом, борной кислотой в теплоносителе.
-
- Важно, что введение или выведение борной кислоты в воду первого контура практически не изменяет форму нейтронного поля в реакторе, поскольку она распределяется равномерно по объёму активной зоны

Йодная яма

- Йодная (ксеноновая) яма — это когда в реакторе после его отключения либо снижения мощности накапливается короткоживущий изотоп ксенона ^{135}Xe ($T = 9,14$ ч), образующийся в результате распада изотопа йода ^{135}I ($T = 6,57$ ч).
- Этот процесс приводит к временному появлению значительной отрицательной реактивности.
- Это делает невозможным вывод реактора на проектную мощность в течение 1-2 суток.
- Йодная яма — одно из проявлений так называемого «отравления» ядерного реактора.
- Ксеноновое отравление затрудняет работу АЭС в режиме постоянно меняющейся мощности.

Причины образования йодной ямы

- При делении ядер урана, во время работы ядерного реактора, среди прочих продуктов деления образуется радиоактивный изотоп йода ^{135}I .
- В результате β -распада с периодом полураспада 6,57 часа он превращается в изотоп ксенона ^{135}Xe .
- Этот изотоп тоже радиоактивен, но его период полураспада больше — 9,14 часа.
- ^{135}Xe очень хорошо поглощает нейтроны.
- Поглощённые им нейтроны не могут участвовать в цепной реакции деления урана, поэтому присутствие ^{135}Xe снижает запас реактивности реактора.
- В реакторе, работающем на большой мощности, убыль ^{135}Xe определяется его радиоактивным распадом и «выгоранием» в результате захвата нейтронов.



Аварийные защиты

АЗ-1 – снижение мощности реактора до 60% от следующих причин:

- 1) Отключение одного из трех работающих ГЦН.
- 2) Снижение расхода питательной воды до 75%.
- 3) Снижение уровня в БС на 200 мм ниже геометрической оси.

Аварийные защиты

АЗ-2 – снижение мощности реактора до 50% от следующих причин:

- 1) Отключение одного из двух работающих турбогенераторов.
- 2) Сброс нагрузки одним из двух работающих турбогенераторов.

Аварийные защиты

АЗ-3 – снижение мощности реактора до 20% от следующих причин:

- 1) Сброс нагрузки двумя турбогенераторами.
- 2) Сброс нагрузки единственным работающим турбогенератором.

Аварийные защиты

АЗ-4 – резервная.

Аварийные защиты

АЗ-5 – снижение мощности реактора до момента снятия аварийного сигнала, либо до полного заглушения реактора от одной из следующих 14 причин:

АЗ-5 – снижение мощности реактора до момента снятия аварийного сигнала, либо до полного заглушения реактора от одной из следующих причин:

- 1) условия, требующие срабатывания АЗ-1,2,3,4, и невозможность его осуществления из-за неисправности СУЗ;
- 2) уменьшение периода разгона до 10 с при мощности реактора 160 МВт и до 20 с при остальном диапазоне мощности;
- 3) повышение уровня мощности на 16 МВт над заданным уровнем при мощности до 160 МВт;
- 4) неисправность одного канала АЗ;
- 5) останов 2 из 3 работающих ГЦН любой половины;
- 6) исчезновение напряжения на 4-х секциях с.н. 6,3 кВ;
- 7) повышение давления в реакторном пространстве до 0,15 ати;
- 8) снижение уровней в БС любой половины до величины -1100 мм по уровнемерам со шкалой -1200...+400 мм;
- 9) повышение уровней в БС любой половины до величины +250 мм по уровнемерам со шкалой -1200...+400 мм;
- 0) обезвоживание каналов СУЗ;
- 1) снижение расхода воды в напорный коллектор СУЗ до 800 м³/ч;
- 2) повышение давление в БС до 75 атм;
- 3) закрытие стопорных клапанов турбин обоих турбогенераторов;
- 4) снижение в 2 раза расхода питательной воды.

Концевой эффект

- На расстоянии 1,5 м под каждым стержнем подвешен **вытеснитель** — заполненный графитом 4,5-метровый алюминиевый цилиндр.
- Назначение вытеснителя — сделать реакцию более чувствительной к движению конца стержня.
Пояснение. **Когда поглощающий стержень, опускаясь, сменяет графитовый вытеснитель, контраст оказывается больше, чем при появлении стержня на месте воды, также способной в определенной мере поглощать нейтроны.**
- Однако при выборе размеров «вытеснителей» и подвески конструкторы не учли все побочные эффекты.
- У стержней, до предела поднятых вверх, нижние концы «вытеснителей» располагаются на 1,25 м выше нижней границы активной зоны.
В этой самой нижней части каналов находилась вода, еще почти не содержащая пара.

Концевой эффект

- Когда по команде АЗ-5 все стержни двинулись вниз, их концы были еще далеко вверху, а концы «вытеснителей» уже дошли до низа активной зоны и вытеснили из каналов находившуюся там воду.
- С физической точки зрения это было эквивалентно резкому приросту объема пара — ведь для ядерной реакции безразлично, чем вытесняется вода из каналов — паром или графитом.
- Теперь уже ничто не могло удержать действия положительного парового коэффициента реактивности.
- Проблема состояла в том, что не была предусмотрена ситуация, когда практически все стержни из крайнего верхнего положения одновременно пойдут вниз.

Вопросы по предыдущей лекции

- Где находится ЧАЭС?
- Какова проектная установленная мощность ЧАЭС?
- Какова установленная мощность ЧАЭС на 1986 год?
- Когда был построен 4-й блок ЧАЭС?
- Что сейчас с ЧАЭС?

Вопросы по предыдущей лекции

- Что такое запас реактивности ядерного реактора?
- Зачем он нужен?
- Как создаётся запас реактивности?
- Что такое оперативный запас реактивности?
- В чём измеряется ОЗР?

Вопросы по предыдущей лекции

- В чём преимущество большого ОЗР?
- В чём недостатки большого ОЗР?
- Каков подход к величине ОЗР в реакторах РБМК?
- в реакторах ВВЭР?

- Авария произошла при проведении испытаний режима совместного выбега с нагрузкой собственных нужд турбогенератора № 8 блока № 4 Чернобыльской АЭС.
- Необходимость проведения этих испытаний была обусловлена тем, что совместный выбег не был отработан до начала промышленной эксплуатации блоков данной серии.
- Предложение об использовании совместного выбега исходило от Главного конструктора.
- Оно объяснялось необходимостью гарантированного обеспечения принудительной циркуляции в контуре охлаждения реактора, для чего требовалось обеспечить ГЦН и ПЭН надежным электроснабжением.
- Указанная концепция использования совместного выбега была признана и включена в проекты строительства АЭС с реакторами РБМК (например, 2-ая очередь Смоленской АЭС).

Режим совместного выбега турбогенератора с агрегатами СН

- Совместный выбег – плавный останов турбогенератора и агрегатов СН при отключении энергоблока от системы и отсечении пара, поступавшего на турбину.
- Совместный выбег происходит за счет кинетической энергии вращающихся масс турбины и ротора генератора.
- Собственные нужды получают электроэнергию от останавливающегося генератора через рабочий ТСН.

Условия существования совместного выбега

- 1) Выключатель блока отключен.
- 2) Генераторный выключатель включен.
- 3) Генератор возбужден.
- 4) Пар, поступавший на турбину, отсечен.
- 5) Выключатели рабочего ввода на секцию СН от рабочего ТСН включены.
- 6) Выключатели электродвигателей СН (хотя бы части из них) включены.

Условие прекращения совместного выбега

Совместный выбег прекращается в момент, когда $U = 0,25$ о.е.

В этот момент срабатывает АВР, принудительно отключает выключатели рабочих вводов и включает выключатели резервных вводов от МРП.

После чего начинается самозапуск двигателей от РТСН.

Назначение совместного выбега

- Для АЭС:

как можно дольше поддерживать вращение ГЦН на секциях нормальной эксплуатации при обесточивании блока.

- Для ТЭС:

предотвратить нерасчетный разгон турбины, вызванный несвоевременной или неплотной посадкой стопорного клапана.

Расчет совместного выбега турбогенератора с агрегатами собственных нужд

- Расчет основан на решении ДУ движения:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{M_{изб*}}{T_{J_{выб*}}}$$

- Но в отличие от расчета выбега и самозапуска интегрирование ведут не по времени t , а по частоте n .

$$\Delta t_i = \frac{T_{j_{выб*}}}{M_{изб\ i*}} \Delta n_{i*} \quad n_* = 1 + s$$

Задаваясь приращением частоты Δn_i , находят приращение по времени Δt_i , определяют текущее время и текущую частоту:

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t_i,$$

$$n_{i+1} = n_i + \Delta n_i.$$

В итоге получают зависимость $n(t)$.

Как правило, при разрешенном совместном выбеге генератор оборудован блоком выбега, который поддерживает напряжение пропорциональным частоте. Поэтому одновременно получают зависимость $U(t) = n(t)$ в о.е.

Расчет из исходного генераторного режима

Здесь очень важно точно воспроизвести начальный восходящий участок зависимости $n(t)$.

Поэтому принимают следующие приращения:

- $\Delta n = 0,05$ при $n = 1 \dots 1,1$;
- $\Delta n = 0,01$ при $n = 1,1 \dots n_{max}$;
- $\Delta n = -0,001$ при $n = n_{max}$;
- $\Delta n = -0,01$ – следующая точка после максимума.

Далее при снижении n на всей кривой выбега $\Delta n = -0,05$.

Расчет из исходного генераторного режима

Мощность турбины здесь не равна нулю (хотя и затухает до нуля примерно за 5-20 секунд).

Мощность турбины определяется с учетом:

а) запаздывания в закрытии стопорного клапана по сравнению с моментом отключения блочного выключателя (**t_{зап}**);

б) расширения отсеченного объема пара между стопорным клапаном и турбиной (**T_{отс}**).

Расчет из исходного генераторного режима

Мощность турбины в зависимости от времени моделируется так:

$$\text{при } t \leq t_{\text{зан}} \quad P_{\text{турб}} = P_{\text{турб}0};$$

$$\text{при } t > t_{\text{зан}} \quad P_{\text{турб}} = P_{\text{турб}0} \exp\left(-\frac{t - t_{\text{зан}}}{T_{\text{отс}}}\right)$$

где $P_{\text{турб}0}$ – мощность турбины в исходном режиме (её определение будет дано ниже).

Расчет совместного выбега

выполняется в следующем порядке:

1) Рассчитывают инерционную постоянную выбегающей системы (генератор + агрегаты СН):

$$T_{J_{\text{выб}}^*} = \frac{1}{S_{\text{б}}} (T_{J_{\text{м/а}}} \cdot P_{\text{гн}} + \sum_k T_{J_{\text{двк}}} \cdot P_{\text{дв.нк}})$$

Базисную мощность можно принять равной активной номинальной мощности генератора:

$$S_{\text{б}} = P_{\text{гн}}$$

2) Определяют потери:

$P_{нас}$ – тормозная мощность агрегатов СН (насосов);

P_v – потери на вентиляцию;

$P_{тр}$ – потери на трение;

$P_{ст}$ – потери в стали;

$P_{возб}$ – потери на возбуждение;

$P_{си}$ – потери в меди

Тормозная мощность агрегатов СН (насосов):

$$P_{\text{нас}} = P_{\text{дв.н}} \cdot K_{\text{згр}} \cdot M_{\text{с}} \cdot n^*$$

Потери на вентиляцию:

$$P_{\text{в}} = (P_{\text{в0}}^m + P_{\text{в0}}^z) n^{*3}$$

где $P_{\text{в0}}^m$ – мощность потерь на вентиляцию турбины в беспаровом режиме;

где $P_{\text{в0}}^z$ – мощность потерь на вентиляцию генератора в исходном режиме.

Потери на трение:

$$P_{тр} = (P_{тр.оп0}^m + P_{тр.оп0}^z) n_* + P_{тр.уп0}^m n_*^{1,5}$$

где $P_{тр.оп0}^m$ – мощность потерь на трение в опорных подшипниках турбины в исходном режиме;

где $P_{тр.оп0}^z$ – мощность потерь на трение в опорных подшипниках генератора в исходном режиме;

где $P_{тр.уп0}^m$ – мощность потерь на трение в упорных подшипниках турбины в исходном режиме.

Потери в стали:

$$P_{cm} = (P_{cm0}^z + P_{cm0}^m + P_{cm0}^{TCH} + \sum_k P_{cm0k}) \frac{U_*^2}{n_*^{0,7}}$$

где P_{cm0}^z – мощность потерь в стали генератора в исходном режиме;

где P_{cm0}^m – мощность потерь в стали блочного трансформатора в исходном режиме;

где P_{cm0}^{TCH} – мощность потерь в стали ТСН в исходном режиме;

где P_{cm0k} – мощность потерь в стали k -го электродвигателя в исходном режиме.

Потери на возбуждение:

$$P_{\text{возб}} = P_{\text{возб хх}} n^*$$

При разрешенном совместном выбеге генератор оборудован блоком выбега, который поддерживает напряжение возбуждения пропорциональным частоте вращения. В относительных единицах:

$$U^* = n^*$$

Потери в меди:

$$P_{Cu} = \frac{\sum_k P_{наск}}{U_* \sum_l P_{дв.лк}} \cdot \sum_k P_{Cu 0 k}$$

где $P_{Cu 0 k}$ – мощность потерь в меди k -го электродвигателя в исходном режиме.

3) Рассчитывается ускоряющая мощность турбины $P_{турб}$, если исходный режим генераторный (или $P_{турб} = 0$, если исходный режим двигательный):

Мощность турбины в исходном режиме:

$$P_{турб 0} = P_{гн} + P_{в} + P_{тр}$$

Мощность турбины в момент времени t :

$$\text{при } t \leq t_{зан} \quad P_{турб} = P_{турб 0};$$

$$\text{при } t > t_{зан} \quad P_{турб} = P_{турб 0} \exp\left(-\frac{t - t_{зан}}{T_{отс}}\right)$$

4) Рассчитываются избыточная мощность и избыточный момент:

Избыточная мощность:

$$P_{изб} = P_{турб} - \sum_k P_{наск} - P_{в} - P_{тр} - P_{ст} - P_{возб} - P_{Cu}$$

Избыточный момент:

$$M_{изб*} = \frac{P_{избi}}{S_{б}n_{i*}}$$

5) Задаваясь приращением Δn_i , вычисляют приращение времени:

$$\Delta t_i = \frac{T_{j\text{выб}^*}}{M_{\text{изб } i^*}} \Delta n_{i^*}$$

Если СВ протекает из исходного **генераторного** режима, то требуется следить за знаком Ризб:

Сначала $\Delta n_i > 0$.

В тот момент, когда Ризб меняет свой знак с (+) на (-), следует также изменить знак Δn_i с (+) на (-). Этот момент соответствует максимуму функции n_{max} .

6) Определяют текущее время и текущую частоту (которая также равна текущему напряжению в о.е.):

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t_i,$$

$$n_{i+1} = n_i + \Delta n_i.$$

$$U_{i+1} = n_{i+1}$$

7) Определяют подачу Q механизмов СН:

- для механизмов без противодействия $Q = n$;

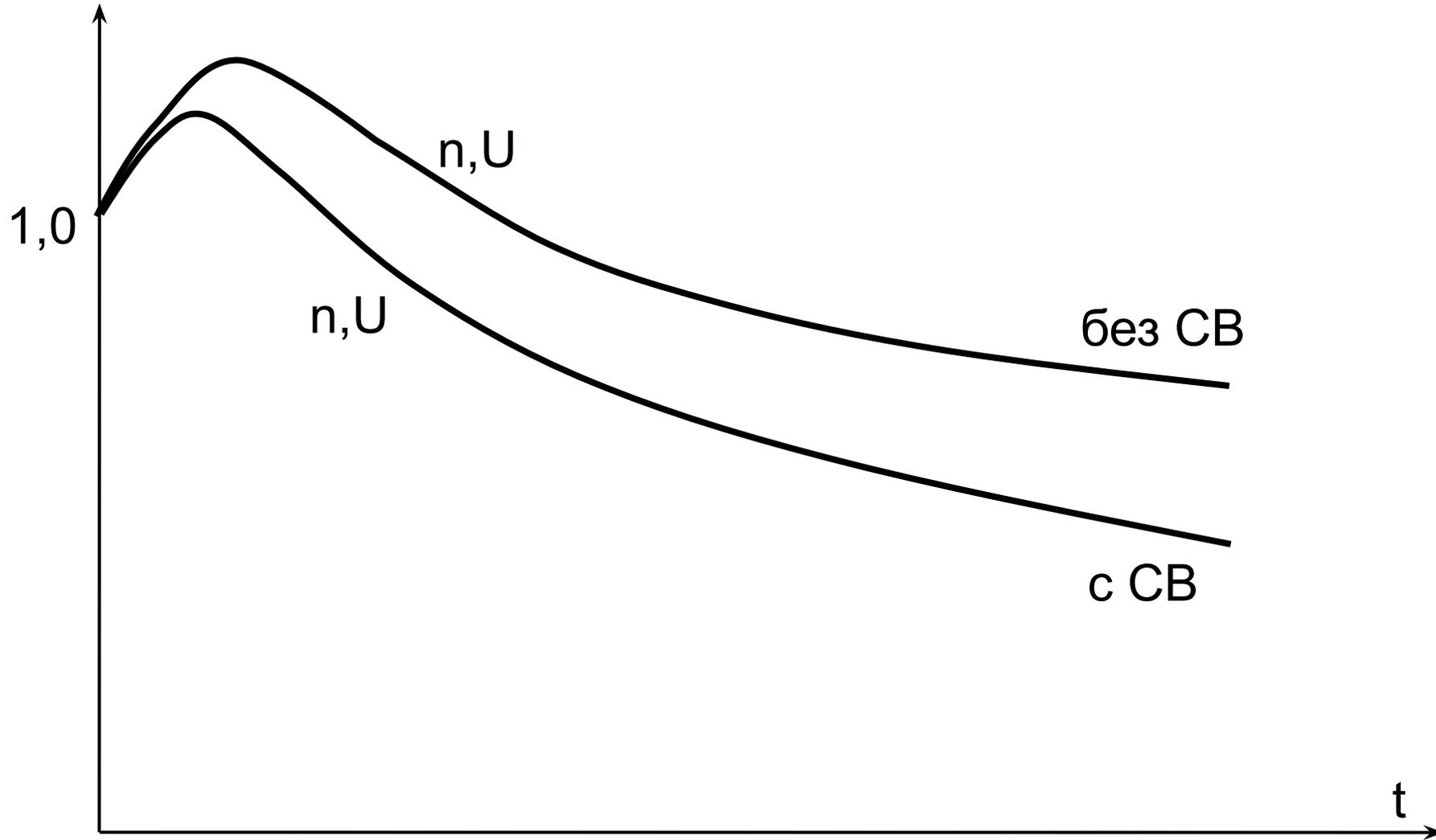
- для механизмов с противодействием:

$$Q_* = \left(\frac{n_{кл*} - n_*}{n_{кл*} - 1} \right)^{p_3} \quad p_3 = \frac{1}{\frac{\ln M_{кл*}}{\ln n_{кл*}} - 1}$$

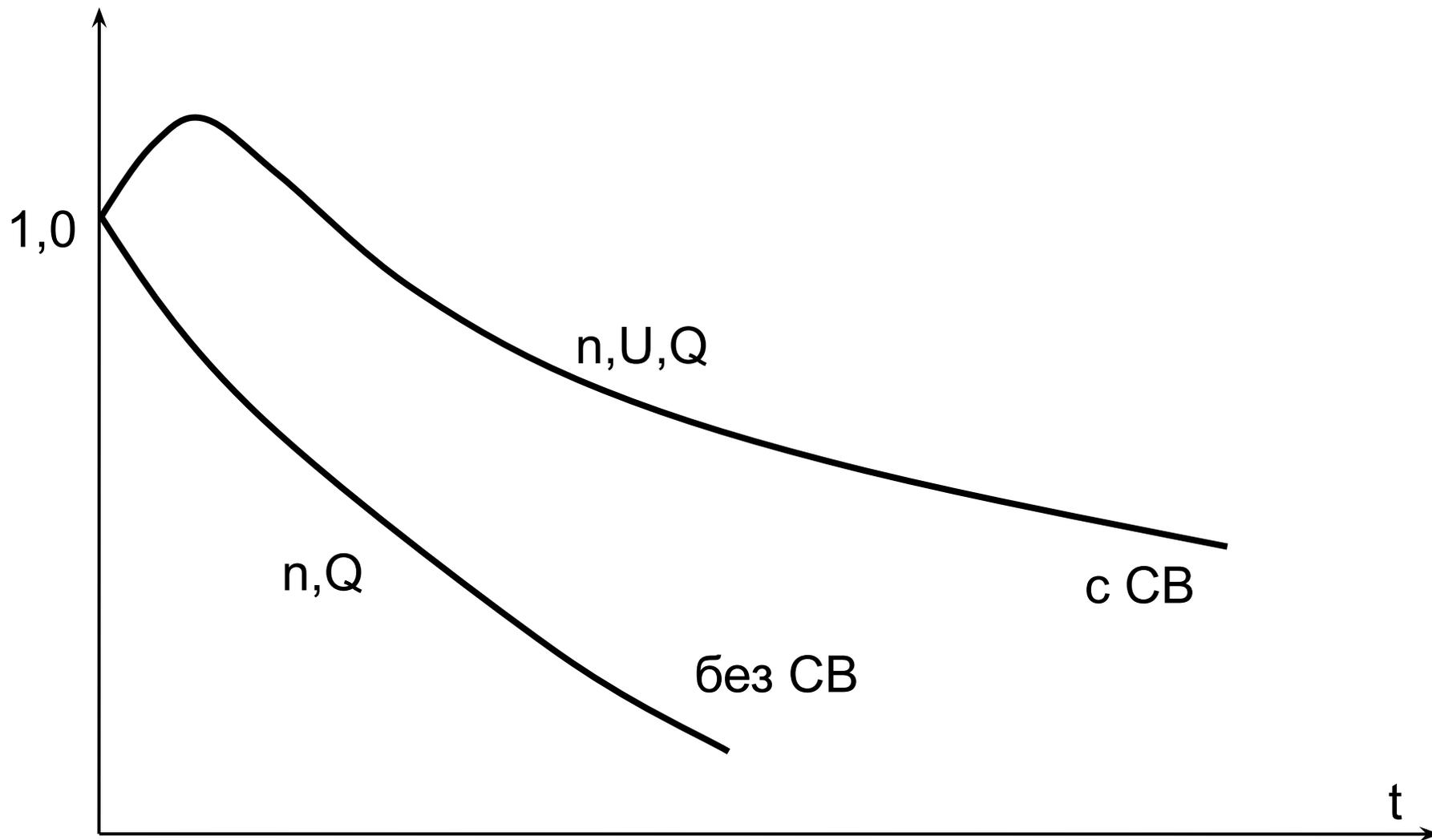
Результаты расчета совместного выбега

В результате расчета СВ получаем графики зависимостей:

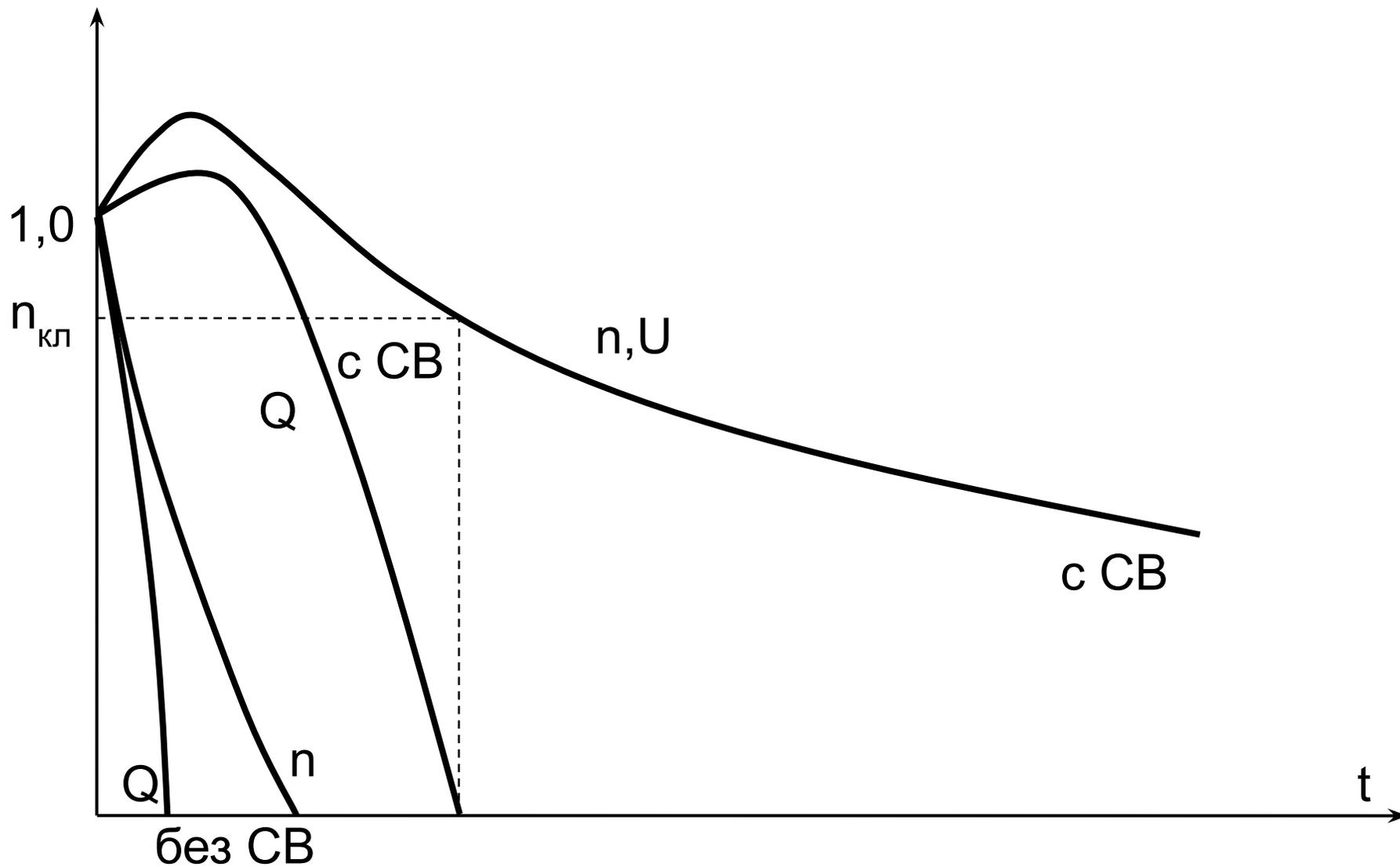
- $n(t)$;
- $U(t)$;
- $Q(t)$.



Зависимости для генератора
Выбег из генераторного режима



Зависимости для двигателей механизмов без ПД
Выбег из генераторного режима



Зависимости для двигателей механизмов с ПД
 Выбег из генераторного режима

Предыстория

- В соответствии с требованиями проекта для режима обесточивания АЭС при МПА электроснабжение ПЭН и ГЦН должно обеспечиваться за счет механической энергии выбега турбогенератора.
- Однако, 4-ый блок ЧАЭС был принят в эксплуатацию в декабре 1983 г. без опробования этого режима. Подобные испытания должны быть составной частью наладочных испытаний, проводимых при различных уровнях мощности энергоблока.
- В 1982 г. на ЧАЭС были проведены соответствующие испытания на 3-ем блоке. Испытания показали, что требования по характеристикам электрического тока, вырабатываемого за счет выбега ТГ, в течение заданного времени не выдерживаются и необходима доработка системы регулирования возбуждения ТГ.
- Дополнительные испытания с модернизированным блоком выбега проводились в 1984 и в 1985 г.г. Программами 1982 и 1984 г.г. предусматривалось подключать к выбегающему ТГ по одному ГЦН с каждой стороны реактора, а программами 1985 и 1986 г.г. - по два ГЦН.

Программа испытания СВ

- Главная идея программы - наиболее реалистичная проверка режима СВ. Это вполне оправдано.
- С точки зрения современных подходов к разработке таких документов, данная программа не вполне удовлетворительна - прежде всего в части безопасности.
- Однако, совокупность эксплуатационной документации (регламент + инструкции) вместе с данной программой давали достаточные основания для безопасного проведения запланированного режима.
- **Причины аварии скрыты не в программе, как таковой, а в незнании разработчиками программы особенностей поведения реактора РБМК в предстоявшем режиме работы.**

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

испытаний турбогенератора № 8 Чернобыльской АЭС
в режиме совместного выбега с нагрузкой
собственных нужд

1. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1. Целью испытаний является экспериментальная проверка возможности использования энергии механического выбега для поддержания производительности механизмов собственных нужд в режимах обесточения с.н.
2. Испытания проводятся перед выводом блока в планово-предупредительный ремонт, по разрешенной заявке.
3. Продолжительность испытаний 4 часа.

2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

1. Нагрузку блока снизить до 700...1000 МВт тепловых
2. Турбогенератор ТГ-7 отключить и остановить (или на ВПУ). Отключить выключатель ВТГ-7 и разъединитель РТГ-7
3. Собственные нужды ТГ-7 секции 7РА и 7РБ запитать от 6Т
4. Турбогенератор ТГ-8 работает на рабочем возбуждении, блоки выбега АРВ-СД и АРВ-ВГ введены в работу
5. Собрать схему выдачи сигнала МПА в электрическую часть схемы ступенчатого набора нагрузки дизель-генератор (ДГ) и в схему выбега на двух комплектах автоматики 4ЩАНП-3 для чего: на панель № 2 (левая боковина) ЧЩ АНП-3 подключить контакты дополнительно установленной кнопки, выведенной на БЩУ-4 (п. ПБ-3) на клеммы 10 (091-1) с 18 (09-1) и кл. 10 (01-1) с 36 (031-1), а также панели № 3 (левая боковина) на клеммы 10 (01-2) с 18 (09-2) и 10 (01-2) с 36 (031-2)
6. Питание секций 8РА, 8РБ, 8РНА осуществляется по рабочим вводам
7. На секции 8РА включить следующие механизмы: **4ПН-3, 4**; **4ГЦН-13, 23**; 41КН-73, 82; 42КН-73, 82; 4НГО-81 (насос газоохладителей генератора); 2ЦН-10
8. На секции 8РБ включить следующие механизмы: **4ПН-5**; **4ГЦН-14, 24**; 41КН-83; 42КН-83; 2НПРТ-5; 4НГО-82; ВК-15; 2ЦН-11, 12

9. Питание секций 0,4 кВ перевести на резервное питание:

секцию 164Н от тр-ра 24ТР

-«-74Н-«-21ТР

-«-78Н-«-23ТР

-«-232Н-«-231Т

-«-180Н-«-179Т

-«-225Н-«-226Т

-«-75Н-«-22ТР

-«-167Н-«-24ТР

-«-228Н-«-227Т

-«-165Н-«-24ТР

-«-220Н-«-221Т

-«-208Н-«-208Т

-«-160Н-«-159Т

10. На секции 8РНА включить следующие присоединения: 92ТНЦ, 91 ТИП, 93 ТИП, 224Т, 4НСОС-3 (насос спринклерно-охладительной системы), 4НС-3 (насос охлаждения каналов СУЗ), 4-3ТНПС, 2НА-6

11. Питание резервного шинопровода 0,4 кВ блока № 3 перевести от тр-ра 16ТР, включив секционный рубильник РШ-15, 16ТР и РШ-16, 17ТР. Отключить рубильники 0,4 кВ тр-ров 15, 17 ТР7

12. Расхолаживание реактора в опыте обеспечивают секции 7РА, 7РБ, 7РНА, 7РНБ, для чего на них должны быть включены **один ПН** (4ПН-1 или 4ПН-2), **четыре ГЦН** (4ГЦН-11,21 : 4ГЦН-12,22) и по одному КН 2 подъема 42КН-71(72) и 42КН-81, а также 2НА-4(5) на секциях 7НРБ, 7НРА.

13. В помещении КРУ-6 кВ и БЩУ-4 собрать испытательные схемы для осциллографирования параметров:

- напряжение и ток статора ТГ-8;
- напряжение и ток ротора ТГ-8;
- напряжение и токи вводов секций 8РА, 8РБ, 8РНА;
- скорость вращения ТГ-8;
- токи и обороты ПН и ГЦН;
- момент закрытия стопорных клапанов

14. Для фиксации технологических параметров блока в опытах используется УВС «Скала» и штатные регистрирующие приборы. Перечень в Приложении 1. Перечень параметров, регистрируемых с помощью дополнительно установленных самопишущих приборов, приведен в Приложении 2

15. Закрывать задвижки ручные во избежание заброса воды в КМПЦ по РЦ-2 всем трем подсистемам САОР 4ПВ-3/2, 1, 4, 5; 4ПВ-53, 54, 63, 64, 73, 74; 4ПВ-25, 26, 35, 36, 45, 46; 4ПВ-83, 84.

Расставить людей на контроль открывшейся арматуры и запустившихся механизмов САОР.

3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

1. Перед проведением опыта выполнить пункты 2.1...2.15 настоящей программы
2. Проверить на х.х. (под нагрузкой) дизель-генератор 2ДГ-6 и ввести в «горячий» резерв
3. Вывести из действия схемы АВР секций 8РА, 8РБ ключами ПБ на пульте 2Э БЩУ4
4. Выставить оператора на пульте 1Э, который при увеличении тока ротора ТГ8 больше 3000 А без команды гасит поле ключом гашения поля или по истечении времени 60 с гасит поле по команде руководителя испытаний
5. Снизить нагрузку ТГ-8 до уровня нагрузки собственных нужд по тр-ру 28Т
6. Снять накладку 27Н «Закрытие СК Т-8» при отключении В2-6Т или ВТГ-8 на панели 24РГ
7. Отключить трансформаторный выключатель В2-6Т с пульта 1Э
8. По команде руководителя испытаний включаются осциллографы и ключом управления электромагнитных защитных устройств на панели 6Т выбиваются защитные устройства ТГ-8 и выдается сигнал МПА в электрическую часть доподстанции выводящей кнопкой на п. ПБ 3

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА

При этом возбужденный генератор будет выбегать совместно с электродвигателями секции 8РА, 8РБ, подпитывая последние и поддерживая их электромагнитный момент (а следовательно, и производительность).

На секции 8РНА произойдет отключение секционных выключателей (1ВС-2ВС) и отключение всех механизмов (кроме неотключаемой ступени), а также запуск 2ДГ-6.

После разворота 2ДГ-6 и выхода на секцию произойдет ступенчатый пуск механизмов секции 8РНА по программе МПА.

Вопросы по предыдущей лекции

- Что такое совместный выбег ТГ с агрегатами СН?
- Зачем нужен СВ на АЭС?
- Зачем нужен СВ на ТЭС?
- Какие механизмы должны были участвовать в СВ при испытаниях на 4 блоке ЧАЭС?
- Сколько всего ПЭН и ГЦН должны были охлаждать реактор при испытаниях?

Вопросы по предыдущей лекции

- Рассматривается штатная работа блока АЭС на полной мощности. Каковы возможные исходные причины начала СВ?
- Назовите условия существования СВ.
- Назовите условия прекращения СВ.
- Что происходит после СВ?

Вопросы по предыдущей лекции

- За счёт чего происходит заброс частоты при СВ?
- Оцените длительность СВ.
- Сколько времени при этом подаёт воду ГЦН? ПЭН?
- Сколько времени при полном обесточивании (и отсутствии СВ) подаёт воду ГЦН? ПЭН?

Вопросы по предыдущей лекции

- Какова предыстория испытаний СВ?
- С какой целью проводились испытания на 4 блоке ЧАЭС 25-26 апреля 1986 года?

25 апреля 1986 г.

01.06

начало разгрузки энергоблока;
ОЗР равен 31 стержню ручного регулирования (РР);

03.47

тепловая мощность реактора 1600 МВт;

с 04.13 до 12.36

поочередное измерение характеристик систем регулирования и
вибрационных характеристик ТГ-7,8 при постоянной тепловой мощности
реактора 1500 МВт;

25 апреля 1986 г.

07.10

ОЗР равен 13,2 стержня РР;

13.05

отключен от сети ТГ-7;

14.00

САОР отключена от КМПЦ;

14.00

отсрочка выполнения программы испытаний по требованию диспетчера Киевэнерго;

25 апреля 1986 г.

15.20

ОЗР равен 16,8 стержней РР;

18.50

нагрузка оборудования собственных нужд, не участвующего в испытаниях, переведена на электропитание от рабочего трансформатора Т6;

23.10

продолжена разгрузка энергоблока;
ОЗР равен 26 стержней РР;

26 апреля 1986 г.

00.25

тепловая мощность реактора составила 720 МВт;

00.28

при тепловой мощности реактора около 500 МВт начался переход с системы локального автоматического регулирования мощности (ЛАР) на автоматический регулятор мощности основного диапазона (1АР, 2АР).

В процессе перехода допущено не предусмотренное программой снижение тепловой мощности реактора до 30 МВт (нейтронной мощности до нуля).

26 апреля 1986 г.

00.34.03"

Начат подъём мощности;
аварийные отклонения уровня в барабан-сепараторах;

00.43.37"

уставка АЗ по снижению давления в барабан-сепараторах переведена с 55 на 50 атм;

с 00.39.32" до 00.43.35"

персоналом блокирован сигнал АЗ по останову двух ТГ;

с 00.41 до 01.16

отключение от сети ТГ-8 для снятия вибрационных характеристик на холостом ходу;

26 апреля 1986 г.

01.03

тепловая мощность реактора поднята до 200 МВт и застabilизирована;
включен в работу седьмой ГЦН;

01.07

включен в работу восьмой ГЦН;

01.23.04"

подана команда "Осциллограф включен",
закрыты стопорно-регулирующие клапаны (СРК) турбины № 8.
Начался выбег четырёх ГЦН;

26 апреля 1986 г.

01.23.10"

нажатие кнопки МПА;

01.23.40"

нажатие кнопки АЗ-5. Стержни АЗ и РР начали движение в активную зону реактора;

01.23.43"

появились сигналы аварийных защит по периоду разгона (АЗС) - период менее 20 с., а также по превышению мощности (АЗМ) - мощность более 530 МВт;

01.23.46"

отключение первой пары "выбегающих" ГЦН;

01.23.46,5"

отключение второй пары "выбегающих" ГЦН;

26 апреля 1986 г.

01.23.47"

резкое снижение расходов (на 40%) ГЦН, не участвующих в выбеге,
недостоверное показание расходов ГЦН, участвующих в выбеге;

резкое увеличение давления в БС;

резкий подъём уровня в БС;

сигналы "неисправность измерительной части" обоих автоматических регуляторов основного диапазона (1АР, 2АР);

01.23.48"

восстановление расходов на ГЦН, не участвующих в выбеге, до близких к исходным;

на выбегающих ГЦН левой стороны восстановление расходов на 15 % ниже исходного;

на выбегающих ГЦН правой стороны восстановление расхода на 10 % ниже исходного;

дальнейший рост давления в БС (левая сторона – 75 атм, правая сторона – 88 атм),

рост уровня в БС:

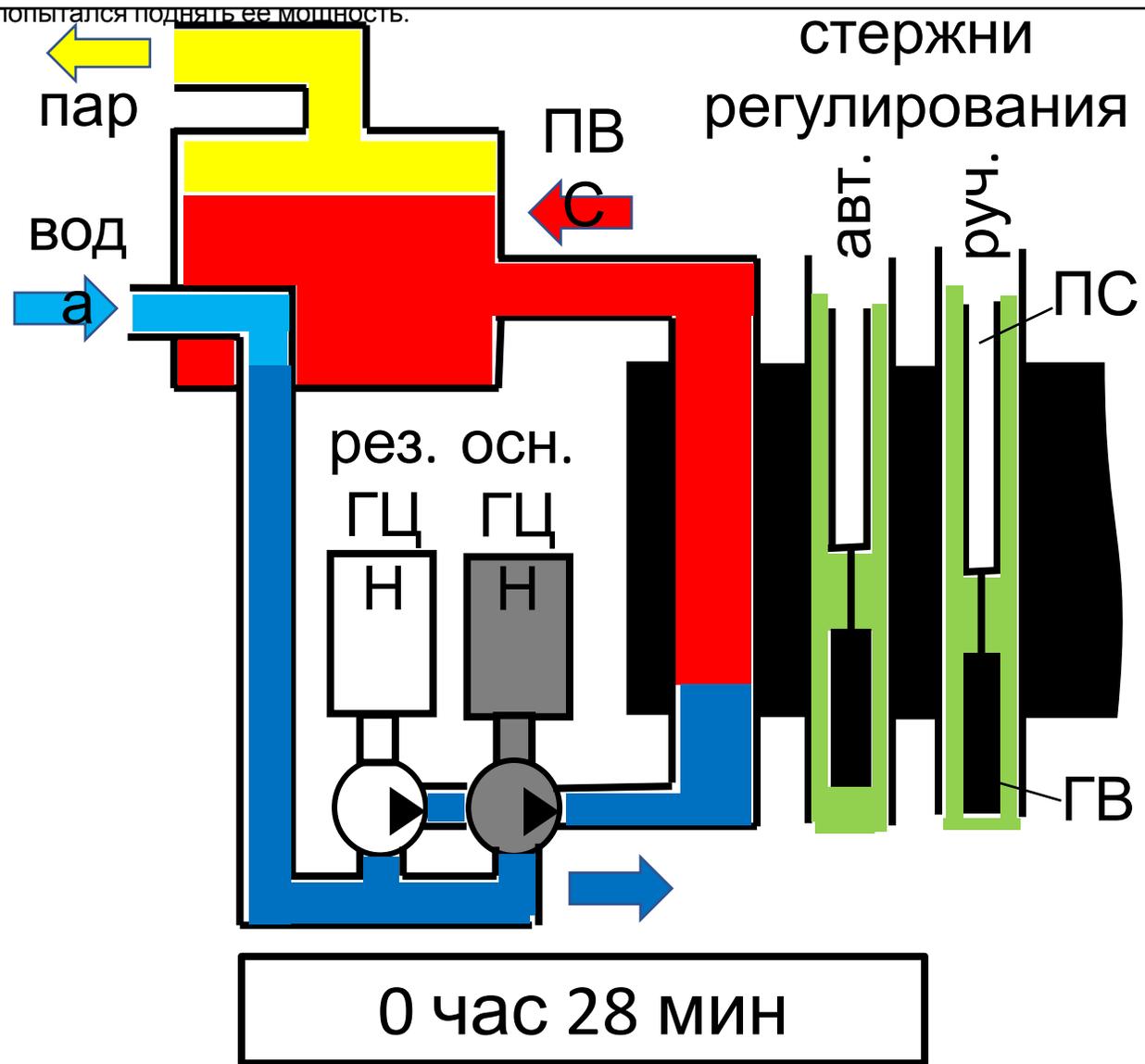
26 апреля 1986 г.

01.23.49"

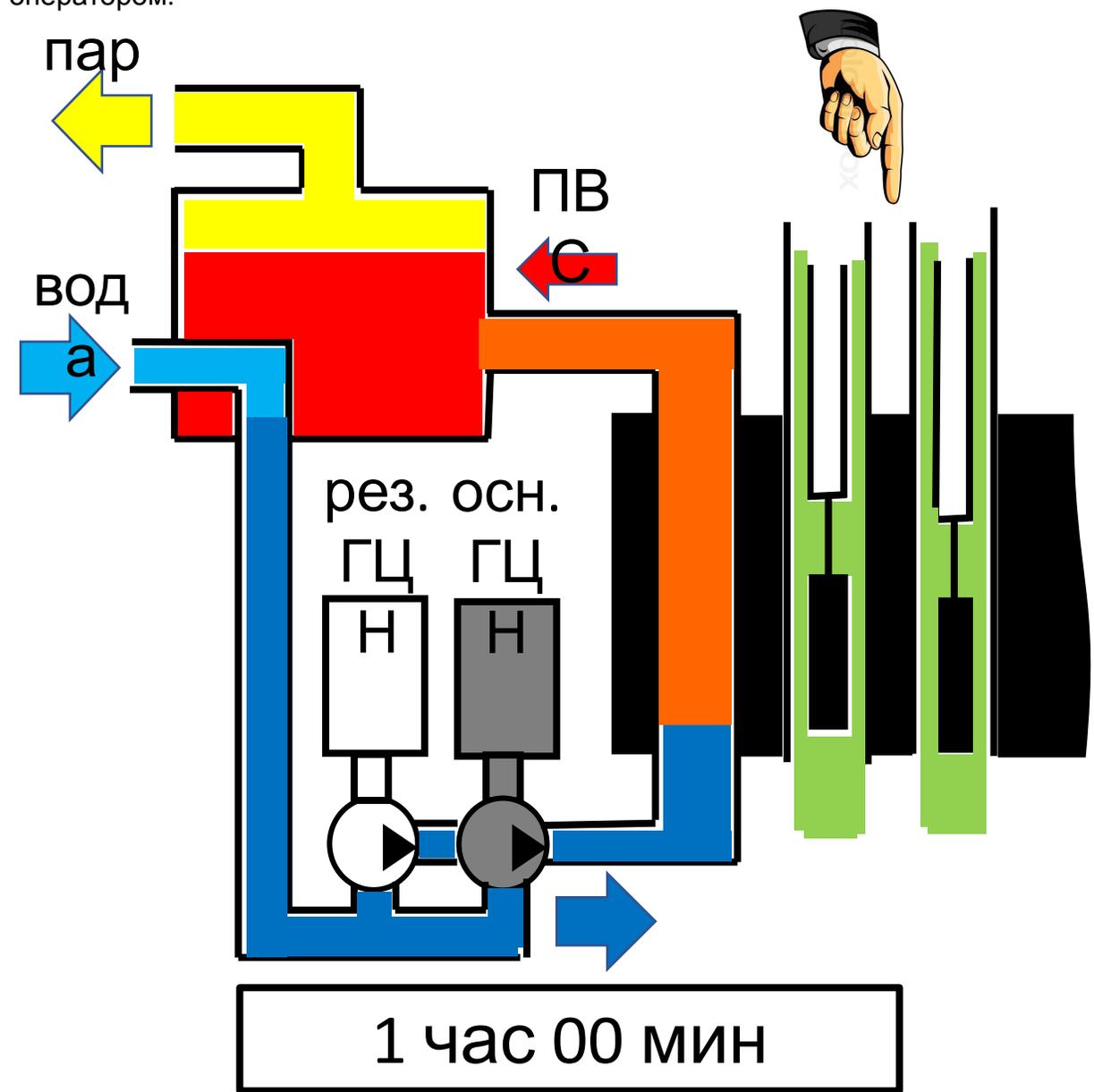
сигнал аварийной защиты "Повышение давления в РП (разрыв ТК);
сигнал "Нет напряжения = 48 В" (снято питание муфт сервоприводов СУЗ);
сигналы "Неисправность исполнительной части 1АР, 2АР".

Из записи в оперативном журнале старшего инженера управления реактором: **"01 ч. 24 мин. Сильные удары, стержни СУЗ остановились, не дойдя до НК (нижних концевиков). Выведен ключ питания муфт"**.

Мощность достигла уровня, при котором управление полагается переключить с локального на общее автоматическое регулирование. В этот момент оператор, не обладавший достаточным опытом работы в таких режимах, допустил ошибку — не дал системе управления команду «держать мощность». В результате мощность резко упала до 30 МВт, из-за чего кипение в каналах ослабло и началось ксеноновое отравление активной зоны. По правилам эксплуатации в такой ситуации следует заглушить реактор. Но тогда не состоялись бы испытания. И персонал не только не остановил реакцию, но, напротив, попытался поднять ее мощность.



Мощность удалось повысить лишь до 200 МВт вместо предписанных программой 700—1000 МВт. Из-за продолжающегося отравления увеличить ее больше не удалось, хотя стержни автоматического регулирования были почти целиком выведены из активной зоны, а стержни ручного регулирования подняты оператором.



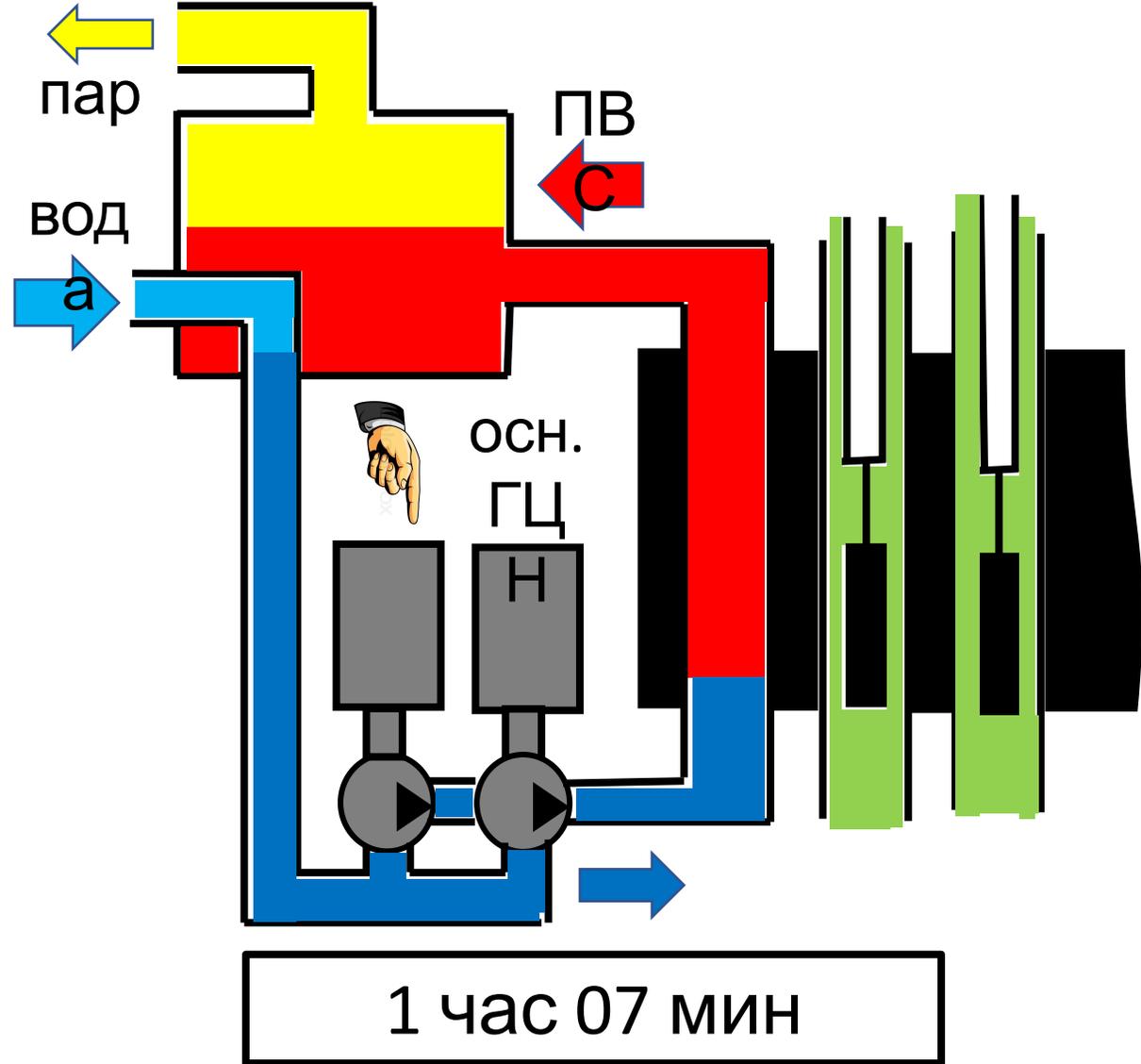
0 час 28 мин

- Мощность достигла уровня, при котором управление полагается переключить с локального на общее автоматическое регулирование.
- В этот момент оператор, не обладавший достаточным опытом работы в таких режимах, допустил ошибку — не дал системе управления команду «держатъ мощность».
- В результате мощность резко упала до 30 МВт, из-за чего кипение в каналах ослабло и началось ксеноновое отравление активной зоны.
- По правилам эксплуатации в такой ситуации следует заглушить реактор. Но тогда не состоялись бы испытания. **И персонал не только не остановил реакцию, но**

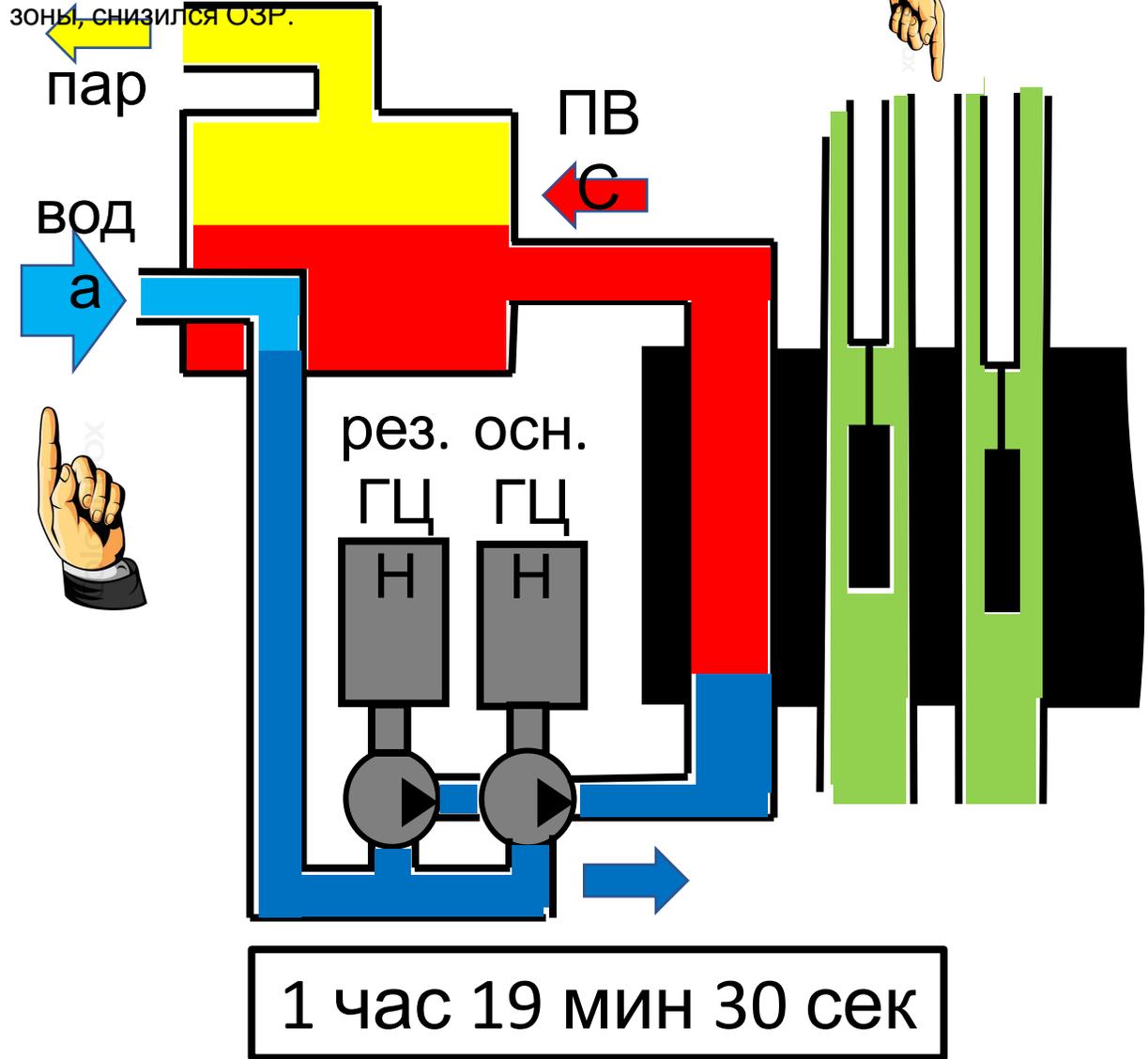
1 час 00 мин

- Мощность удалось повысить лишь **до 200 МВт** вместо предписанных программой 700—1000 МВт.
- Из-за продолжающегося отравления увеличить ее больше не удавалось, хотя стержни автоматического регулирования были почти целиком выведены из активной зоны, а стержни ручного регулирования подняты оператором.

1 ч. 03 мин. В дополнение к 6 основным ГЦН подключен один резервный ГЦН.
1 ч. 07 мин. Пущен второй резервный ГЦН, заработали 8 ГЦН вместо шести. Это увеличило поток воды через каналы настолько, что возникла опасность кавитационного срыва ГЦН, а главное — усилило охлаждение и еще больше снизило и без того слабое парообразование. Одновременно уровень воды в барабанах-сепараторах опустился до аварийной отметки. Работа блока стала крайне неустойчивой.



1 ч. 19 мин. Поскольку уровень воды в барабанах-сепараторах был опасно низким, оператор увеличил подачу питательной воды. Также персонал заблокировал сигналы аварийной остановки реактора по недостаточному уровню воды и давлению пара.
1 ч. 19 мин. 30 с. Уровень воды в сепараторах начал расти. Однако теперь из-за притока холодной питательной воды в активную зону парообразование там практически прекратилось. Стержни АР и РР практически выведены из активной зоны, снизился ОЗР.



1 час 03 мин

- Началась непосредственная подготовка к эксперименту.
- В дополнение к 6 основным ГЦН подключен первый из двух резервных.
- Резервные ГЦН было решено запустить, чтобы после окончательной остановки выбегающего турбогенератора, питающего энергией 4 ГЦН, остальные 2 ГЦН вместе с двумя резервными (включенные в общую электросеть станции) продолжали надежно охлаждать активную зону.

1 час 07 мин

- Пущен второй резервный ГЦН, заработали 8 ГЦН вместо шести.
- Это увеличило поток воды через каналы настолько, что возникла опасность кавитационного срыва ГЦН, а главное — усилило охлаждение и еще больше снизило и без того слабое парообразование.
- Одновременно уровень воды в барабанах-сепараторах опустился до аварийной отметки.

1 час 19 мин

- Поскольку уровень воды в барабанах-сепараторах был опасно низким, оператор увеличил подачу питательной воды (конденсата).
- Одновременно персонал заблокировал сигналы аварийной остановки реактора по недостаточному уровню воды и давлению пара.
- Такое отступление от регламента эксплуатации программой испытаний не предусматривалось.

1 час 19 мин 30 сек

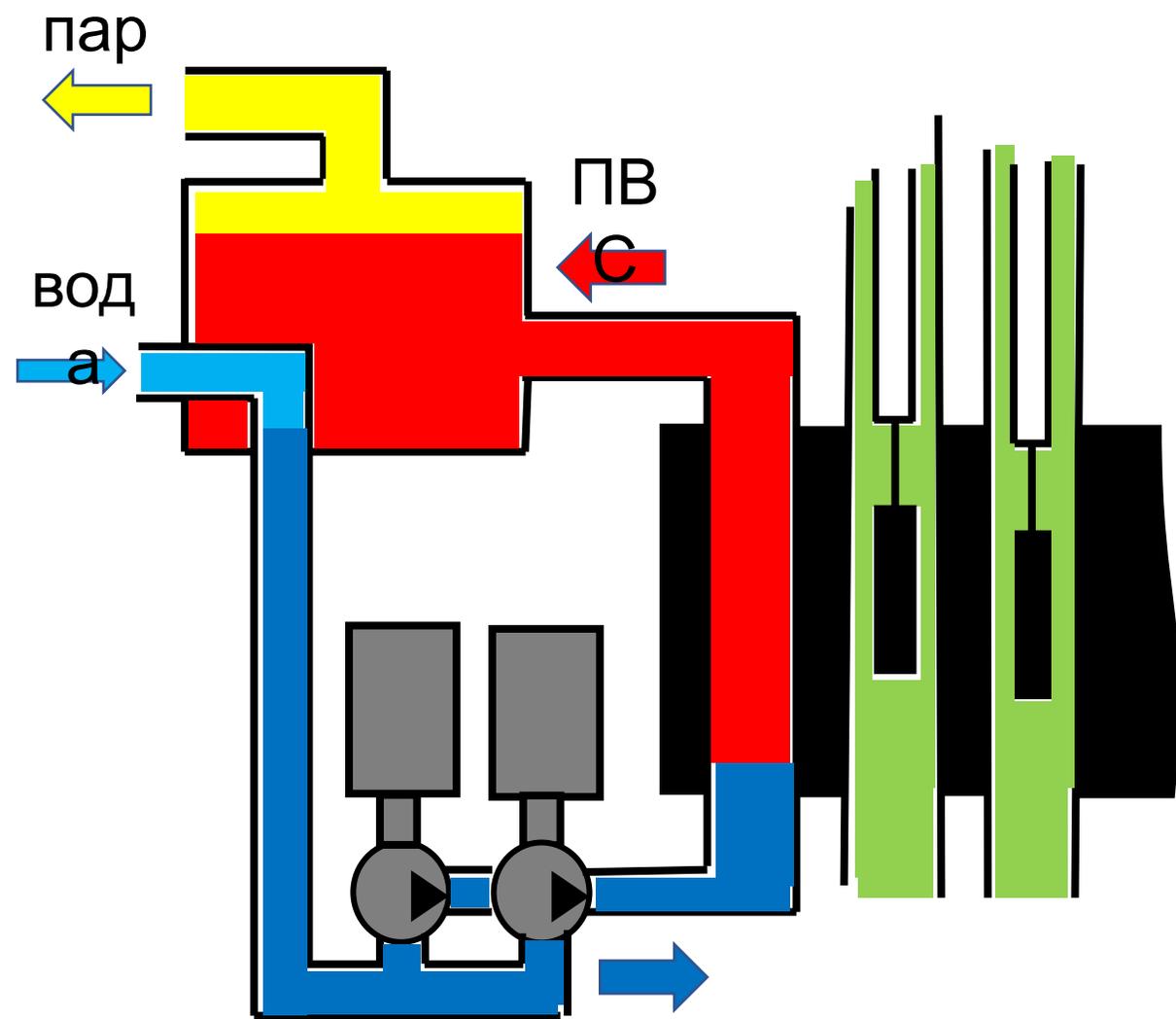
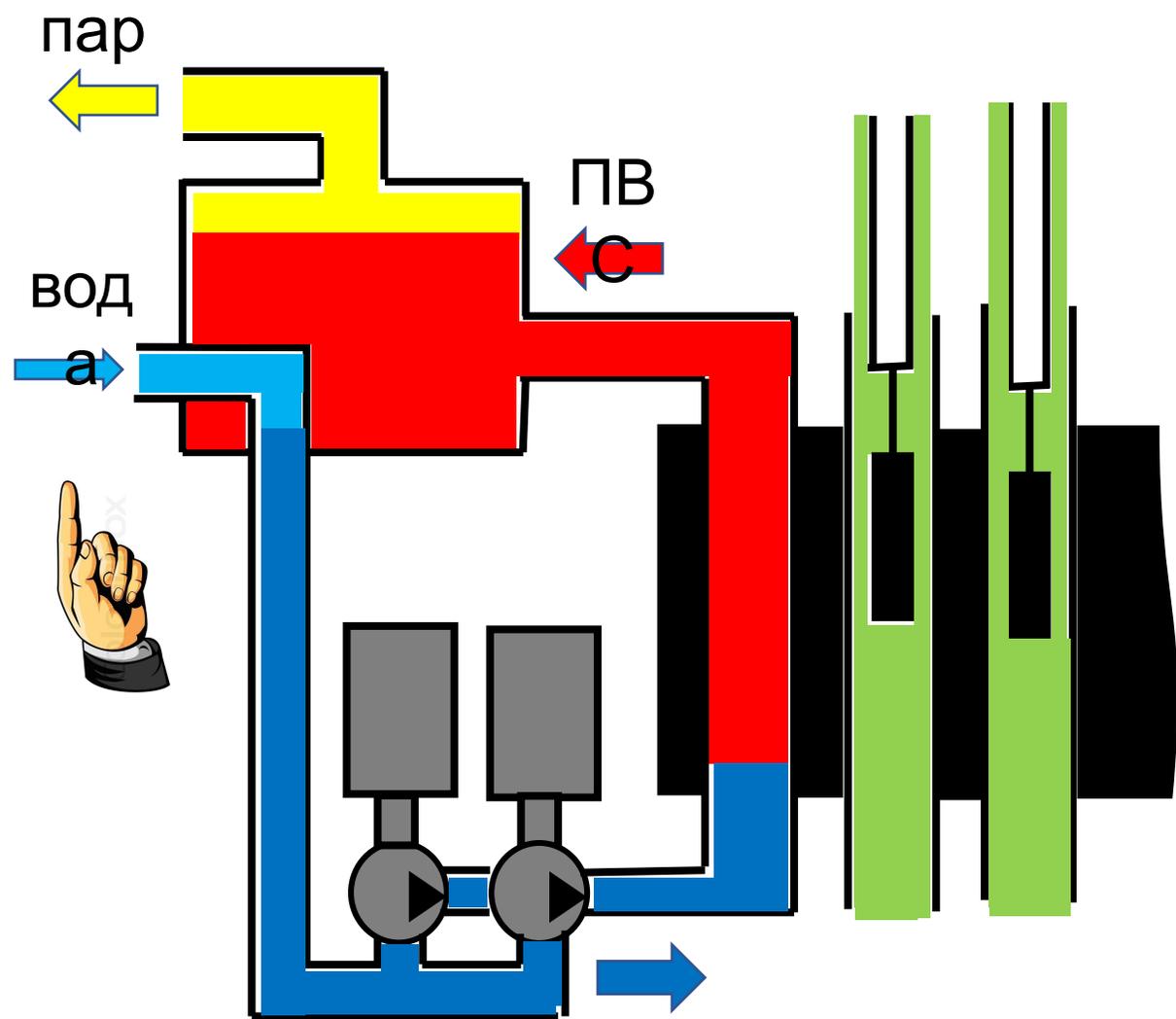
- Уровень воды в сепараторах начал расти.
- Однако теперь из-за притока относительно холодной питательной воды в активную зону парообразование там практически прекратилось.
- Между тем стержни АР, препятствуя снижению мощности, окончательно вышли из активной зоны, а т.к. и этого оказалось мало, оператор поднял выше и стержни РР. Все это недопустимо снизило ОЗР.

Почему плохо, когда в реакторе мало пара?

- При отсутствии пара в каналах РБМК цепная реакция становится очень чувствительной к тепловым возмущениям.
- В этих условиях увеличение содержания пара в теплоносителе на 1% по массе вызывает прирост объема пара на 20%.
- Это соотношение во много раз больше, чем при обычной доле пара в каналах.
- Вклад положительного парового коэффициента реактивности в общий мощностной коэффициент может стать настолько большим, что начнется саморазгон.

Почему опасно, когда стержни подняты?

- Когда конец стержня находится вблизи границы активной зоны (внизу или вверху), его окружает меньший объем топлива, а следовательно, **его движение слабей влияет на цепную реакцию.**
- Реактор хорошо откликается на перемещение стержней, лишь когда их концы близки к центру зоны.
- Значит, при полностью поднятых стержнях заглушить реакцию быстро не удастся: ведь высота активной зоны 7 м, а скорость введения стержней — 40 см/с.
- **Вот почему так важно оставлять в зоне достаточное количество полуопущенных стержней.**



1 час 21 мин 50 сек

- Уровень воды в барабанах-сепараторах значительно повысился.
- Поскольку это было достигнуто за счет 4-кратного увеличения расхода питательной воды, оператор теперь резко сократил ее подачу.

1 час 22 мин 10 сек

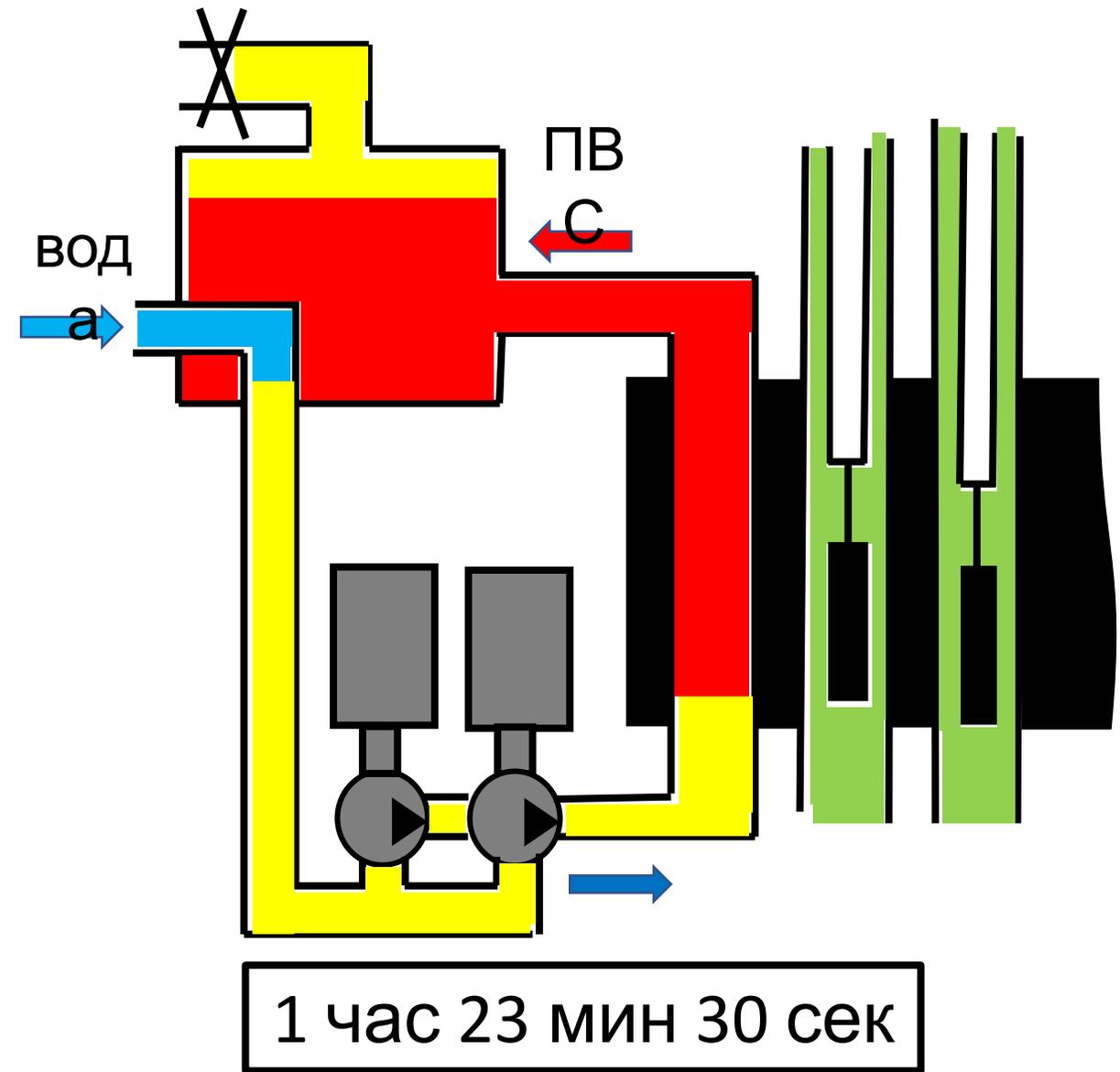
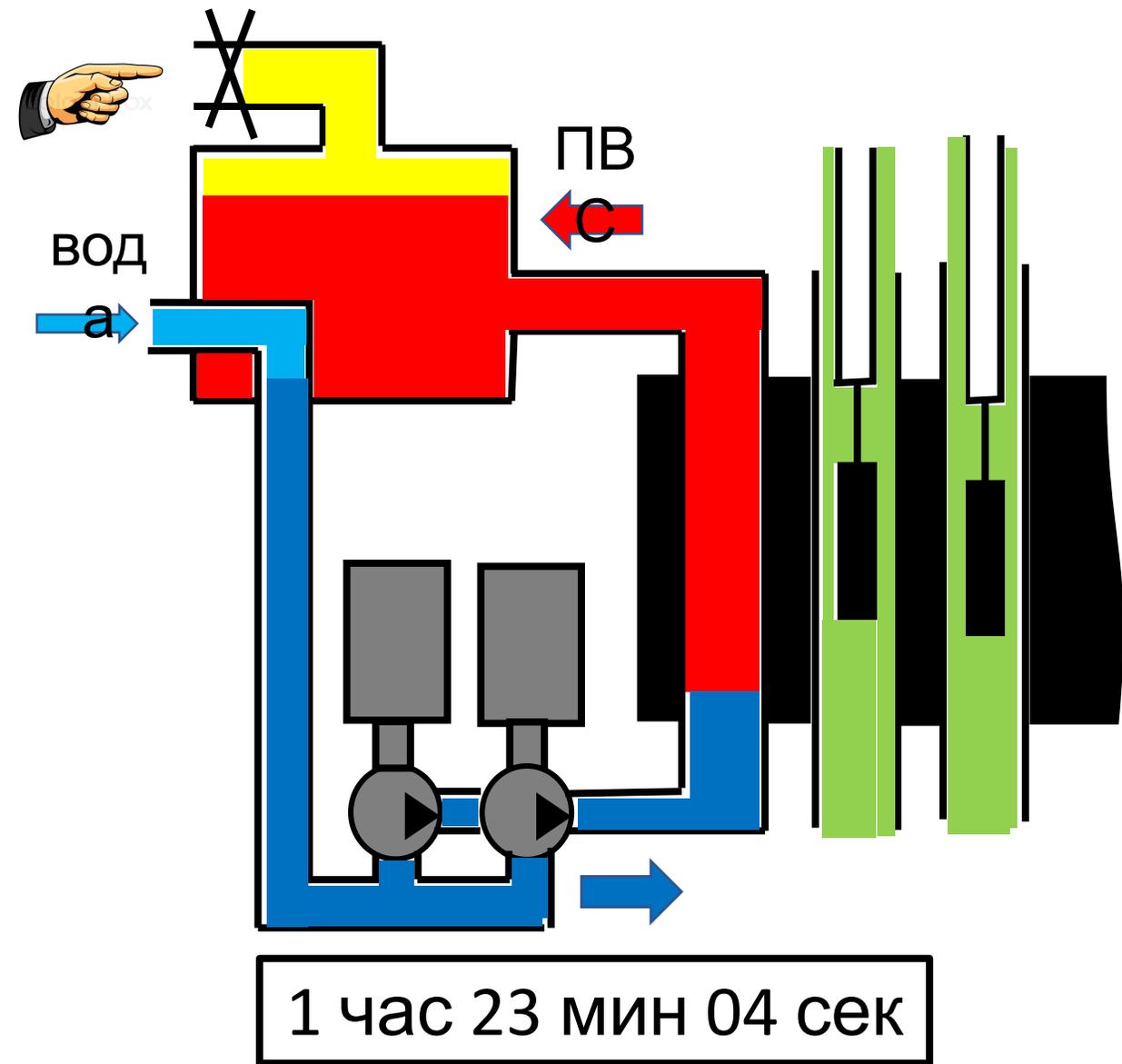
- В контур стало поступать меньше недогретой воды, и кипение немного усилилось, а уровень в сепараторах стабилизировался.
- Разумеется, при этом несколько возросла реактивность.
- Но стержни автоматического регулирования, слегка опустившись, тут же скомпенсировали этот рост.

1 час 22 мин 30 сек

- Расход питательной воды снизился больше, чем требовалось, — до $2/3$ нормального.
- Этого не удалось предотвратить из-за недостаточной точности системы управления, не рассчитанной на работу в таком нестандартном режиме.
- Станционная ЭВМ «Скала» распечатала параметры процессов в активной зоне и положения регулирующих стержней.
- Согласно распечатке ОЗР был уже столь мал, что полагалось немедленно заглушить реактор. Однако персонал, занятый попытками стабилизировать блок, видимо, просто не успел изучить эти данные.

1 час 22 мин 45 сек

- Расход питательной воды и содержание пара в каналах наконец выровнялись, а давление начало медленно расти.
- Реактор, казалось, возвращался в стабильный режим, и было решено начать эксперимент

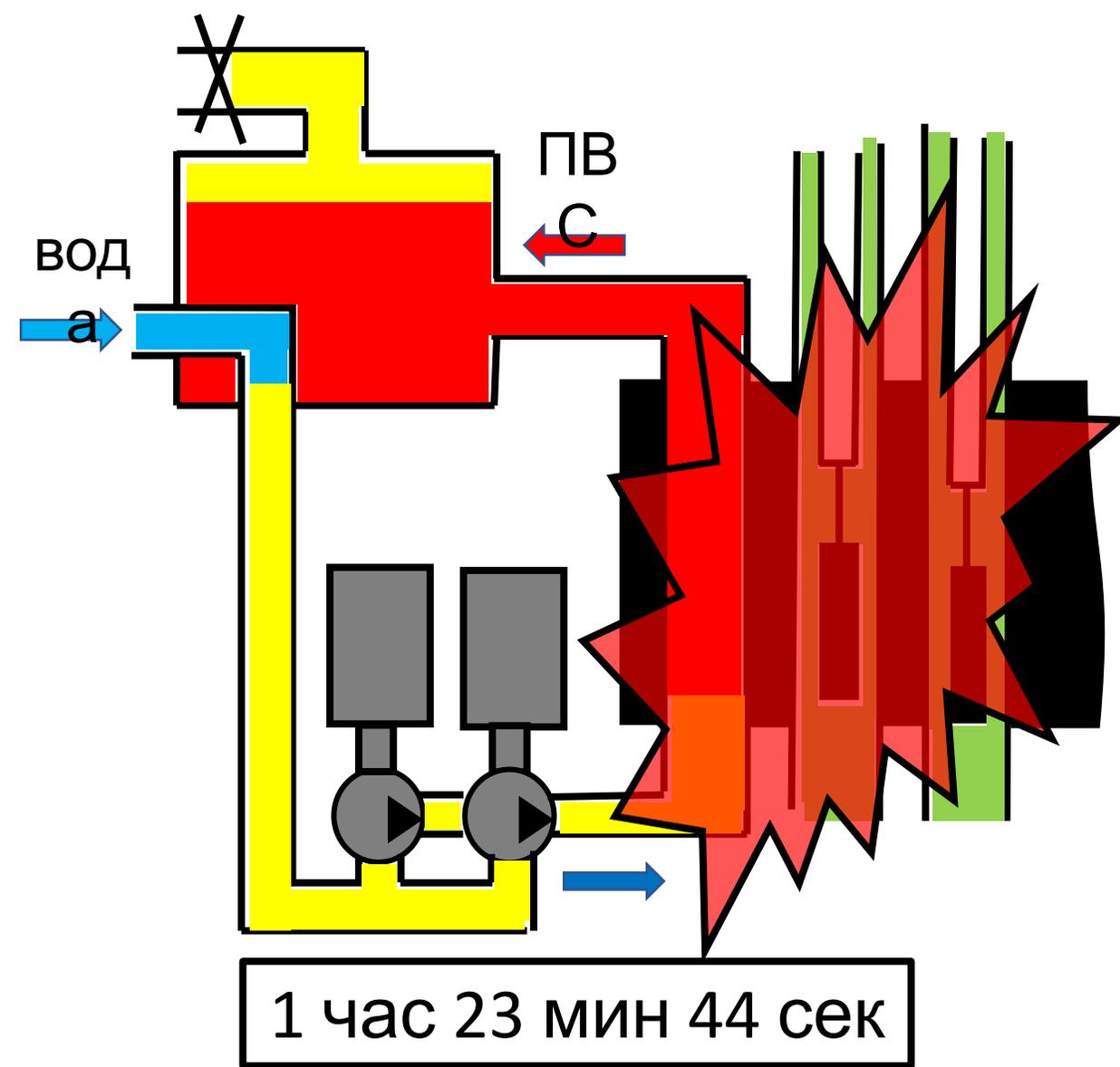
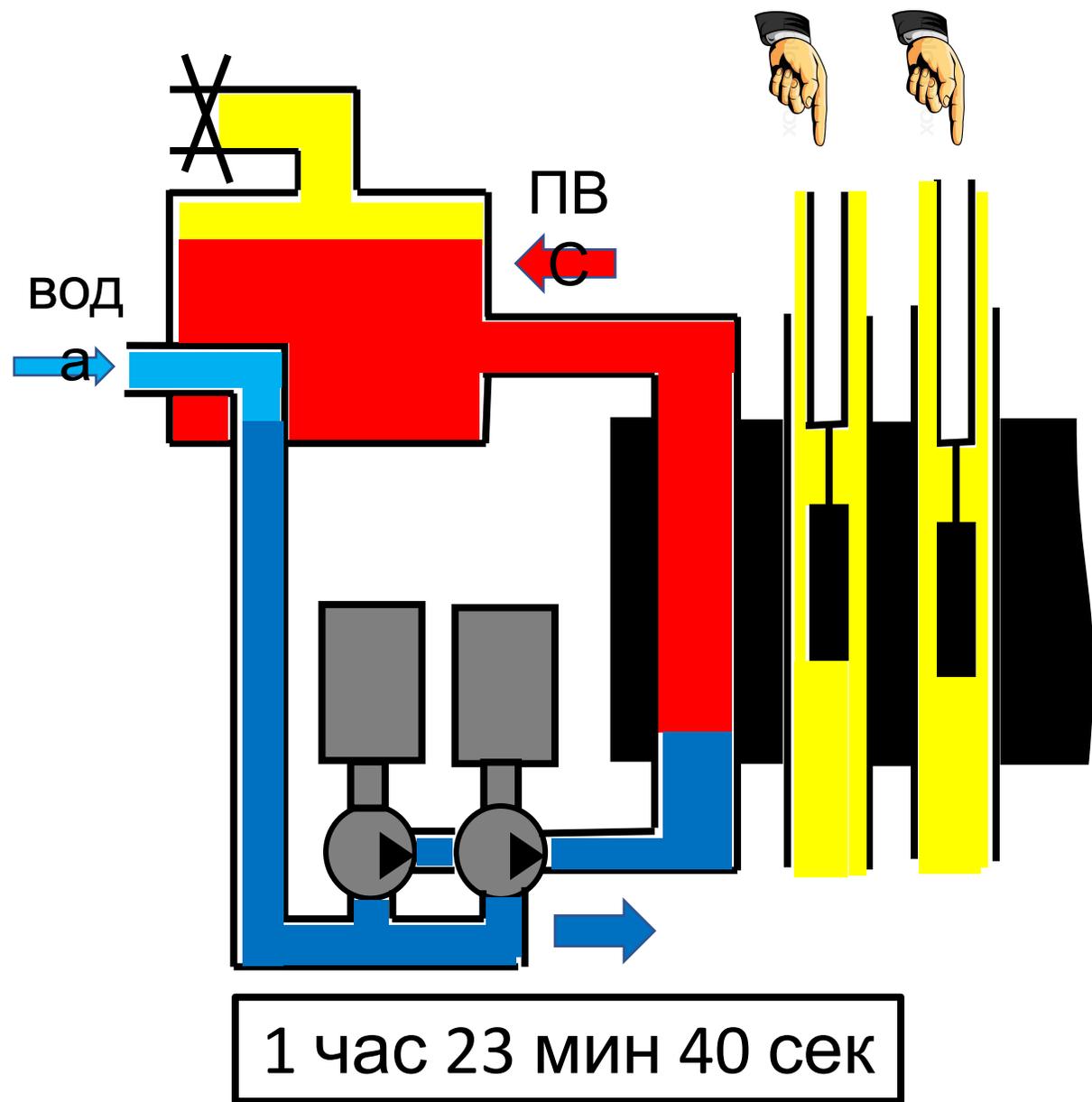


1 час 23 мин 04 сек

- Перекрыта подача пара на турбогенератор № 8.
- В нарушение программы и регламента, был заблокирован сигнал аварийной остановки реактора при отключении обеих турбин.
- Очевидно, персонал хотел в случае необходимости повторить испытания (если бы реактор заглушили, это бы не удалось).
- 4 ГЦН, работающие от «выбегającego» генератора, начали сбавлять обороты.
- Поток воды уменьшился.
- Охлаждение зоны становилось все слабее.
- Температура воды у входа в реактор

1 час 23 мин 30 сек

- Кипение усилилось.
- Количество пара в активной зоне возросло.
- Реактивность и мощность стали постепенно повышаться.
- Стержни автоматического регулирования пошли вниз, но не смогли стабилизировать реакцию.
- Мощность продолжала нарастать.



1 час 23 мин 40 сек

- Начальник смены дал команду нажать кнопку АЗ-5 — сигнал максимальной аварийной защиты, по которому в зону немедленно вводятся все стержни-поглотители.
- Произошел почти мгновенный скачок мощности и парообразования.
- Стержни остановились, пройдя лишь 2-3 метра.
- Оператор отключил удерживающие муфты, чтобы стержни упали под действием собственной тяжести.
- Но они уже не шевелились.
- Стал положительным общий коэффициент реактивности.
- Начался саморазгон.

1 час 23 мин 44 сек

- Мощность достигла 530 МВт и продолжала быстро расти: коэффициент размножения нейтронов превысил единицу.
- Сработали две системы автоматической защиты — по уровню мощности и по скорости ее роста, но это ничего не изменило, так как сигнал АЗ-5, который посылает каждая из них, уже был дан оператором.
- Мощность цепной реакции в 100 раз превысила номинальную.
- За доли секунды твэлы раскалились.
- Частицы топлива, разорвав циркониевые оболочки, разлетелись и застряли в графите.
- Давление в каналах многократно возросло.
- Вода, вместо того чтобы втекать (снизу) в активную зону, начала вытекать из нее.
- **Произошел взрыв.**

Положительный паровой коэффициент реактивности

- Коэффициент размножения нейтронов в РБМК зависит от соотношения объемов воды и пара в его каналах: чем больше доля пара, тем выше реактивность.
- Паровой коэффициент реактивности РБМК положителен, то есть если реакция усиливается, то в каналах образуется больше пара, отчего коэффициент размножения нейтронов увеличится, реакция еще больше усилится и т.д.

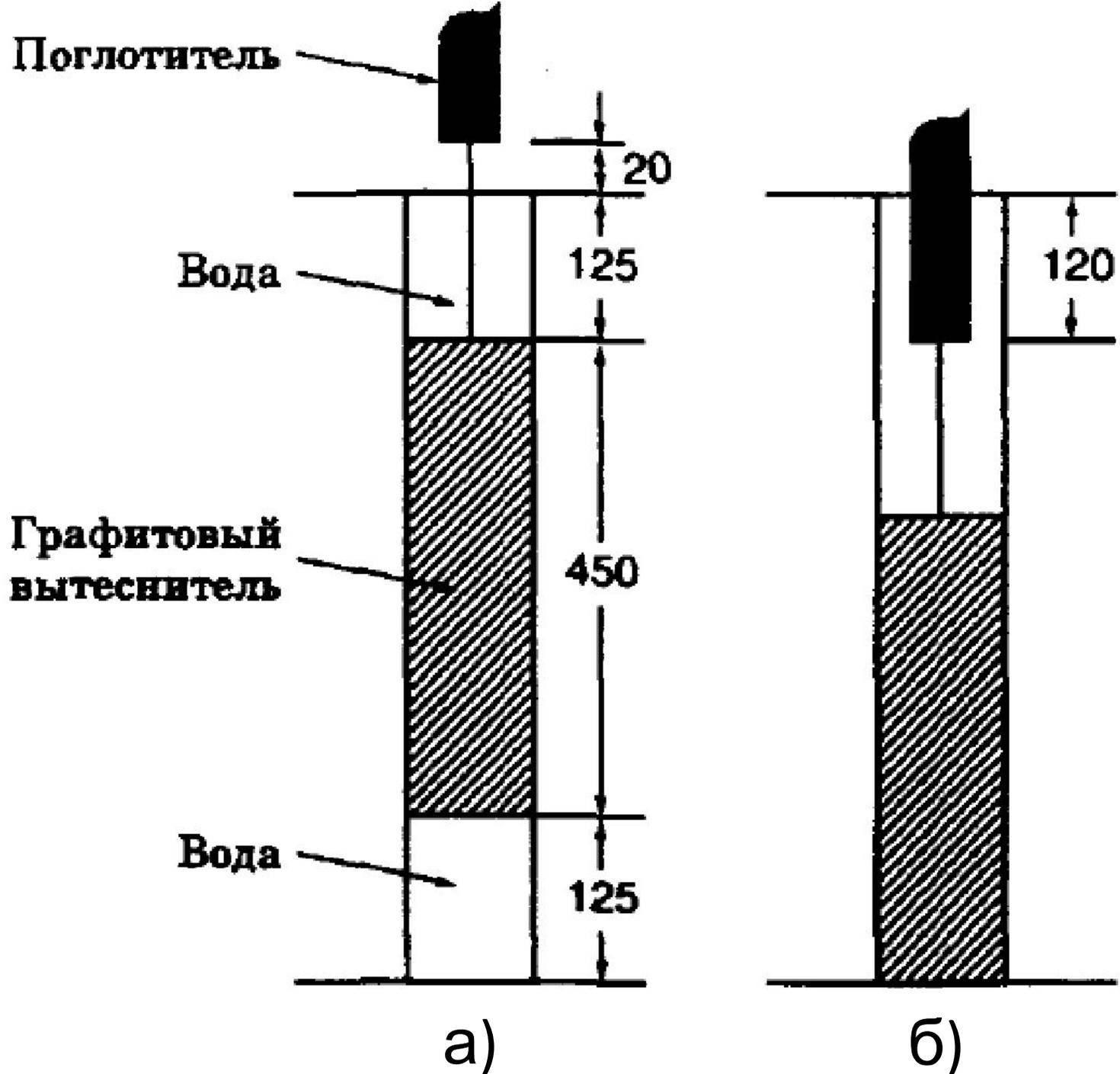
Концевой эффект

- На расстоянии 1,5 м под каждым стержнем подвешен **вытеснитель** — заполненный графитом 4,5-метровый алюминиевый цилиндр.
- Назначение вытеснителя — сделать реакцию более чувствительной к движению конца стержня.
Пояснение. **Когда поглощающий стержень, опускаясь, сменяет графитовый вытеснитель, контраст оказывается больше, чем при появлении стержня на месте воды, также способной в определенной мере поглощать нейтроны.**
- Однако при выборе размеров «вытеснителей» и подвески конструкторы не учли все побочные эффекты.
- У стержней, до предела поднятых вверх, нижние концы «вытеснителей» располагаются на 1,25 м выше нижней границы активной зоны.
В этой самой нижней части каналов находилась вода, еще почти не содержащая пара.

Крайнее верхнее
положение стержня
СУЗ

а) до
усовершенствования

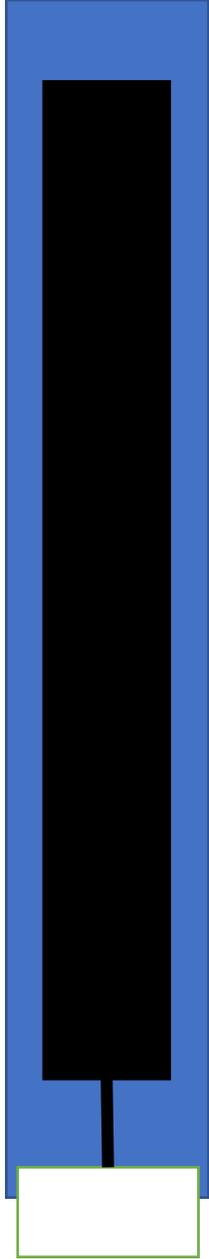
б) после
усовершенствования



7 м

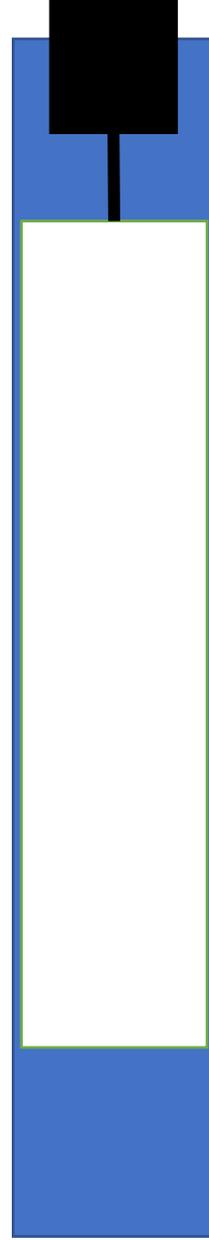


6,2 м

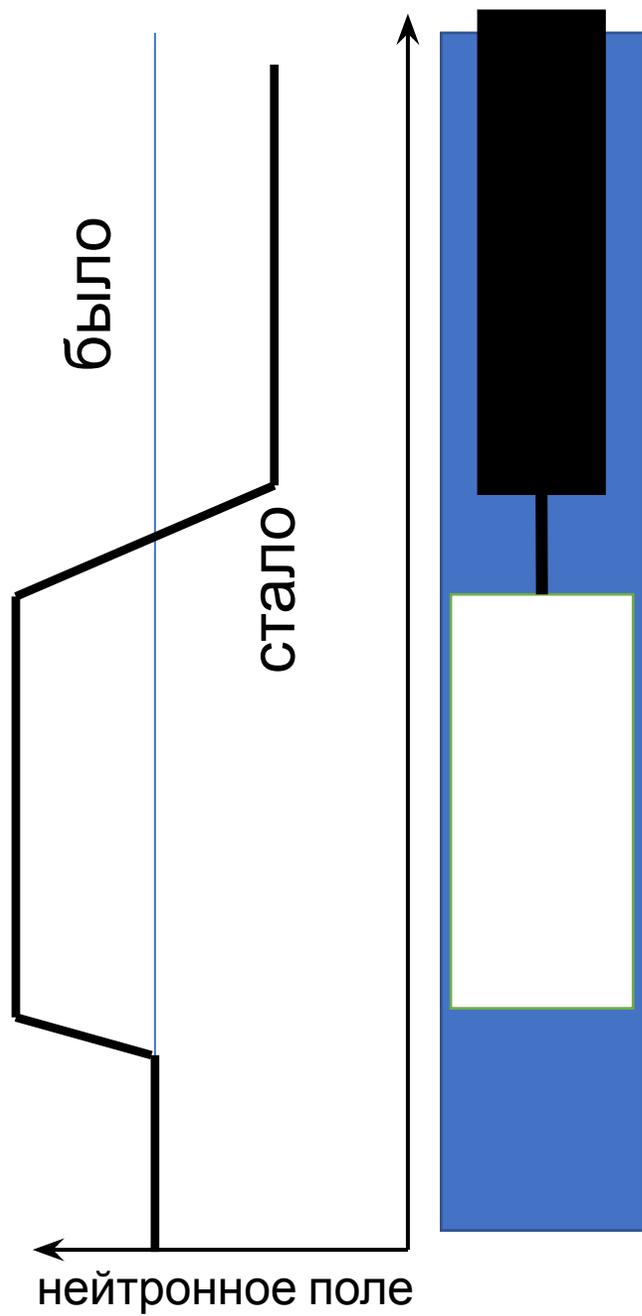
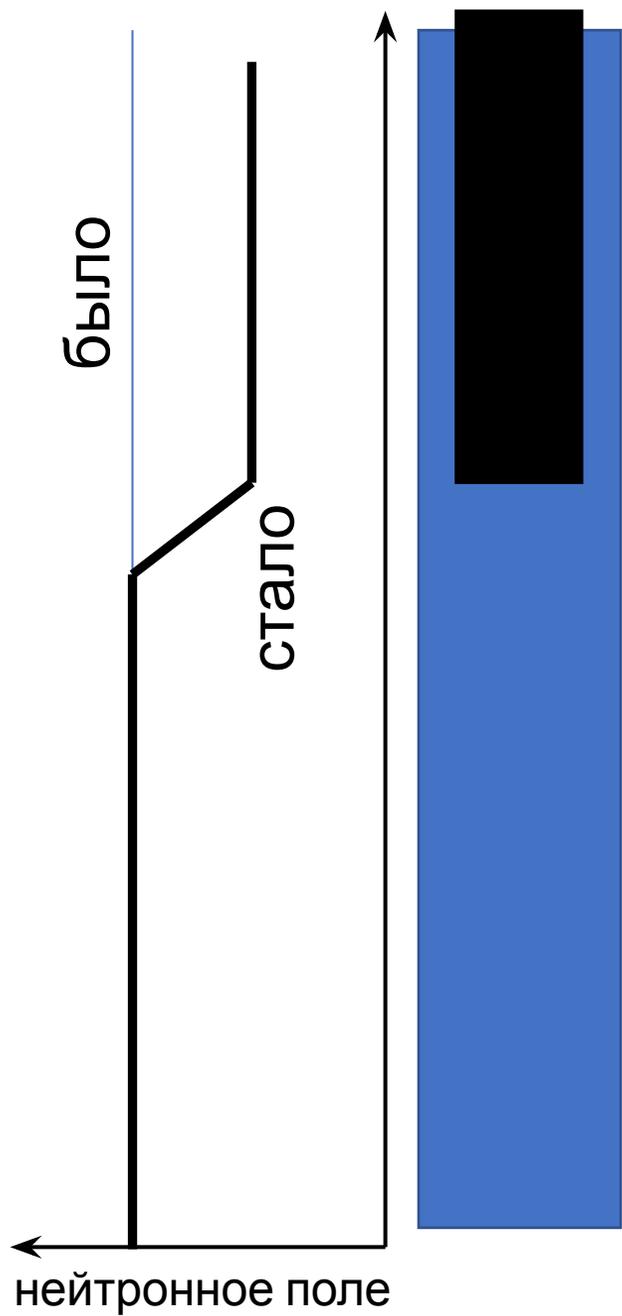


крайнее нижнее
положение

4,5 м



крайнее верхнее
положение

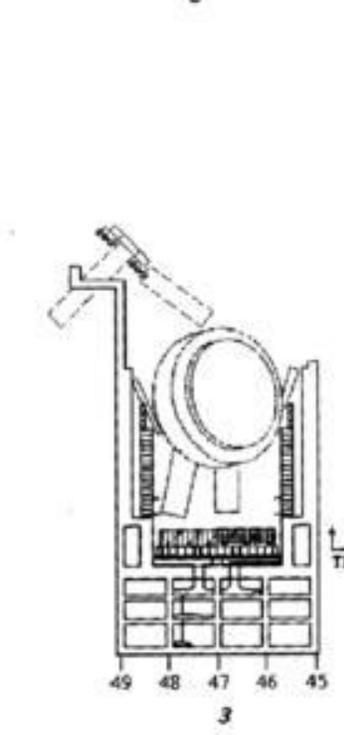
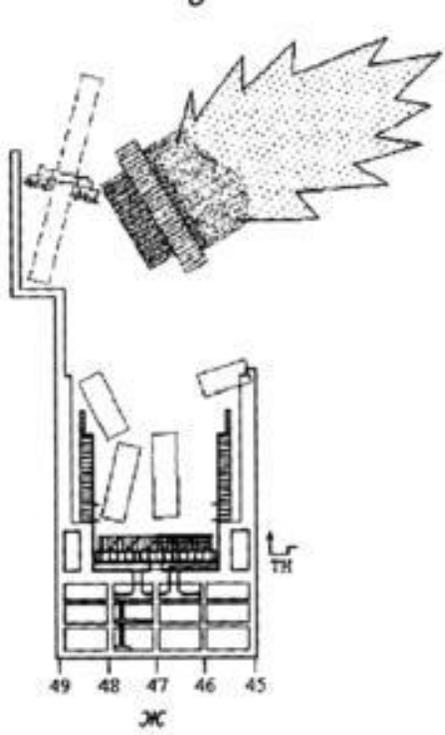
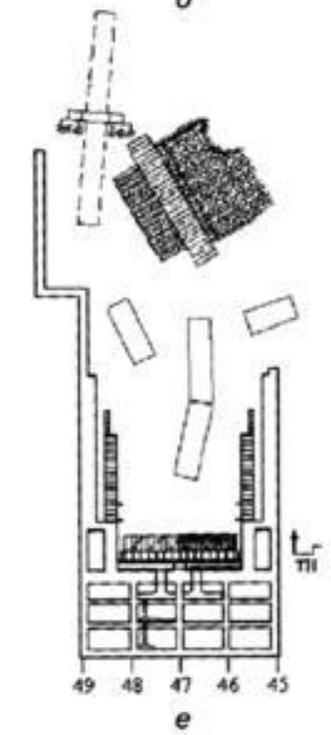
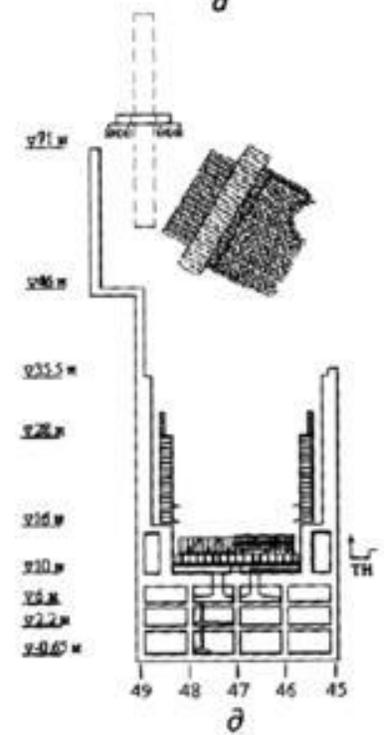
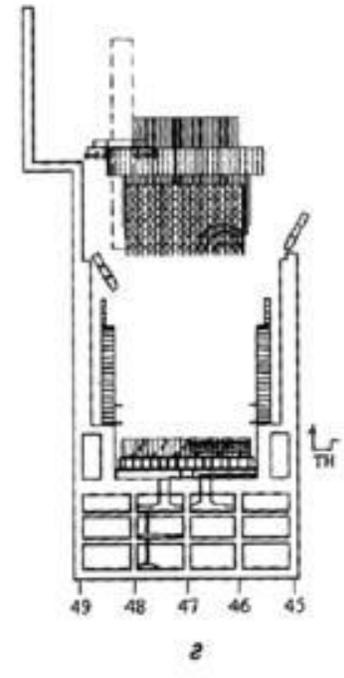
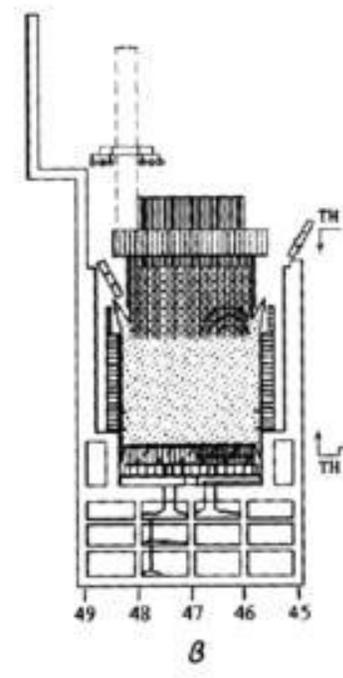
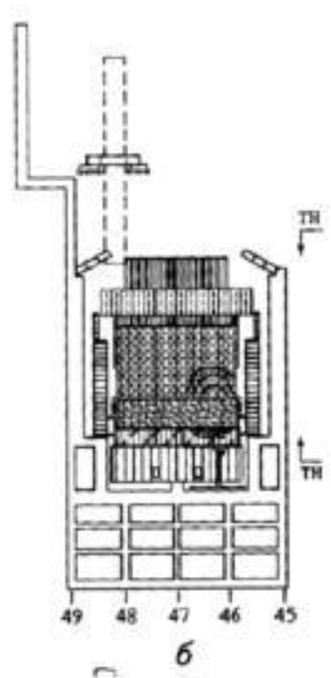
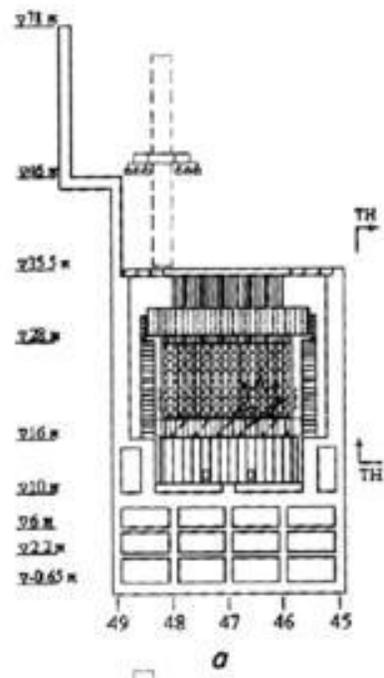


Концевой эффект

- Когда по команде АЗ-5 все стержни двинулись вниз, их концы были еще далеко вверху, а концы «вытеснителей» уже дошли до низа активной зоны и вытеснили из каналов находившуюся там воду.
- С физической точки зрения это было эквивалентно резкому приросту объема пара — ведь для ядерной реакции безразлично, чем вытесняется вода из каналов — паром или графитом.
- Теперь уже ничто не могло удержать действия положительного парового коэффициента реактивности.
- Проблема состояла в том, что не была предусмотрена ситуация, когда практически все стержни из крайнего верхнего положения одновременно пойдут вниз.

- После взрыва реактор перестал существовать как управляемая система.
- Давление пара разрушило часть каналов и ведущие от них паропроводы над реактором.
- Давление упало, вода вновь потекла по контуру охлаждения, но теперь она поступала не только к твэлам, но и к графитовой кладке.
- Начались химические реакции воды и пара с нагретым графитом и цирконием, в ходе которых образуются горючие газы — водород и окись углерода.
- Из-за бурного выделения газов давление вновь подскочило. Накрывавшая зону металлическая плита массой более 1000 т

- Разрушились все каналы и оборвались уцелевшие трубопроводы над плитой.
- 1 ч. 23 мин. 46 с. Воздух устремился в активную зону, и раздался новый взрыв, как считают, в результате образования смесей кислорода с водородом и окисью углерода.
- Разрушилось перекрытие реакторного зала, около четверти графита и часть топлива были выброшены наружу. В этот момент цепная реакция прекратилась.
- Горячие обломки упали на крышу машинного зала и в другие места, образовав более 30 очагов пожара.





Авария на Ленинградской АЭС 30 ноября 1975 года

Авария 1975 года на ЛАЭС по внешним признакам очень похожа на чернобыльскую 1986 года:

- точно так же она произошла ночью;
- точно так же в работе перед этим находился 1 турбогенератор из двух, и мощность реактора была на уровне 50% от номинальной;
- точно так же перед аварией мощность провалилась до нуля (из-за ошибки оператора);
- точно так же сразу после падения мощность стали поднимать.

Но есть и различия.

- **На ЧАЭС** авария произошла при остановке реактора на ППР.
На ЛАЭС - при выводе реактора после ППР на номинальную мощность.
- **На ЧАЭС** аварийный процесс начался на стационарном уровне мощности 200 МВт и в течение считанных секунд разрушил весь реактор.
На ЛАЭС аварийный процесс проходил в течение десятков-сотен минут во время подъема мощности с 0 до 1700 МВт, разрушил 32 ТВС и 1 технологический канал.
- **На ЧАЭС** существенную роль играли тепло-гидравлические процессы неустойчивости в КМПЦ, и значительно меньшую –

1-й блок ЛАЭС выводили на мощность после ППР.

На мощности реактора 80% от номинала из-за неполадок в системе регулирования генератора №1 принимается решение о разгрузке Г1.

Персонал решил попытаться устранить неисправность без отключения генератора.

В случае невозможности дальнейшей эксплуатации генератор №1 планировалось отключить и вывести в ремонт.

В результате разгрузки генератора №1 до нуля мощность реактора была снижена до 50%.

В таком состоянии для окончания устранения неисправности и продолжения вывода на номинальную мощность энергоблок был передан следующей, ночной смене.

Безрезультатное устранение неисправности продолжалось до 2:00.

Принято решение об отключении Г1 от сети.

В 02:00 по ошибке персонала был отключен единственный находившийся в работе турбогенератор №2.

Сработала аварийная защита реактора, и он был заглушен.

Началось нестационарное отравление реактора.

За 3 часа ОЗР снизился с 35 ст. РР до 3,5 ст. РР.

Операторы не стали дожидаться прохождения йодной ямы, а сразу по устранению ошибок и неисправностей начали выводить реактор на мощность.

При подъеме мощности реактор самопроизвольно разогнался.

Дважды разгон реактора останавливала аварийная защита.

Попытки оператора снизить скорость подъема мощности штатными средствами, погружая одновременно группу стержней РР и АР, эффекта не давали.

И только срабатывание аварийной защиты остановило реактор.

Последующий анализ показаний датчиков выявил, что максимум нейтронного поля по высоте сильно смещался вниз, и была большая неравномерность (в 2 – 3 раза по высоте и в 2,5 раза по радиусу).

К 6:15 удалось, в конце концов, поднять мощность реактора до 1000 МВт.

В 6:33 на мощности 1720 МВт реактор был остановлен аварийной защитой уже по технологическим причинам (появилось сразу несколько аварийных сигналов, свидетельствующих о нарушении целостности технологических каналов).

