



НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
КУРЧАТОВСКИЙ КОМПЛЕКС АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Изменение состава топлива РБМК

А.М. Федосов

Круглый стол «История и перспективы ядерного топлива»
АО «МСЗ», г. Электросталь, Московская область
14-15 сентября 2023 года



Реактор РБМК:

Канальный кипящий реактор

Замедлитель – графит

Теплоноситель – кипящая вода

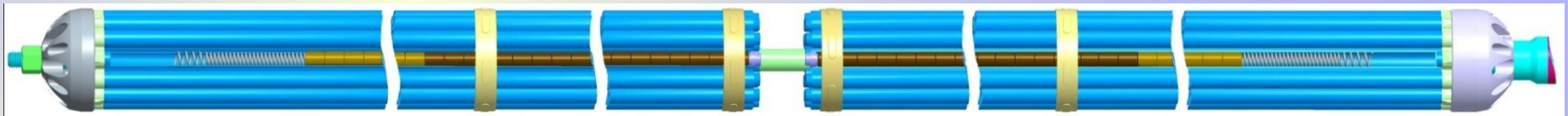
Электрическая мощность 1000 МВт

Топливо – двуокись урана с добавлением эрбия

Активная зона - 1884 канала (из них 1661 с ТВС)

Каналы СУЗ и датчики 223

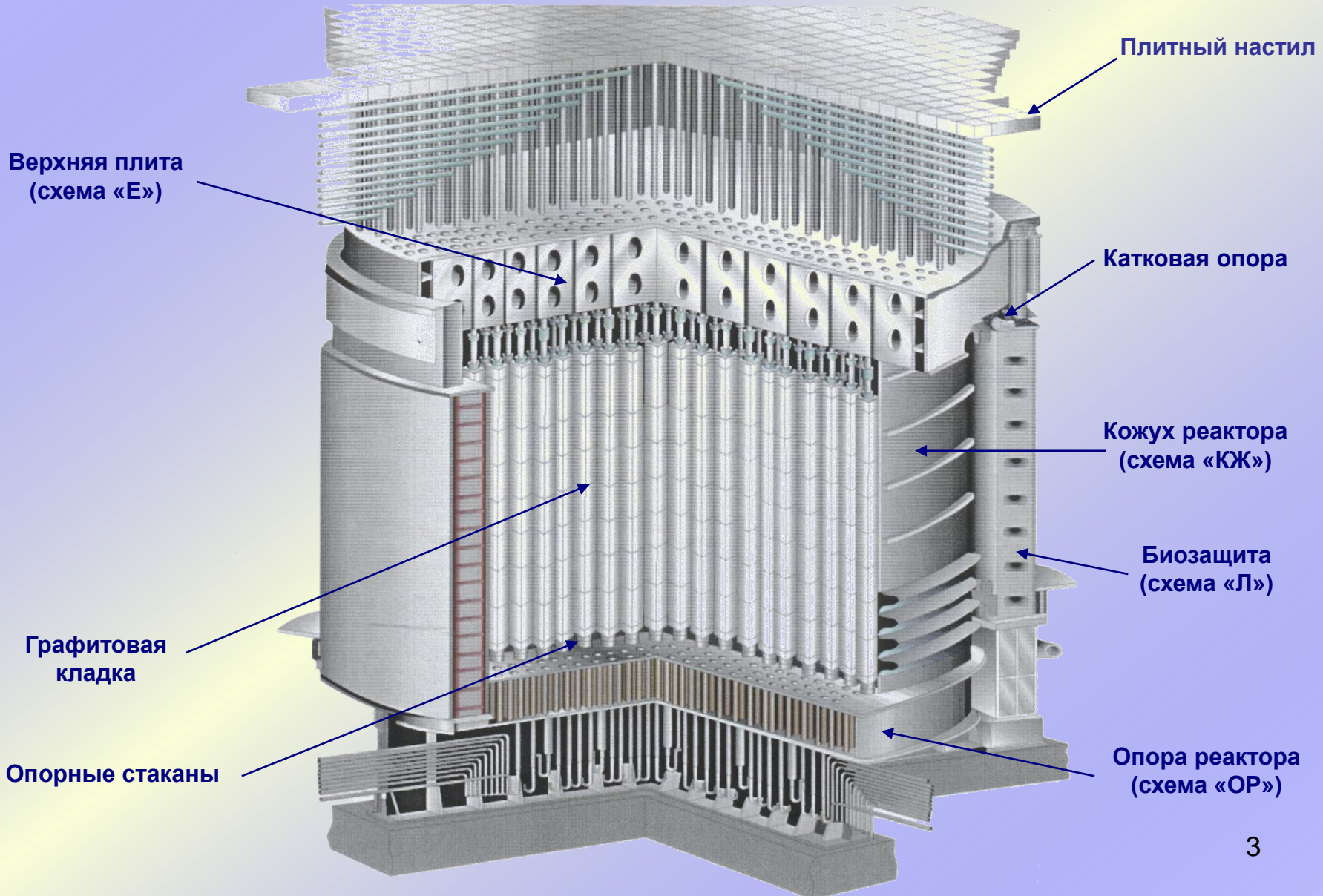
Непрерывная перегрузка ТВС на мощности



ТВС РБМК: 2 пучка по 18 твэлов



Конструкция реактора РБМК-1000





Начальный этап

Проект реактора создавался в 60-е годы 20 века

Использовался опыт промышленных реакторов и Белоярской АЭС

Исходный состав топлива – UO_2 , обогащение 1,8%

Проектное выгорание около 20 МВт·сут/кг

Первый энергоблок Ленинградской АЭС пущен 21.12.1973 г.

Конструкция ТВС практически не изменилась

(2 пучка по 18 твэлов $\varnothing 13,6$ мм)

Основные изменения касались состава топлива:

- обогащение**
- регенерат**
- добавление эрбия**

**Причины изменения состава – опыт эксплуатации,
повышение требований к безопасности и экономичности**



Повышение обогащения до 2%

Проблемы с управлением полем энерговыделения –

положительный паровой коэффициент реактивности $\alpha_{\text{ф}}$

Создание системы локального регулирования (ЛАР-ЛАЗ)

Расчетные исследования повышения обогащения:

2%, 2,4%, 3%

Ограничение – максимальная мощность канала

Обогащение **2%**, глубина выгорания ~ 22 МВт·сут/кг

Регенерированное топливо

Переработка топлива ВВЭР и других реакторов

Содержание ^{236}U $\sim 0,3\%$, содержание ^{232}U менее $2 \cdot 10^{-7}\%$

Компенсация 0,2 кг ^{235}U на 1 кг ^{236}U

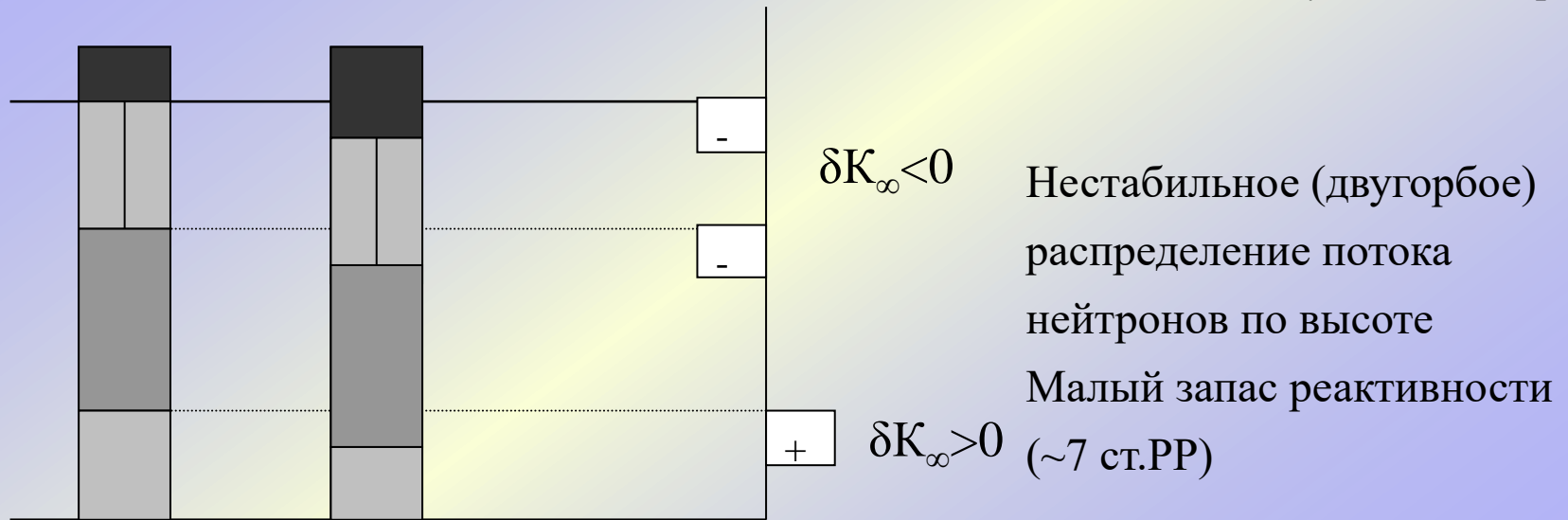
Отличие в характеристиках незначительное



Чернобыльская авария

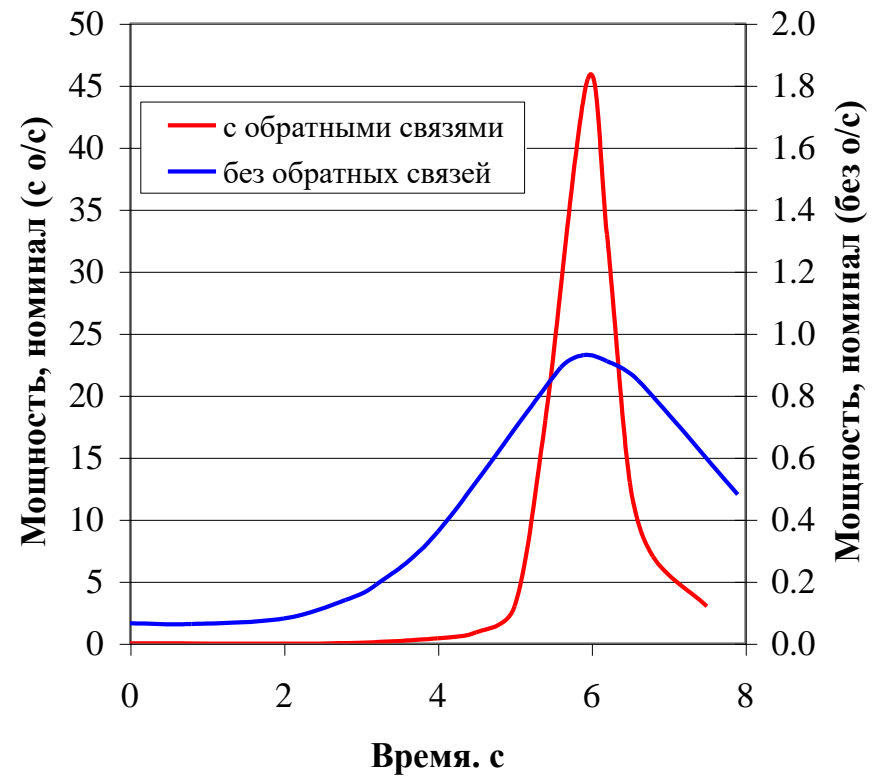
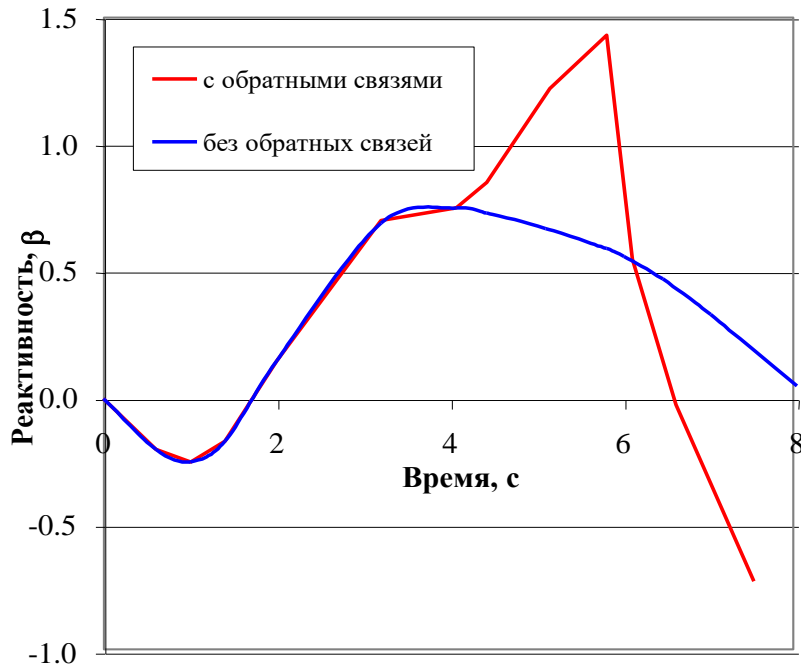
Сочетание 2-х факторов:

1. Дефект в конструкции стержней регулирования
2. Большой положительный паровой коэффициент $\alpha_{\phi} \approx 4 \div 5 \beta_{\text{эф}}$



Стержень вверху Начало движения

поглотитель
 столб воды
 вытеснитель



Положительная обратная связь (быстрый мощностной коэффициент больше нуля) на малой мощности



Мероприятия по повышению безопасности РБМК

Удлинение штанги между поглотителем и вытеснителем ст. СУЗ

Загрузка дополнительных поглотителей (ДП):

РБМК-1000 ≈ 80 , РБМК-1500 - 53

$$\alpha_{\phi} < 1\beta_{\text{эф}}$$

Увеличение оперативного запаса реактивности:

РБМК-1000 с 30 до ~ 45 ст.РР, РБМК-1500 с 35 до ~ 55 ст.РР

Уменьшение глубины выгорания примерно на 25% (экономика)

В РБМК-1000 обогащение увеличено до 2,4% - выгорание вернулось к исходному уровню

В РБМК-1500 увеличение обогащения до 2,4% привело бы к недопустимому росту температуры графита



Поиск оптимального способа уменьшения α_{ϕ}

Неоптимальное уран-графитовое отношение



уменьшение количества

графита:

проекты УКР (э/б №5 КуАЭС)

МКР

-20% графита



увеличение количества

топлива:

36 ТВЭЛОВ Ø10,2 мм (+16%U)

18 ТВЭЛОВ Ø14,9 мм (+20%U)

Ø канала 88→95 мм

Выгорающие поглотители:

Не надо менять конструкцию ТВС

Поглотитель нельзя извлечь (как ДП)

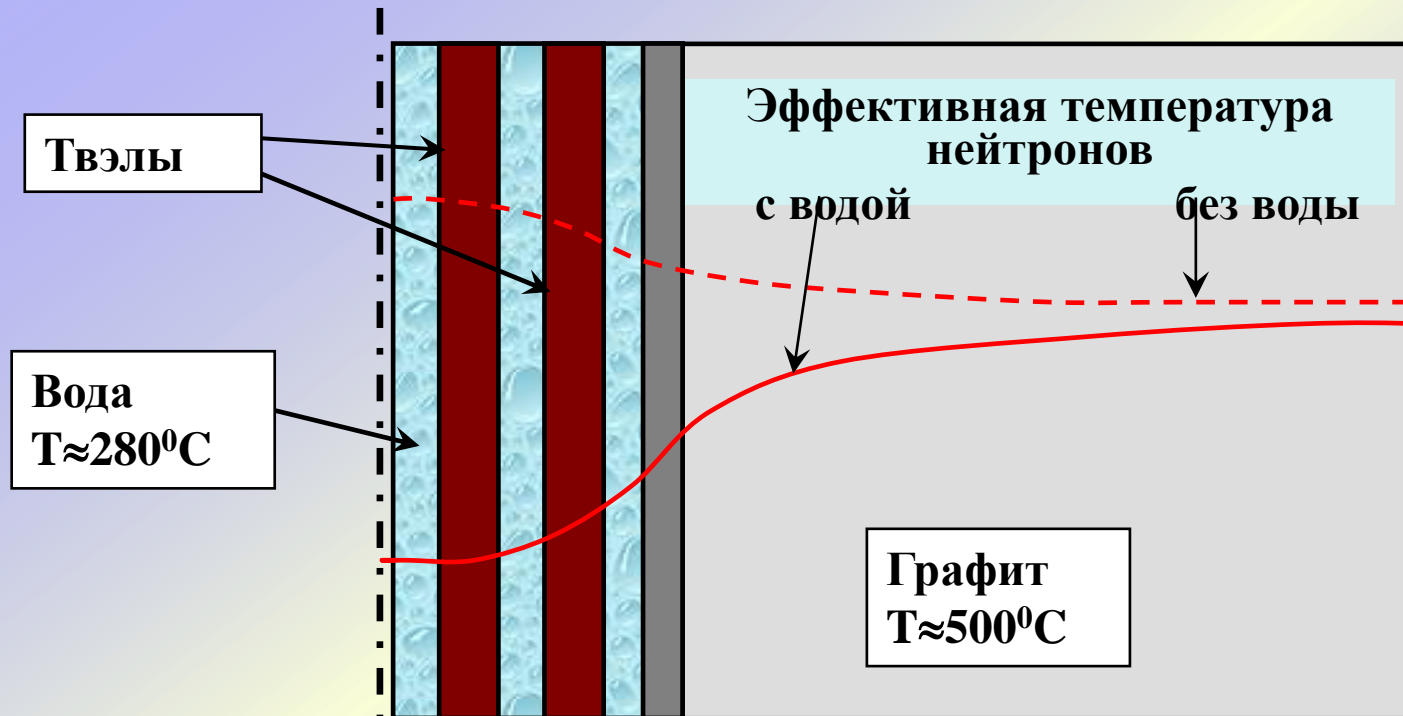
Выравнивается распределение энерговыделения

Оптимальный поглотитель – эрбий

(резонанс в сечении поглощения)



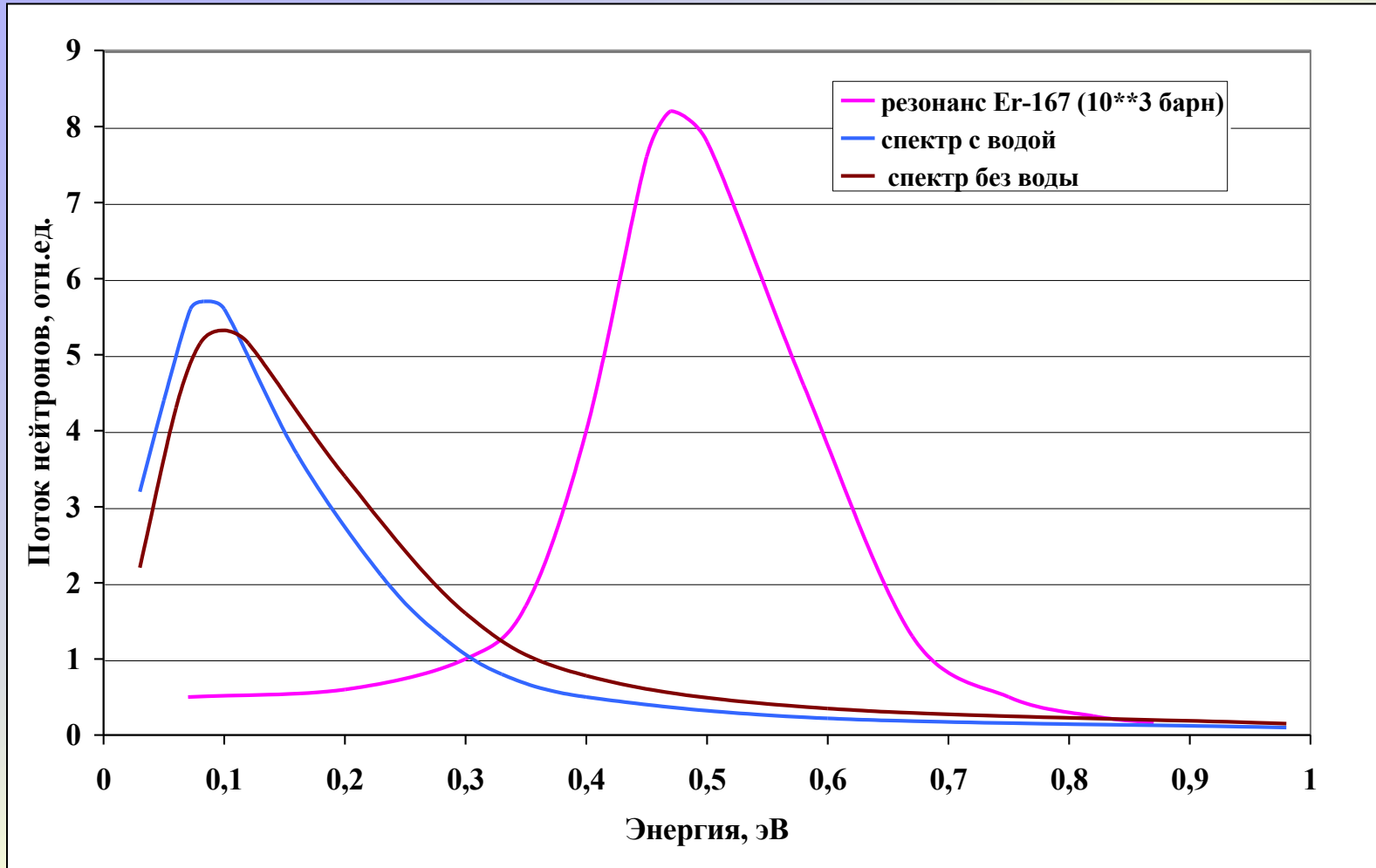
Физические основы воздействия эрбия на паровой эффект реактивности



Формирование спектра нейтронов в ячейке РБМК

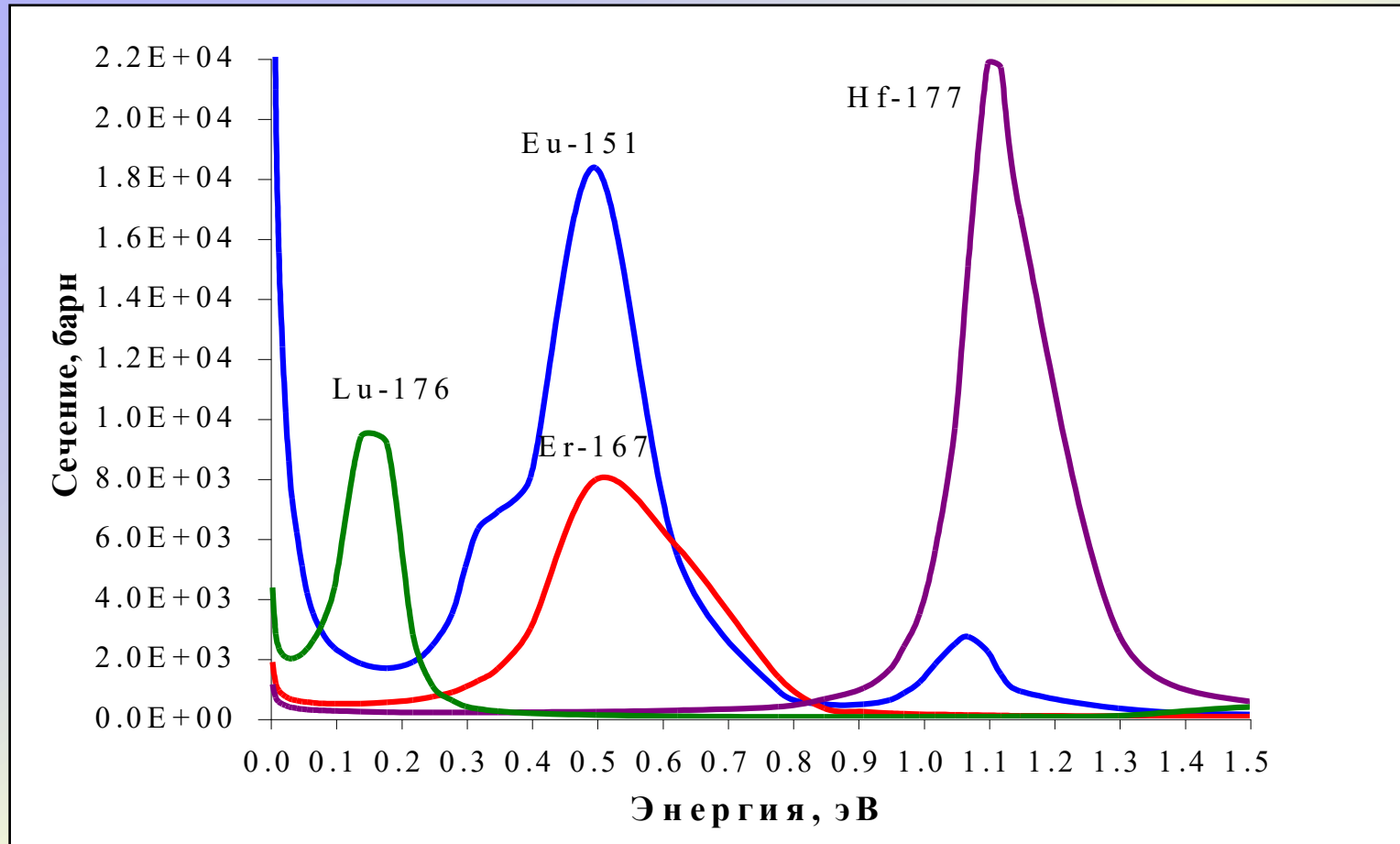


Изменение спектра нейтронов при обезвоживании



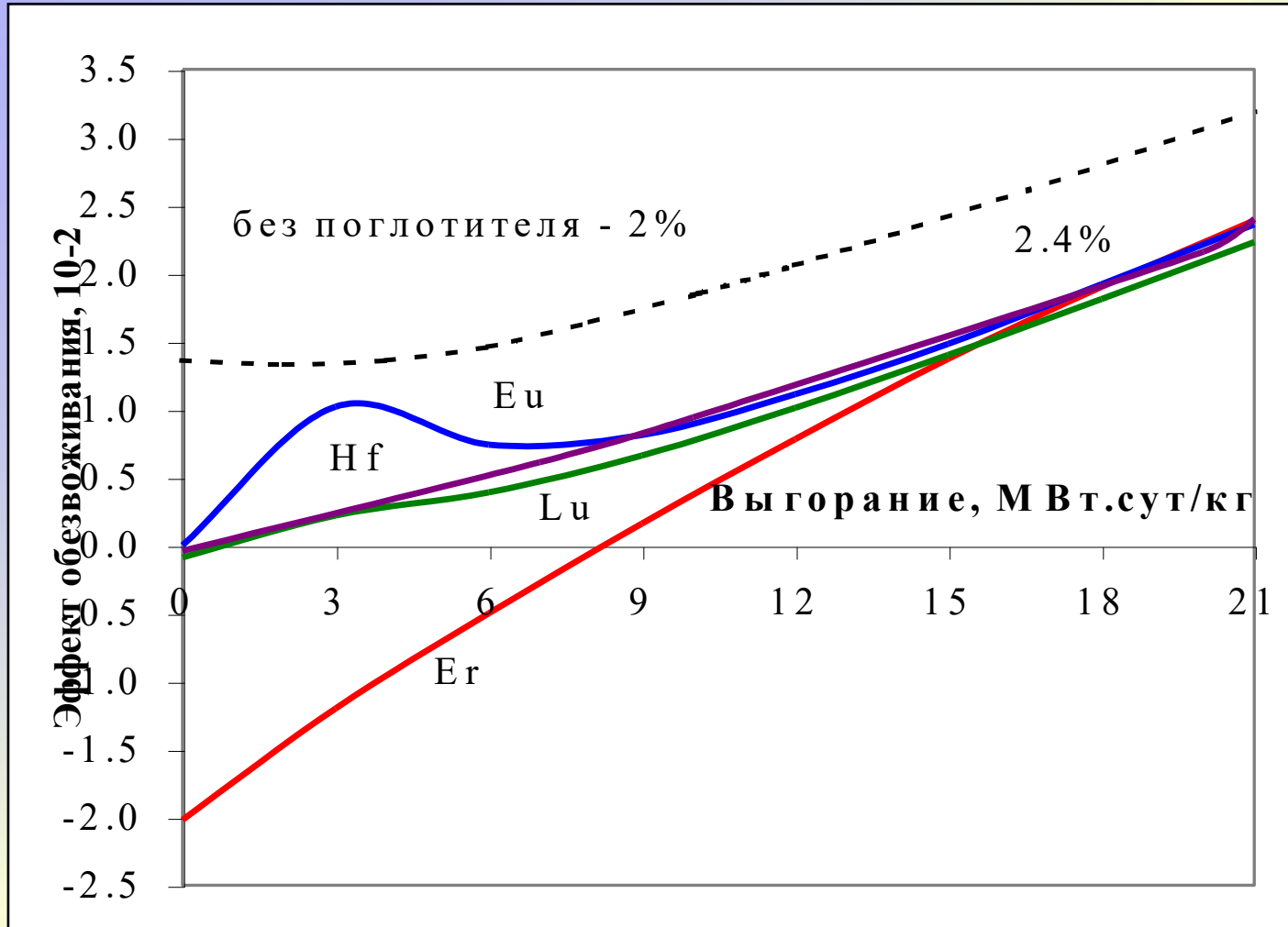


Резонансы в сечении поглощения некоторых изотопов



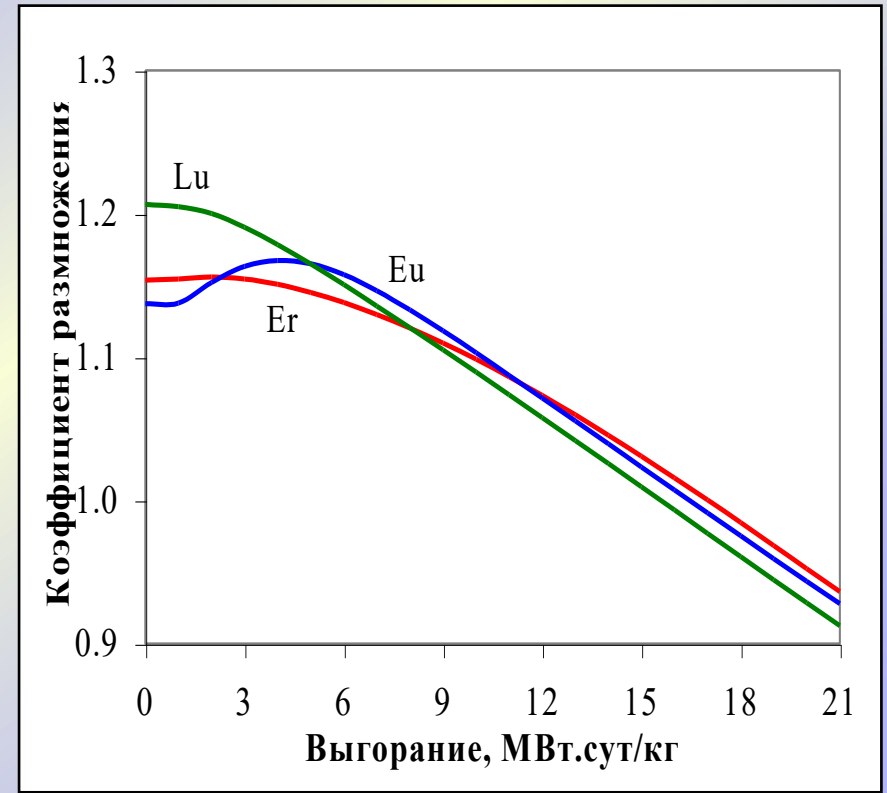
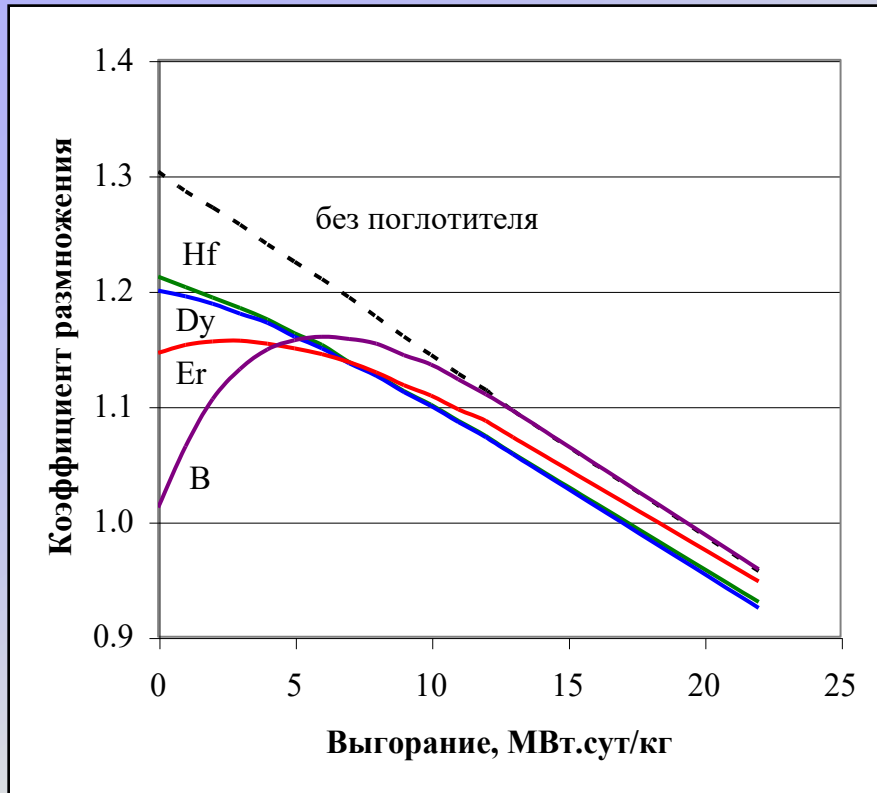


Эффект обезвоживания в зависимости от выгорания





Зависимость коэффициента размножения K_{∞} от выгорания



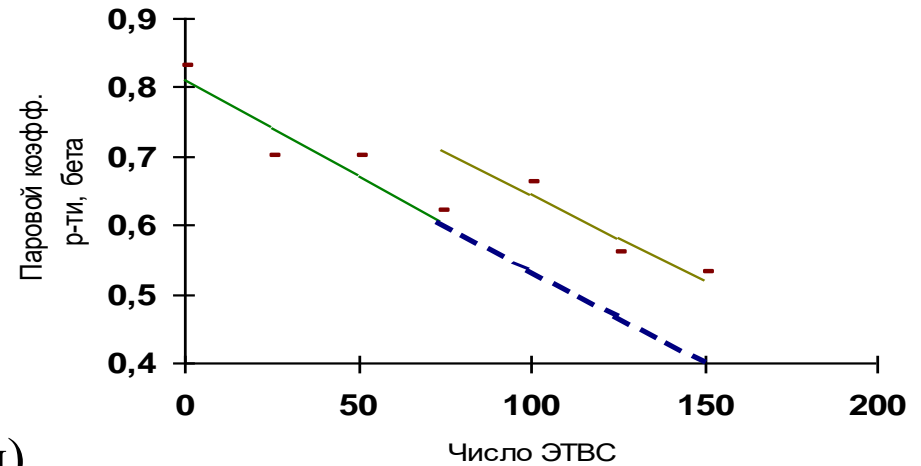


Выбор состава уран-эрбиевого топлива

Характеристика	РБМК-1000		РБМК-1500	
	2,4	2,6	2,0	2,4
Обогащение, %	0	0,41	0	0,41
Массовое содержание эрбия, %	80	0	53	0
Число ДП	21	26	15	21
Выгорание выгружаемого топлива, МВт·сут/кг	0,7	0,5	0,7	0,3
Средний по кампании эффект обезвоживания, β				

Загрузка опытной партии 150 ЭТВС на ИАЭС началась 26.06.1995

Была проведена замена 24 стержней Сб.2091 на сб.2477 (с ленточным звеном)



Загрузка опытной партии ЭТВС на э/б №2 ИАЭС

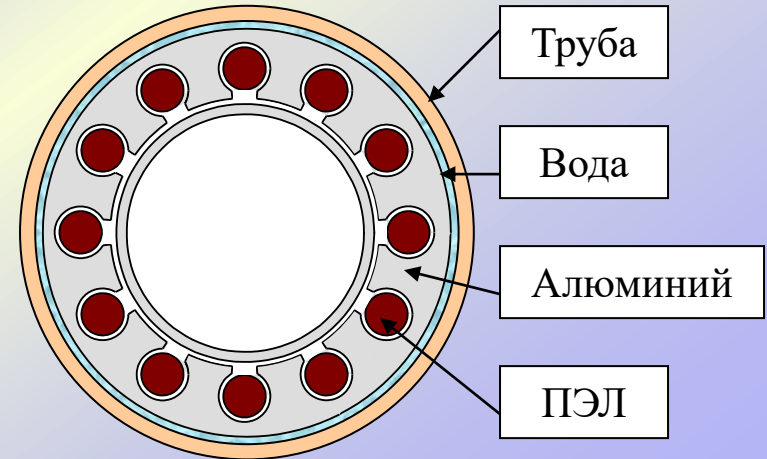
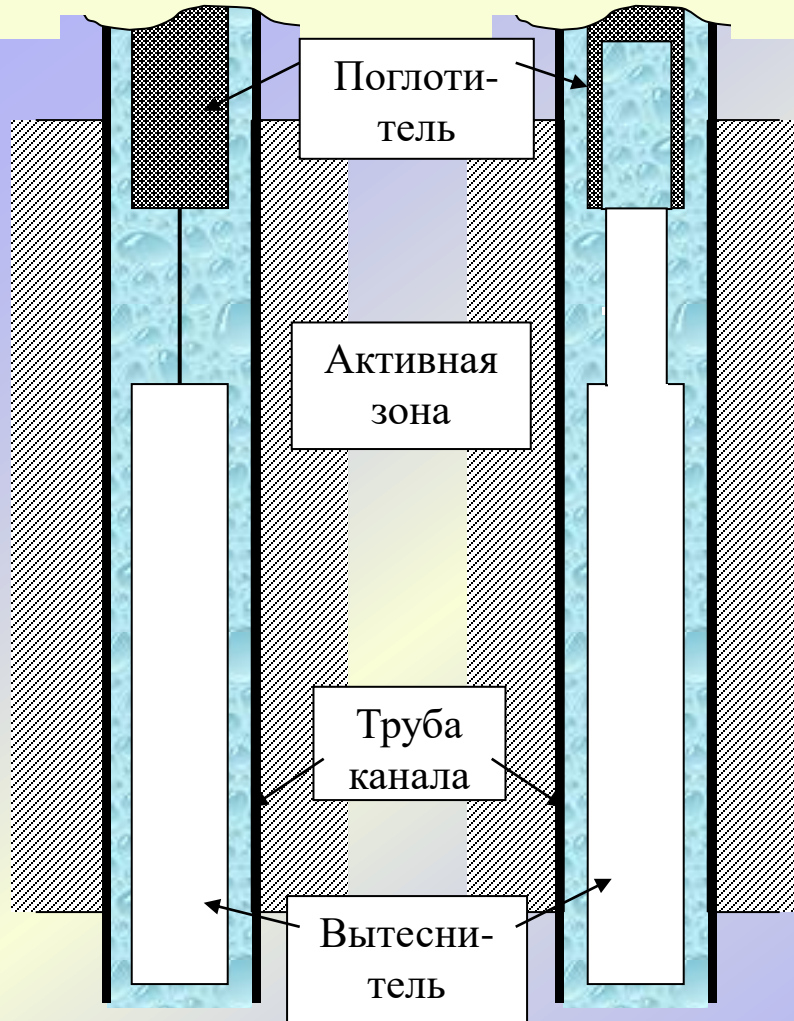


Стержни СУЗ РБМК

Сборка 2091
(штатная)

Сборка 2477
(ленточное звено)

Сборка 2399
(кластерный
регулирующий орган)





Стратегия внедрения уран-эрбиевого топлива (поэтапное повышение обогащения и содержания эрбия)

Реактор	РБМК-1000			РБМК-1500		
Обогащение, %	2.6	2.8	3.0	2.4	2.6	2.8
Эрбий, %	0.41	0.6	0.7	0.41	0.5	0.6
Начало загрузки	1996	2001	-	1995	2001	2005

1. Поэтапное повышение обогащения → накопление опыта эксплуатации при увеличении выгорания

2. Использование эрбия для компенсации роста α_{φ} при изменении конструкции стержней регулирования:

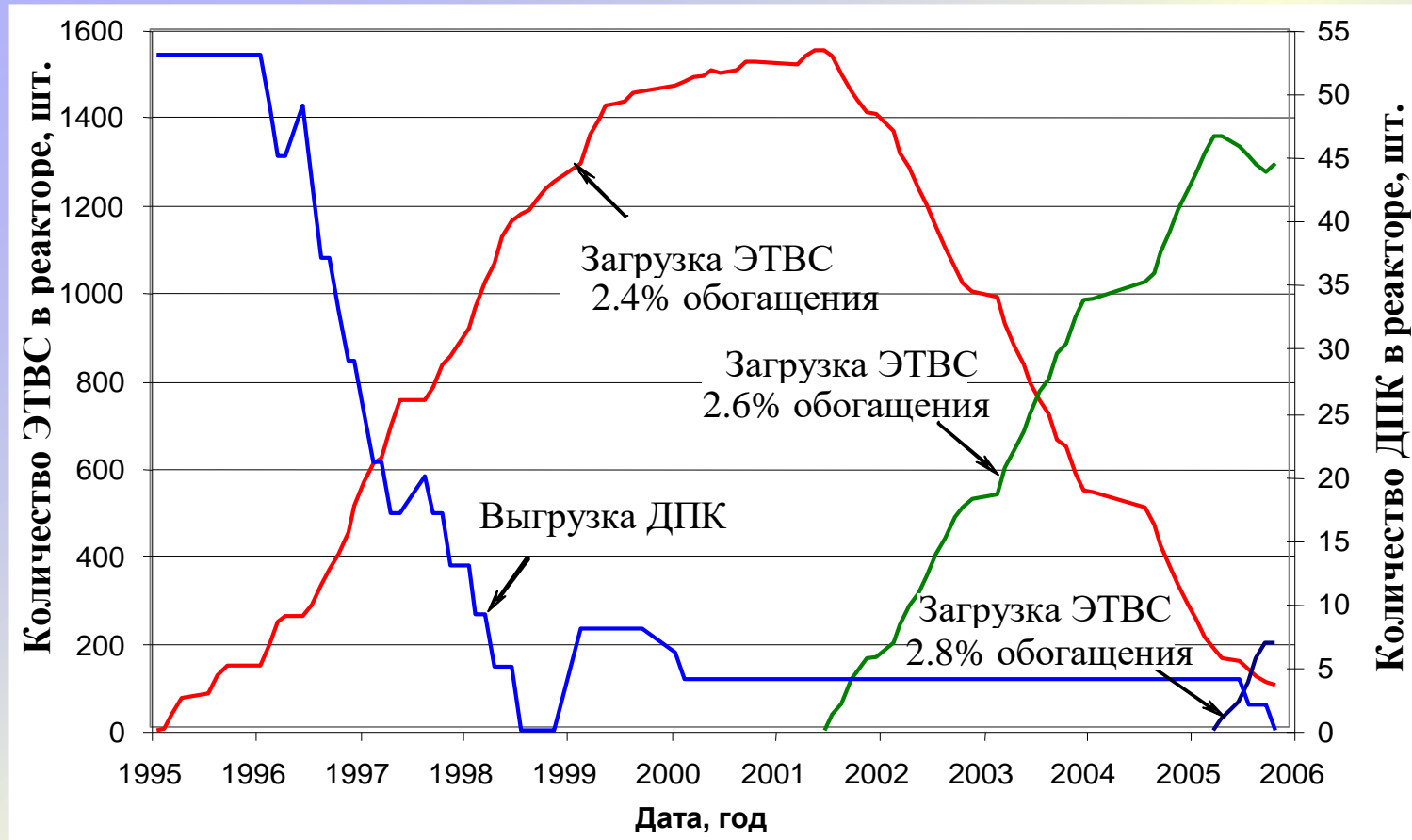
штатная сборка → сборка с ленточным звеном: $+0,5 \div 0,6 \beta_{\text{эф}}$,

переход на кластерные стержни - еще $+0,2 \div +0,3 \beta_{\text{эф}}$

(если бы не эрбий, пришлось бы загрузить еще ~50 ДП !)



Опыт эксплуатации уран-эрбиевого топлива



Загрузка ЭТВС и выгрузка ДП (2-ой энергоблок ИАЭС)



Изменение глубины выгорания топлива (э/б №2 ИАЭС)



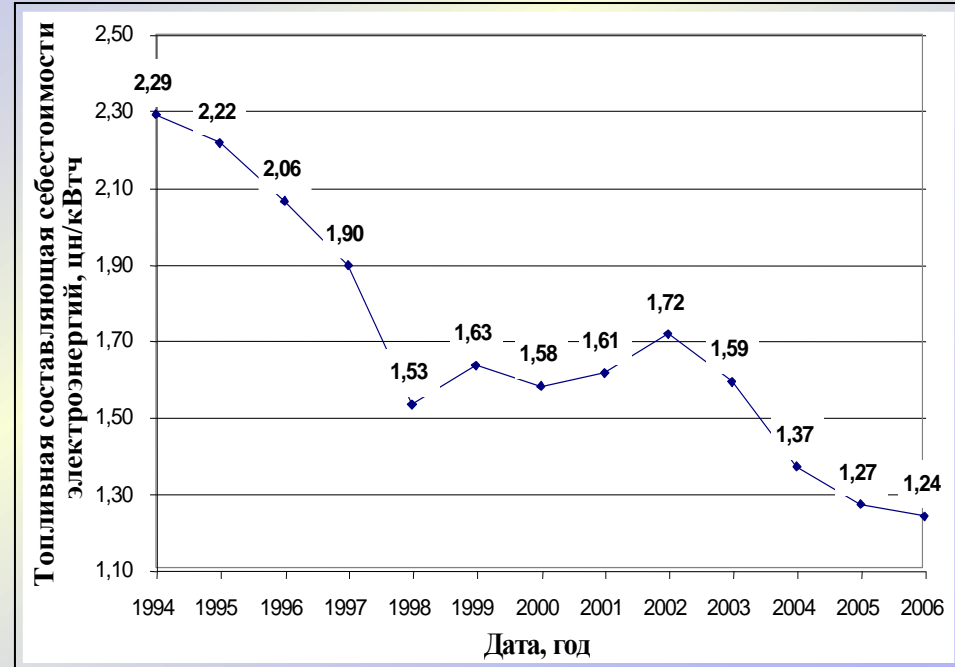
Глубина выгорания топлива увеличилась на 60%



Характеристики 2-го энергоблока ИАЭС



Темп перегрузок



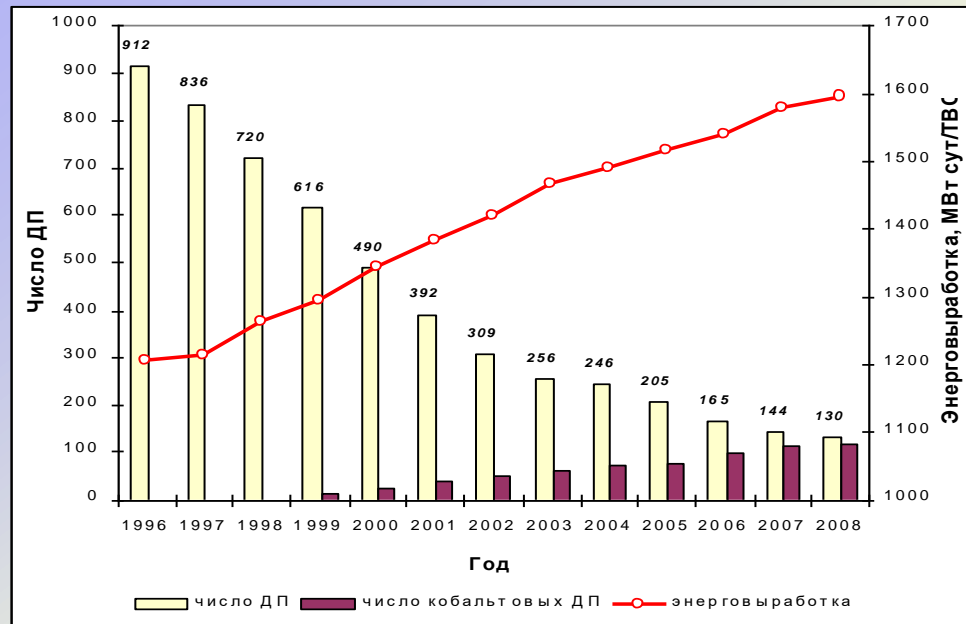
Топливная составляющая себестоимости электроэнергий

Темп перегрузок и топливная составляющая себестоимости электроэнергий снизились на 45%



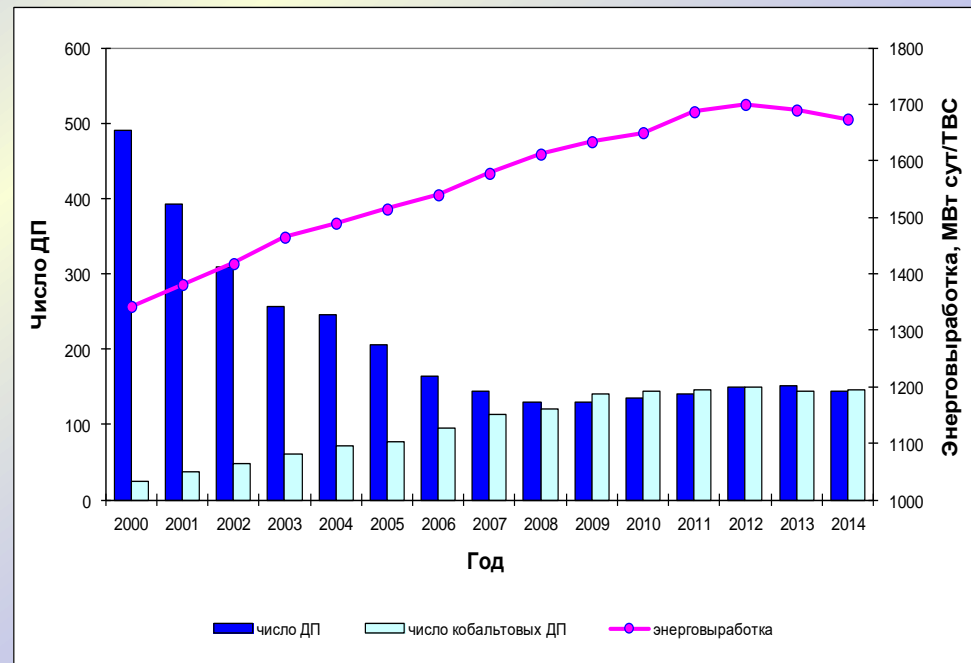
РБМК-1000
2,8%+0,6%Ег
В=30 мВт·сут/кг

Число ДП и средняя
 энерговыработка
 ТЭС в РБМК-1000
 (11 энергоблоков)



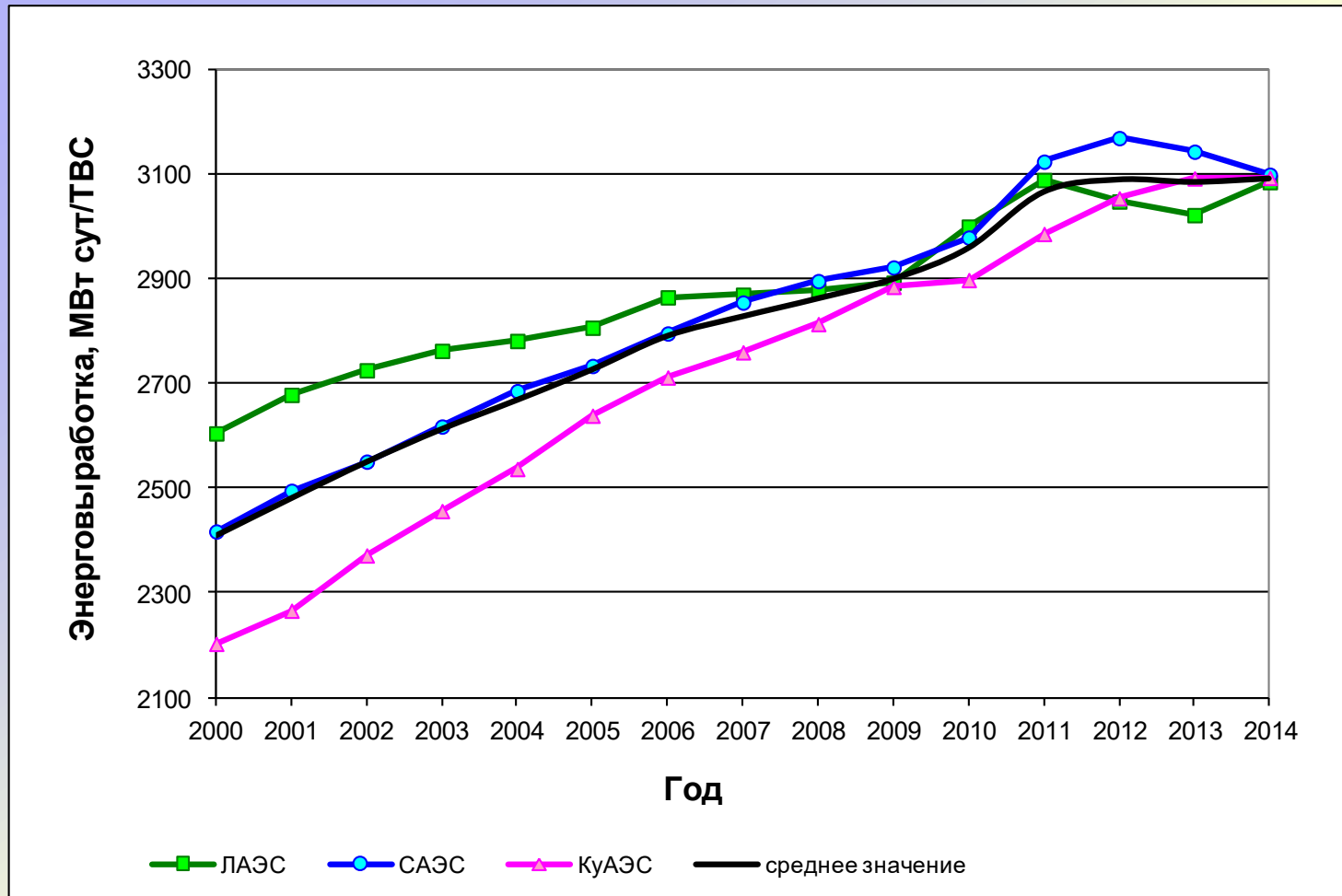
Число ДП снизилось в
 6,5 раз

Глубина выгорания топлива
 увеличилась на 40%





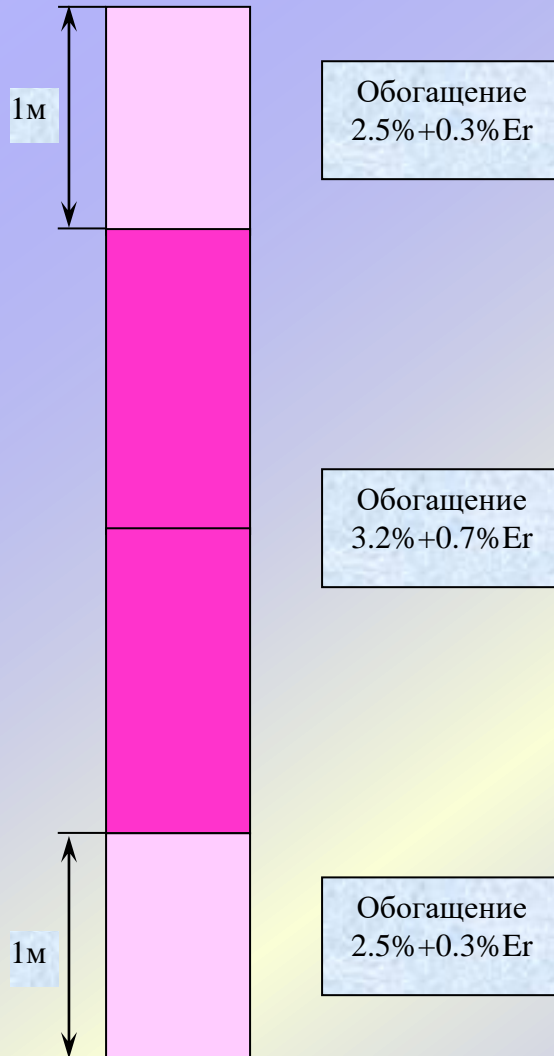
Энерговыработка (глубина выгорания) выгружаемого топлива РБМК-1000



Общая экономия за 10 лет на всех РБМК ~1 млрд \$



Профилированное топливо



Обогащение 2.8%→3%: увеличение выгорания на 7-8%

Профилированное по высоте топливо: 3% (в среднем) → дополнительно 5-6%, т.е. на 12-14% выше, чем с обогащением 2.8%

Топливо нового поколения:
выгорание до 35 МВт·сут/кг

Опытная партия 200 ТВС-П на э/б №2 ЛАЭС



Удаление графита при ремонте графитовой кладки

Удаление графита уменьшает α_ϕ
 Для компенсации выгружают ДП

Технологический регламент РУ:

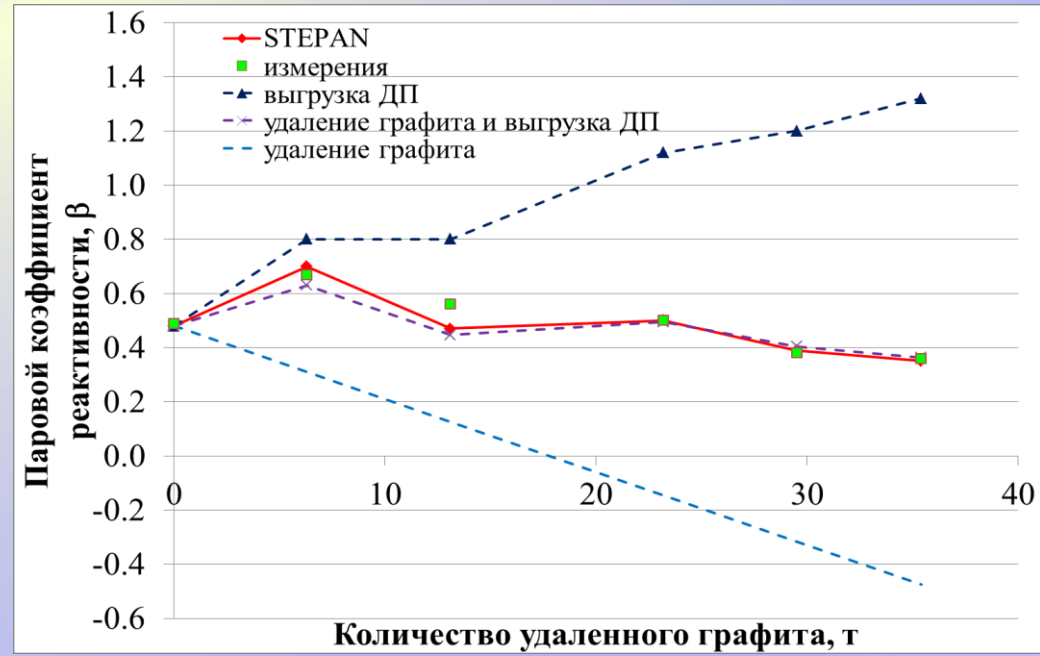
$$0,3\beta_{эф} \leq \alpha_\phi \leq 0,8\beta_{эф}$$

Э/б №2 КАЭС

Продление срока эксплуатации
 РБМК-1000 до 50 лет

Дополнительные факторы
 уменьшения α_ϕ :

1. Топливо с повышенным содержанием четных изотопов U ($1\% \text{ } ^{236}\text{U}$, $5 \cdot 10^{-7}\% \text{ } ^{232}\text{U}$)
2. Накопление ^{60}Co (кобальтовые ДП)





Уменьшение содержания эрбия

Состояние реактора в конце 5-летнего срока:

- отремонтировано ~1100 графитовых колонн,
- удалено ~60 т графита
- в активной зоне 35 кобальтовых ДП

Результаты расчетов по программе STEPAN

Варианты топлива	$\alpha_{\phi}, \beta_{эф}$	$B,$ МВт·сут/кг	$\Delta B,$ %	K_R	Δ $K_R, \%$
Исходное состояние	0,61	15,12	0	1,43	0
2,8%+0,6%Er (конечное)	-0,50	15,36	1,6	1,41	-1,4
2,6%+0,41%Er	0,08	13,85	-8,4	1,41	-1,4
2,7%+0,35%Er	0,44	15,83	4,7	1,48	3,5
2,8%+0,4%Er	0,24	16,62	9,9	1,49	4,2

B – средняя глубина выгорания топлива в активной зоне,

K_R – коэффициент неравномерности энерговыделения



Заключение

Изменение состава топлива (обогащения и содержания эрбия) является гибким инструментом обеспечения безопасной и экономичной эксплуатации реакторов РБМК



**Спасибо
за внимание!**

