



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

РЕАКТИВНОСТЬ И БАЛАНС РЕАКТИВНОСТИ

Ю.С. Хомяков

- **Понятие реактивности и ее значимость**
- **Эффекты и коэффициенты реактивности**
- **Эффективность рабочих органов СУЗ, эффект интерференции**
- **Баланс реактивности**
- **Требования ПБЯ к коэффициентам реактивности**
- **Требования ПБЯ к эффективности РО СУЗ и обеспечению подкритичности**
- **Пустотный эффект реактивности и его значение для быстрых реакторов, концепция нулевого пустотного эффекта**

Процесс деления может быть организован в виде цепной реакции в следующих вариантах определяемых коэффициентом размножения нейтронов (вычисляется автоматически кодом при решении уравнения переноса):

- $k_{эфф} < 1$ – реакция, первоначально иницируемая внешним источником нейтронов, постепенно затухает (такая система называется **подкритической**);
- $k_{эфф} = 1$ – деление ядер идет в режиме самоподдерживающейся реакция с постоянной скоростью, ядерный реактор в основном должен работать в таком режим (**критическая система**, состояние);
- $1 < k_{эфф} \leq 1 + \beta$ – реакция идет с увеличивающейся скоростью, но технически поддается регулированию за счет воздействия на запаздывающие нейтроны, ядерный реактор может работать в таком режиме какое-то время для увеличения своей мощности до нужного уровня (**надкритическая система**, состояние)
- $k_{эфф} > 1 + \beta$ – неуправляемая цепная реакция на мгновенных нейтронах взрывного типа, в реакторной физике такое состояние называется «ядерной аварией»

$$k_{эфф} = k_{\infty} \cdot P, \quad \text{где } k_{\infty} = \nu \Sigma_f / \Sigma_a, P < 1 - \text{параметр утечки нейтронов}$$

- **Повышение относительной концентрации делящихся веществ:**
 - повышение обогащения топлива (доли делящихся нуклидов),
 - повышение доли топлива в активной зоне
- Снижение концентрации топлива при его выгорании
- Введение поглотителей: бор, европий, гадолиний
- Накопление продуктов реакций, осколков деления
- **Замедление нейтронов и/или изменение спектра нейтронов**
- **Уменьшение утечки нейтронов:**
 - увеличение массы топлива (до критической),
 - повышение плотности размножающей среды, в том числе аварийное (расплав)
 - окружение активной зоны отражателями
 - объединение нескольких фрагментов

$$k_{\text{эфф}} = k_{\infty} \cdot P, \quad \text{где } k_{\infty} = \nu \Sigma_f / \Sigma_a, \quad P < 1 - \text{параметр утечки нейтронов}$$

- **критический реактор** или **критическое состояние реактора** – реактор или состояние реактора в котором может протекать самоподдерживающаяся цепная реакция, для такого реактора и состояния $k_{эфф} = 1$;
- **критический размер** активной зоны;
- **критическая масса (критмасса)** ядерного топлива, необходимая для поддержания цепной реакции;
- **критическое обогащение** – относительная концентрация делящегося материала при которой система достигает критичности
- **критическая концентрация** поглощающего материала (пример – концентрация борной кислоты)
- **критическое положение органов системы управления и защиты (СУЗ)**

- *Хранилища ядерного топлива*
- *Бассейны выдержки ядерного топлива*
- *Контейнеры для транспортировки ядерного топлива*
- *Установки по фабрикации ядерного топлива*
- *Установки по переработки ядерного топлива, особенно с растворами ядерного топлива*

Ядерно-безопасными считаются установки в которых невозможно превысить величину коэффициента размножения нейтронов 0.95

$$k_{эфф} < 0.95$$

Реактивность

$$\rho = \frac{1}{k_{\text{эфф}}} - 1 = \frac{k_{\text{эфф}} - 1}{k_{\text{эфф}}} \quad \text{— реактивность}$$

$\rho = 0$ критическая система

$\rho < 0$ подкритическая (ядерно – безопасная) система

$\rho > 0$ надкритическая система

Эффект реактивности

$$\Delta\rho = \frac{1}{k_{\text{эфф}1}} - \frac{1}{k_{\text{эфф}2}} = \frac{k_{\text{эфф}2} - k_{\text{эфф}1}}{k_{\text{эфф}1} \cdot k_{\text{эфф}2}} = \frac{\Delta k_{\text{эфф}}}{k_{\text{эфф}1} \cdot k_{\text{эфф}2}} \approx \Delta k_{\text{эфф}}$$

при $\Delta k_{\text{эфф}1}, \Delta k_{\text{эфф}2}$ близких к 1

$$K_p = \frac{\Delta\rho}{\Delta p} - \text{коэффициент реактивности по параметру } p$$

$$K_r = \frac{\Delta\rho}{\Delta T} - \text{температурный коэффициент реактивности}$$

$$K_r = \frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_{\text{масс}}} - \text{плотностной коэффициент реактивности}$$

$$K_r = \frac{\Delta\rho}{\Delta W} - \text{мощностной коэффициент реактивности}$$

- п.3.4 Приложения ПБЯ РУ АС (НП-082-07), ограничение температурного коэффициента реактивности: *«Значение коэффициента реактивности по температуре реактора должно быть отрицательно во всем диапазоне изменения параметров реактора при нормальной эксплуатации и при нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварии»*

$$K_{ТЭР} + \delta K_{ТЭР} < 0$$

п.3.4 Приложения ПБЯ РУ АС (НП-082-07), ограничение мощностного коэффициента реактивности: *«Значение коэффициента реактивности по мощности реактора должно быть отрицательно во всем диапазоне изменения параметров реактора при нормальной эксплуатации и при нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварии»*

$$K_{МЭР} + \delta K_{МЭР} < 0$$

- п.3.4 Приложения ПБЯ РУ АС (НП-082-07), ограничение суммарного коэффициента реактивности по температуре теплоносителя и топлива: «Значение суммарного коэффициента реактивности по температуре теплоносителя и топлива должно быть отрицательно во всем диапазоне изменения параметров реактора при нормальной эксплуатации и при нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварии»

$$K_{TЭРТТ} + \delta K_{TЭРТТ} < 0$$

п.3.4 Приложения ПБЯ РУ АС (НП-082-07), ограничение натриевого пустотного эффекта реактивности (НПЭР): «для запроектных аварий допустимый интервал значений натриевого пустотного эффекта реактивности должен быть обоснован в проекте РУ и АС»:

$$\rho_{НПЭР} + \delta\rho_{НПЭР} < ПД(НПЭР),$$

где ПД(НПЭР) – предельное значение НПЭР, обоснованное в проекте расчетами тяжелых аварий с кипением теплоносителя

Температурный эффект реактивности (ТЭР) – изменение запаса реактивности активной зоны при изотермическом разогреве активной зоны от температуры перегрузки топлива до входной температуры теплоносителя при нулевой мощности РУ.

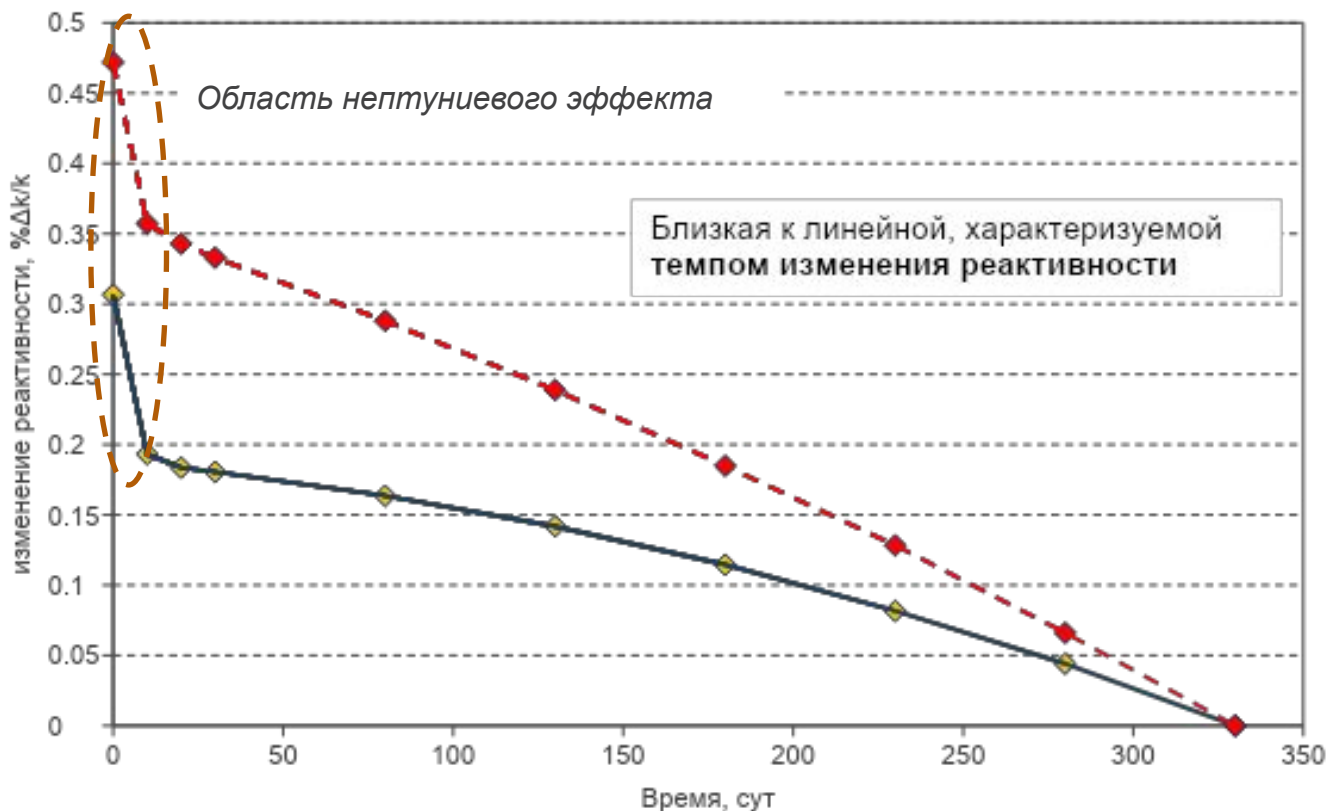
Мощностной эффект реактивности (МЭР) - изменение запаса реактивности активной зоны при ее неизотермическом разогреве при переходе от нулевой мощности при температуре активной зоны, соответствующей температуре теплоносителя на входе в активную зону при номинальной мощности, к номинальной мощности активной зоны.

Физическая природа эффектов одна и та же:

- Эффект Допплера при увеличении температуры материалов;
- Изменение геометрических размеров и взаимного расположения элементов (как правило увеличение утечки нейтронов);
- Изменение плотности (в первую очередь теплоносителя и проявление плотностного эффекта реактивности (как правило изменение спектра нейтронов))

Эффект от выгорания топлива и нептуниевый эффект реактивности:
физическая природа – изменения состава топлива и накопление и поглощающих осколков деления

Изменение реактивности при выгорании топлива

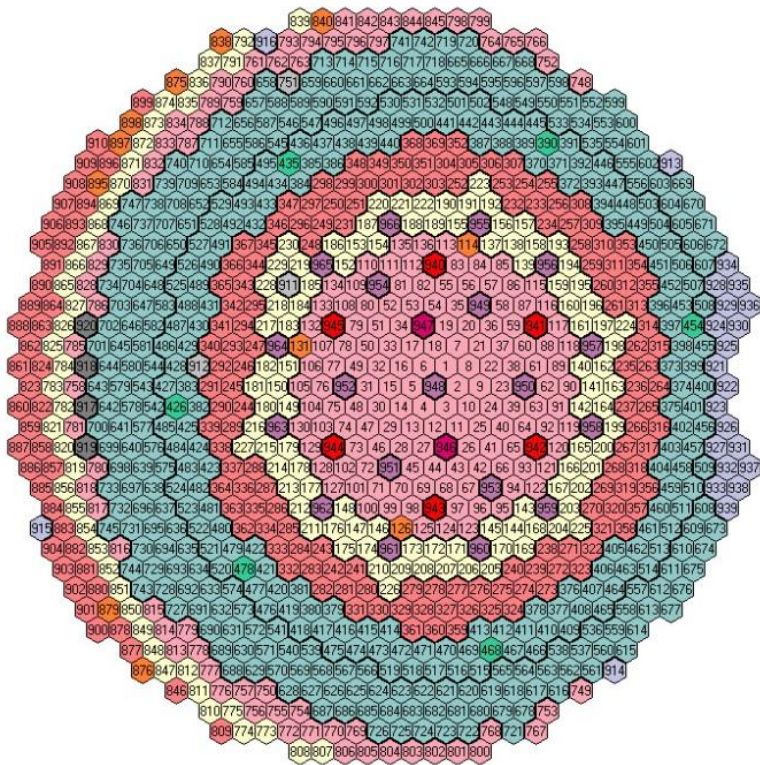


Эксплуатационное требование обеспечения длительности микрокампании и коэффициента использования мощности (КИУМ):

$$\rho_{\max} - \delta\rho_{\max} > \rho_{ТЭР} + \rho_{МЭР} + \rho_{Np} + \rho_B + \rho_{ОП} + (\delta\rho_{ТЭР} + \delta\rho_{МЭР} + \delta\rho_{Np} + \delta\rho_B + \delta\rho_{ОП})$$

- ρ_{\max} - максимальный запас реактивности РУ;
- $\rho_{ТЭР}$ - температурный эффект и коэффициент реактивности;
- $\rho_{МЭР}$ - мощностной эффект и коэффициент реактивности;
- $\rho_{ОП}$ - оперативный запас реактивности РУ для управления реактором;
- ρ_B – эффект реактивности от выгорания топлива;
- ρ_{Np} – нептуниевый эффект реактивности;
- δ - неопределенность (погрешность) соответствующей величины

Ядерный реактор должен обладать потенциальной надкритичностью, называемой максимальным запасом реактивности, который является источником потенциальной ядерной опасности реакторной установки. В проекте Прорыв поставлена задача минимизировать эту опасность.



Эффективность РО СУЗ - отрицательный эффект реактивности, обусловленный введением в активную зону поглотителей или извлечением материалов, приводящих к росту утечки нейтронов.

п.2.3.1.4 ПБЯ РУ АС (НП-082-07): «должно быть предусмотрено по меньшей мере две системы останова реактора ...»

Система компенсации (КС)-медленная изменения реактивности ТМЭР и выгорание топлива)

Система регулирования (АР, РС) – оперативное управление реактором

Система аварийной защиты (АЗ) – экстренное снижение мощности для предотвращения аварий

ПАЗ – пассивные системы безопасности

- п.2.3.1.4 ПБЯ РУ АС (НП-082-07): «должно быть предусмотрено по меньшей мере две системы остановки реактора, каждая из которых должна быть способна независимо от другой обеспечивать перевод активной зоны реактора в подкритическое состояние и поддержание ее в подкритическом состоянии с учетом принципа единичного отказа или ошибки персонала»

$$(\rho_{KC-1} + \rho_{AP} - \delta\rho_{KC-1} - \delta\rho_{AP}) - (\rho_{\max} + \delta\rho_{\max}) > 0 \quad \text{Оценка консерватизма: } \delta\rho_{KC-1} + \delta\rho_{AP} + \delta\rho_{\max}$$

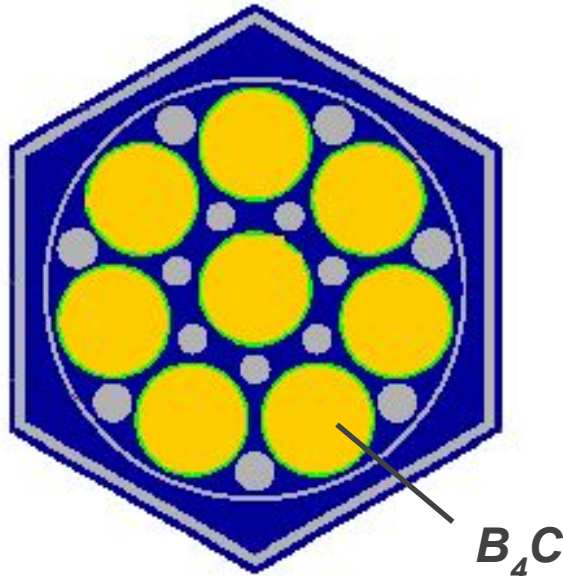
- п.2.7.2.5 ПБЯ РУ АС-89 (НП-082-07): “минимальная подкритичность реактора в процессе перегрузок с учетом возможных ошибок должна составлять не менее 0,02”

$$(\rho_{A3-1} + \rho_{KC} + \rho_{AP} - \delta\rho_{A3-1} - \delta\rho_{KC} - \delta\rho_{AP}) - (\rho_{\max} + \delta\rho_{\max}) > 0,02$$

$$\text{Оценка консерватизма: } \delta\rho_{A3-1} + \delta\rho_{KC} + \delta\rho_{AP} + \delta\rho_{\max}$$

- п.2.3.3.15 ПБЯ РУ АС-89 (НП-082-07): “подкритичность активной зоны реактора в любой момент кампании после взвода рабочих органов аварийной защиты в рабочее положение с введенными в активную зону остальными органами СУЗ должна быть не менее 0,01 в состоянии с максимальным эффективным коэффициентом реактивности”:

$$(\rho_{KC-1} + \rho_{AP} - \delta\rho_{KC-1} - \delta\rho_{AP}) - (\rho_{\max} + \delta\rho_{\max}) > 0,01 \quad \text{Оценка консерватизма: } \delta\rho_{KC-1} + \delta\rho_{AP} + \delta\rho_{\max}$$



*Типичная схема РО СУЗ
на примере БН-600*

РО СУЗ на принципе введения поглотителей - основной способ, применяемый в БР

- материал – карбид бора (есть попытки использования Eu , Gd , Hf)
- основная проблема – высокая эффективность и исключение «застревания»
- Эффективность определяется количеством бора-10 и расположением в активной зоне (чем ближе к центру – тем выше эффективность)
- **РО СУЗ на эффекте утечки нейтронов эффективны только для реакторов относительно небольшой мощности** (применяются в БРЕСТ-ОД-300 и работают по принципу вытеснения свинца давлением газа)

Наименование коэффициента реактивности	Нитридное топливо	МОКС
Система компенсации реактивности (КС), %Δk/k	4.25	5.50
Стержни регулирования (РС), %Δk/k	0,20	0,30
Система аварийной защиты (АЗ), %Δk/k		
Стержни пассивной аварийной защиты, %Δk/k	0.83	0.87
Первая система останова реактора (КС+РС), %Δk/k	4.51	5.94
Первая система останова реактора без наиболее эффективного стержня (КС+РС-1), %Δk/k	3.98	5.00
Вторая система останова реактора (АЗ+ПАЗ-Т*), %Δk/k	2.37	2.41
Вторая система останова реактора без наиболее эффективного стержня (АЗ+ПАЗ-Т*-1), %Δk/k	2.04	2.06
Все рабочие органы СУЗ, %Δk/k	5.90	7.43
Все рабочие органы СУЗ без наиболее эффективного стержня, %Δk/k	5.35	6.57

Внимание: Эффективность всей системы < суммы первой плюс второй:

$$5.90 < 4.51 + 2.37 = 6.88$$

Этот эффект называется эффектом интерференции РО СУЗ

Примеры баланса реактивности (МОКС)

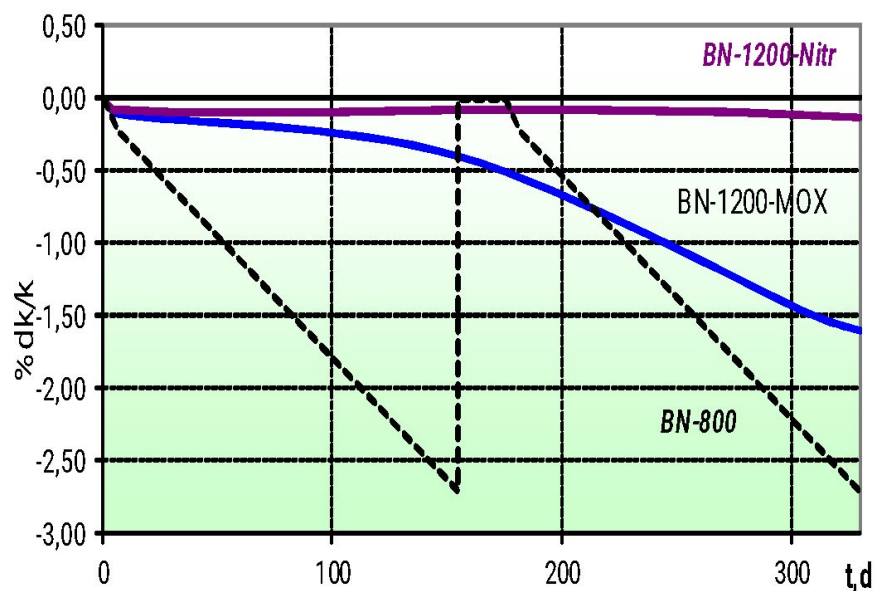


Величина	БН-К расчет	БН-1200 с учетом погрешности $k_{эфф.}$	БН-1200 с учетом неопредел. $k_{эфф.}$ и технологическ их неопредел.
Максимальный запас реактивности, $\% \Delta k/k$	3.11	3.71	4.16
Эффективность РО СУЗ без наиболее эффективного стержня, $\% \Delta k/k$	6.57	5.58	5.58
Уровень подкритичности, $\% \Delta k/k$	-3.46	-1.87	-1.42
Требование	< -2	< -2	< -2
Степень выполнения	Выполнено	Не выполнено	Не выполнено

Примеры баланса реактивности (нитрид)



Величина	БН-К нитрид расчет	БН-К нитрид с учетом погрешности $k_{эфф.}$	БН-К нитрид с учетом неопредел. $k_{эфф.}$ и технологических неопредел.
Максимальный запас реактивности, % $\Delta k/k$	1.36	1.63	2.61
Эффективность РО СУЗ без наиболее эффективного стержня, % $\Delta k/k$	5.35	4.55	4.55
Уровень подкритичности, % $\Delta k/k$	-3.99	-2.92	-1.94
Требование	< -2	< -2	< -2
Степень выполнения	Выполнено	Выполнено	Не выполнено (почти)



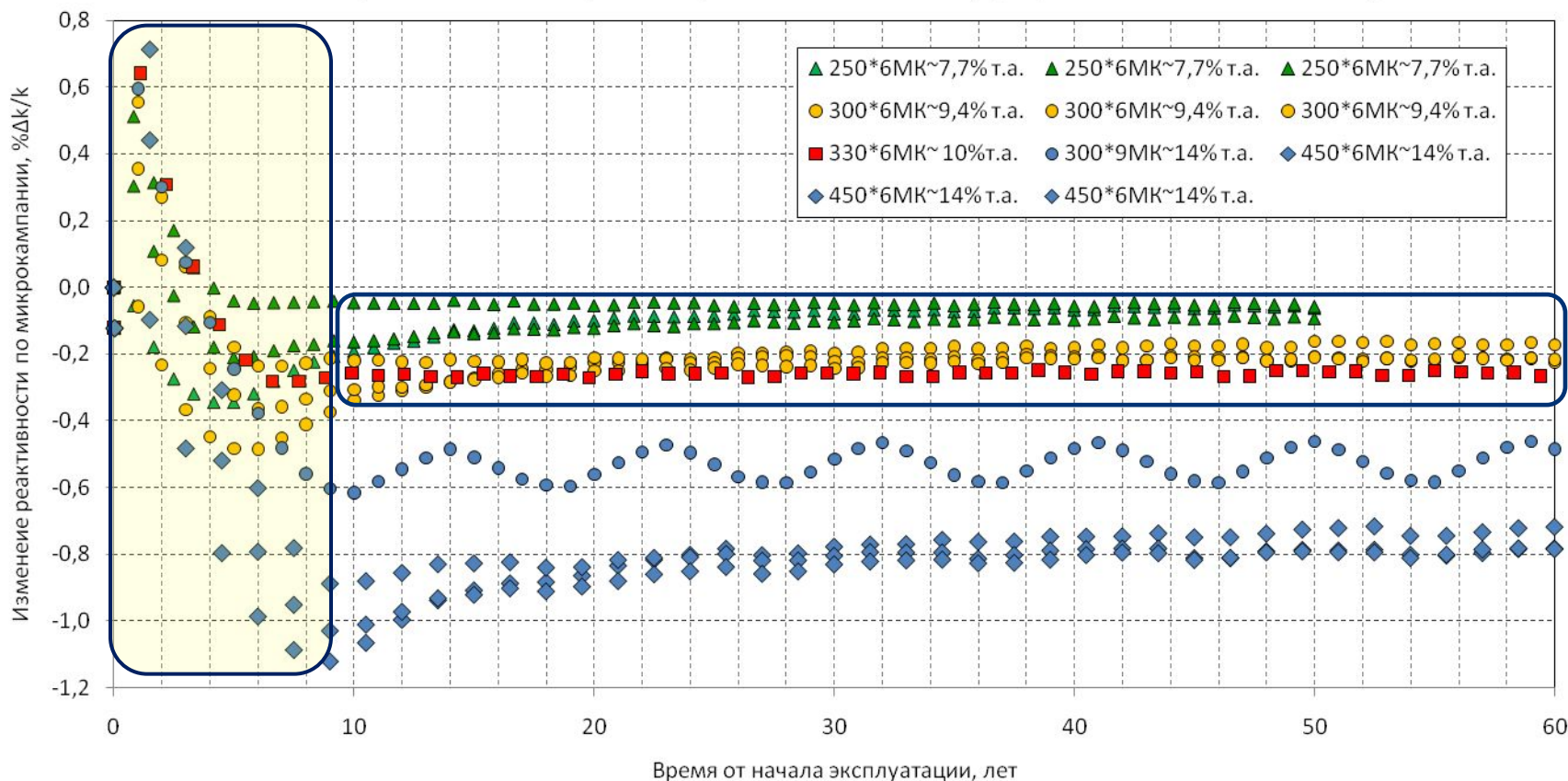
- Проект «Прорыв» ставит одной из своих целей снижения до минимума максимального запаса реактивности – источника потенциальной ядерной опасности
- Первый метод – снижение эффекта реактивности от выгорания топлива за счет повышения воспроизводства топлива в активной зоне (пример на рисунке, доклад в Киото по БН-1200)
- По сути-это **переход от управления кампанией с помощью СУЗ к управлению за счет правильной организации топливного цикла**
- Второй – снижение температурного и мощностного эффектов реактивности за счет снижения температуры топлива (жидкометаллический подслои)

Переход к равновесному состоянию



РОСАТОМ

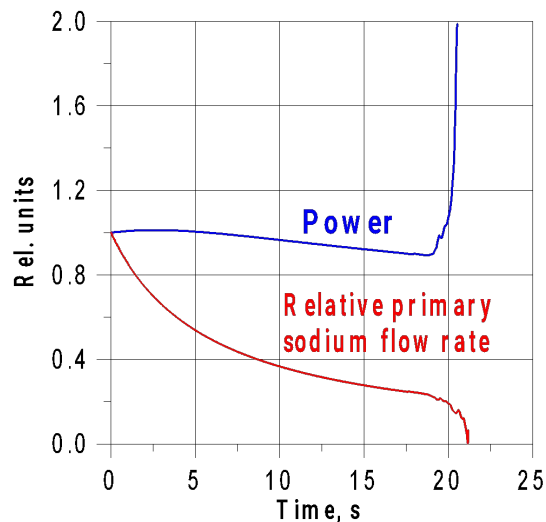
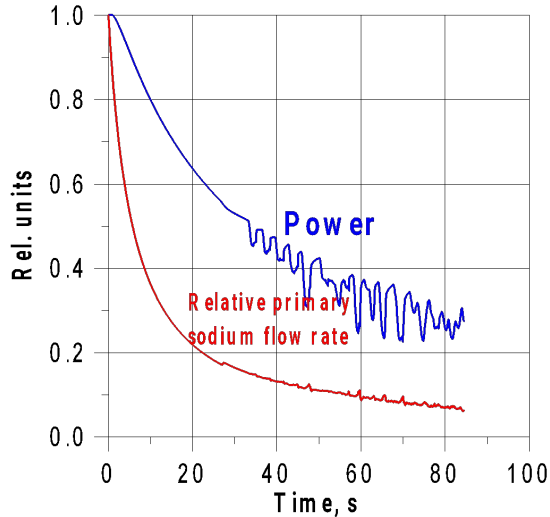
Изменение реактивности при выгорании РУ БН-1200 (при различных составах Pu)



Работа реактора с малым запасом реактивности требует переходного режима от плутония из ОЯТ ВВЭР к плутонию собственного «равновесного состава».

Проблема пока не решена.

Концепция нулевого пустотного эффекта реактивности



- Российскими нормативными правилами до 2009 года были установлены ограничения по плотностному эффекту реактивности, которые привели российских специалистов к концепции «нулевого НПЭР». Она заключается в формировании компоновки активной зоны с близкой к нулю величиной интегрального пустотного эффекта реактивности.
- В настоящее время не смотря на изменение нормативных правил расчеты протекания наиболее сложной аварии типа ULOF (потеря электроснабжения при несрабатывании систем защиты) показали необходимость сохранения базовых технических решений по снижению НПЭР.
- Российское открытие –натриевая полость над активной зоны, которая при кипении натрия опустошается, увеличивает утечку нейтронов и приводит к отрицательному эффекту реактивности.

Контрольные вопросы

- Чем отличается понятие реактивности от критичности?
- Укажите диапазон значений реактивности в котором сохраняется возможность управления размножением нейтронов в среде.
- Какова должна быть подкритичность оборудования топливного цикла с загруженным ядерным топливом с точки зрения безопасности по российским правилам?
- Может ли поглотитель увеличивать реактивность критической системы?
- Физическая природа температурного и мощностного эффектов реактивности?
- Какова физическая природа непунииевого эффекта реактивности и ориентировочная величина в быстрых реакторах?
- Что такое максимальный запас реактивности и каково требование проекта «Прорыв» по его ограничению? Зачем нужно стремиться снижать запас реактивности?
- Каково минимальное и практическое (на примере БН-1200) количество систем СУЗ по требованиям ПБЯ?
- В какую сторону будет изменяться реактивность раствора топлива при его охлаждении? Является это изменение более или менее опасным?

Контрольные вопросы

- Какова допустимая величина запаса реактивности, если реактор имеет две системы РО СУЗ с эффективностью 2% (КС) и 1% (АЗ)?
- К какому принципу управления запасом реактивности: с помощью РО СУЗ и подбора топлива склоняются разработчики проекта «Прорыв»? Почему?
- Что такое равновесное топливо и в чем его физические преимущества?
- Когда в реакторах БН возможна реализация пустотного эффекта реактивности? В чем физический смысл физической концепции нулевого пустотного эффекта реактивности?
- Каким техническим способом можно добиться отрицательного пустотного эффекта реактивности (на примере БН-800 и БН-1200)?
- Какое состояние более опасное с ядерной точки зрения: холодное или горячее?
- Может ли выгорание топлива повышать реактивность реакторной установки?
- Может ли нептуниевый эффект повышать реактивность топлива?
- Какое топливо: свежее или выгоревшее является более ядерно опасным (для БН-800, БН-1200)?

Контрольные вопросы

- В какую сторону изменяется подкритичность сосуда с раствором с топливом при его осаждении?
- Что произойдет с подкритичностью раствора топлива в воде с борной кислотой если в него долить простую воду?
- Оператор подошел к сосуду с раствором топлива, но только хотел его помешать, как сосуд вскипел? Что произошло?
- Оператора, который проводил переработку топлива реактора ВВЭР попросили переработать и топливо одной ТВС с БН-800. Может ли он это сделать (с ядерной точки зрения), а если сможет то как?
- Когда реактор БН-800 более ядерно опасен: до перегрузки топлива или после? А БН-1200?
- Какой реактор БН-800 с полугодовой микрокампанией или БН-1200 с годовой кампанией должен иметь более эффективную систему РО СУЗ?
- С какой активной зоной БН-1200 должен иметь более сложную систему СУЗ: с оксидным или нитридным топливом и почему?



Спасибо за внимание