



ФЭИ
РОСАТОМ

Концепция ядерного реактора на промежуточных нейтронах с возможностью саморегулирования

Докладчик: Мокшанов Никита Андреевич
м.н.с., АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

ВВЕДЕНИЕ

Основная проблема существующих и разрабатываемых ядерных реакторов

Современные требования к безопасности ядерных реакторов включают наличие дорогостоящих систем и барьеров безопасности, ввиду наличия проблемы:

- **Возможность отказа** систем активного (органы СУЗ) и пассивного регулирования **мощности** (стержни пассивного регулирования, выгорающие поглотители и т.д.).



Повышение стоимости сооружения блока и низкая конкурентоспособность ядерной энергетики из-за значительных затрат на системы и барьеры безопасности в структуре стоимости блока.

- Частые перегрузки активной зоны (через каждые 1,5 – 2 года) приводят к уменьшению КИУМ.

Цель работы – разработка и обоснование концепции ядерного реактора с возможностью саморегулирования, увеличенным временем работы без перегрузок (5-10 лет) и внутренне присущей безопасностью.

Преимущества ядерного реактора с возможностью саморегулирования



Возможность саморегулирования активной зоны вместе с отрицательными пустотным и температурным эффектами реактивности позволяет:

1. Обосновать внутренне присущую безопасность подобного реактора;
2. Исключить активные системы регулирования реактивности во время работы реактора на мощности;
3. Исключить дополнительные системы и барьеры безопасности, что приведёт к существенному (более 50%) **снижению стоимости сооружения РУ.**

Возможность воспроизводства делящегося материала в активной зоне (КВА) позволит:

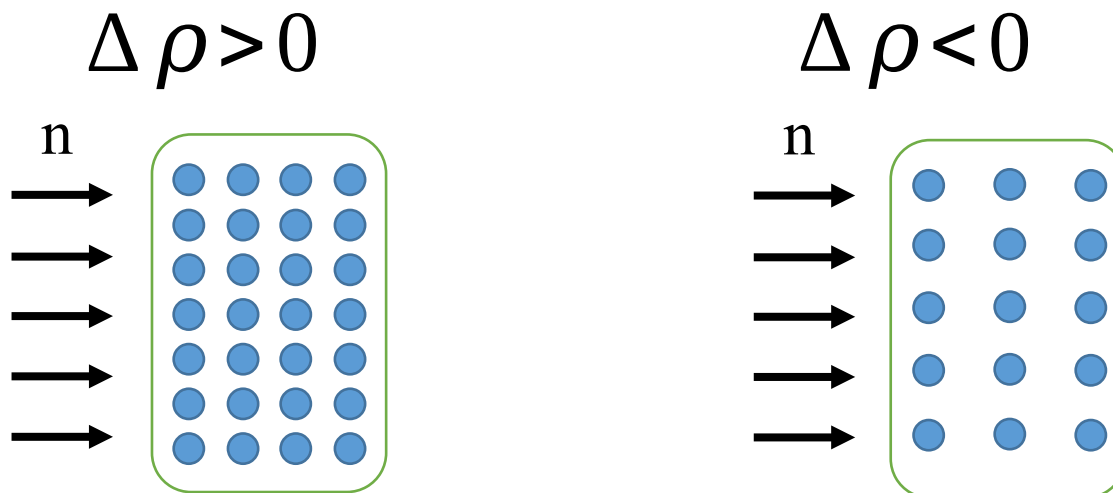
4. Увеличить время работы без перегрузок до 5 – 10 лет, что приведёт к повышению КИУМ;
5. Использовать зону воспроизводства для дожигания МА или облагораживания плутония из ОЯТ существующих реакторов.

Если не предполагается использование СУЗ и пассивных систем контроля, то каким способом регулировать реактивность?

КОНЦЕПЦИЯ

впервые будет осуществляться с помощью эффекта реактивности от изменения концентрации делящегося нуклида при изменении внутренней энергии или температуры материала топлива:

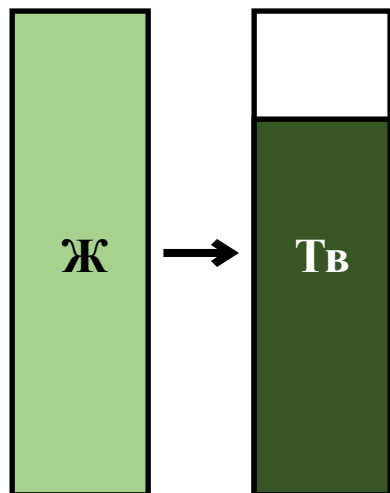
при уменьшении концентрации делящегося изотопа уменьшается макроскопическое сечение деления и увеличивается утечка нейтронов. Это приводит к отрицательному эффекту реактивности при уменьшении концентрации топлива и наоборот.



Требования к материалу топлива

- При увеличении температуры или внутренней энергии материала **концентрация делящегося нуклида должна уменьшаться;**
- Этот процесс должен быть **обратим** (для управления мощностью);
- **Температура**, при которой происходит существенное изменение концентрации, должна быть **выше 500**, но с запасом меньше температуры плавления материала оболочки;
- **Содержание делящихся изотопов** в материале топлива должно быть существенно выше **10% масс.;**
- Величина эффекта реактивности от **изменения концентрации** делящегося изотопа должна быть выше **10** во всей а.з. в **узком** интервале температур;
- Должна обеспечиваться **химическая нейтральность** материала топлива и материала оболочки.

Фазовый переход



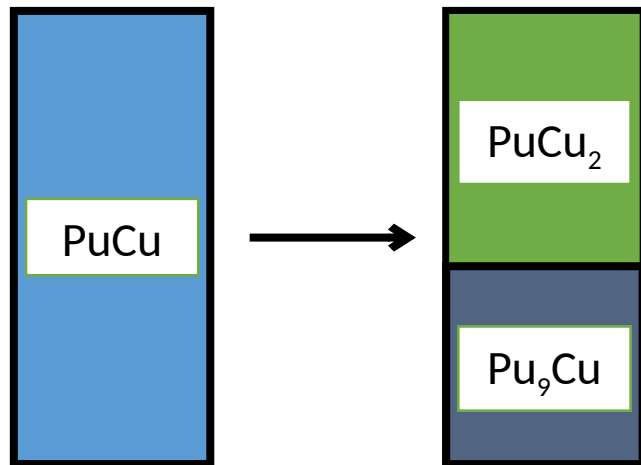
Эффект реактивности от изменения геометрических размеров топлива при фазовом переходе

Однако, вещества, которые обладают способностью к значительному изменению объёма при фазовом переходе (), например, уран-плутоний содержащие соли, имеют низкую теплопроводность (для PuCl_3 - 0,4). Одновременно с этим возникают проблемы с химической активностью материалов такого топлива. Всё это делает **невозможным** их использования в активных зонах.



Сплавы металлов

- Изменение объёма металла при плавлении лежит в пределах 1-5% - этого недостаточно для эффекта реактивности выше 10
- Однако, для многих систем сплавов плутония характерно наличие областей несмешиваемости между линиями ликвидус и солидус.



800

700

Область несмешиваемости

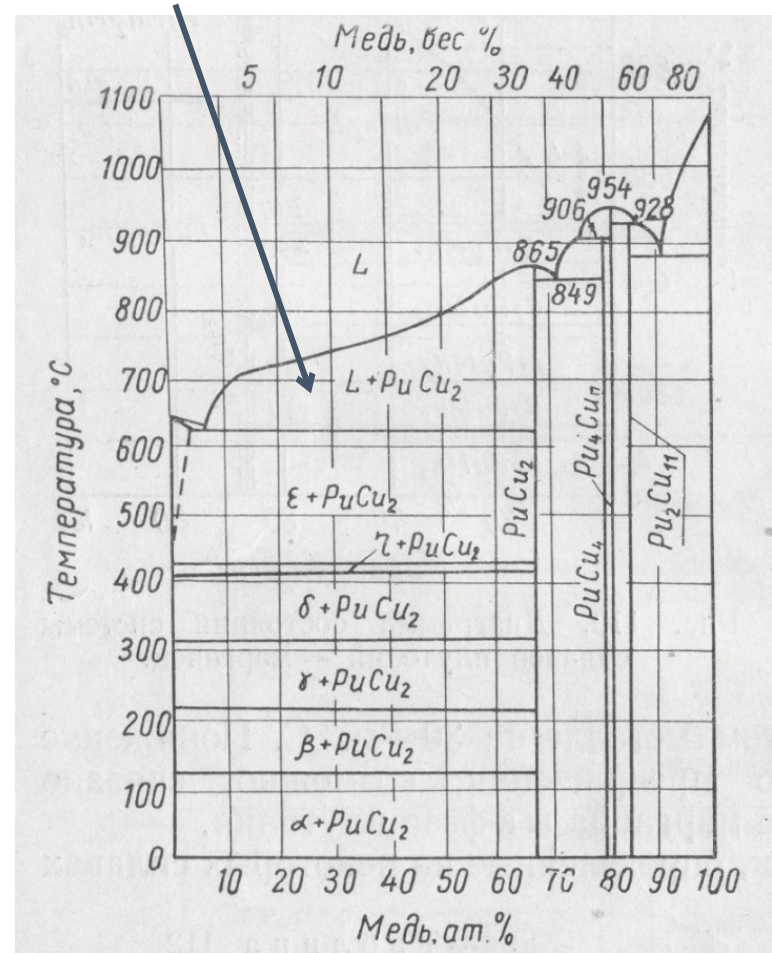


Диаграмма состояния системы сплавов плутоний-медь

РАСЧЁТ

Варианты активных зон

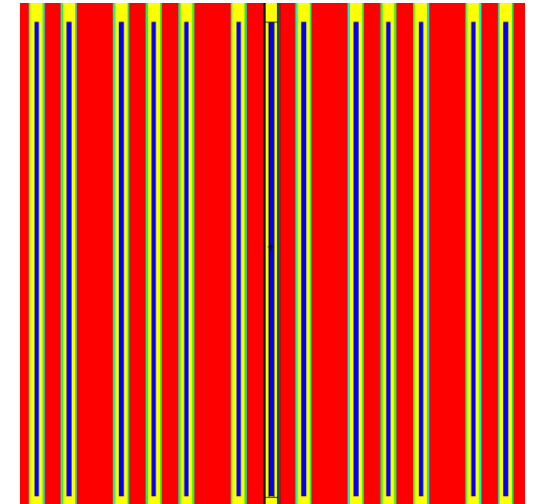
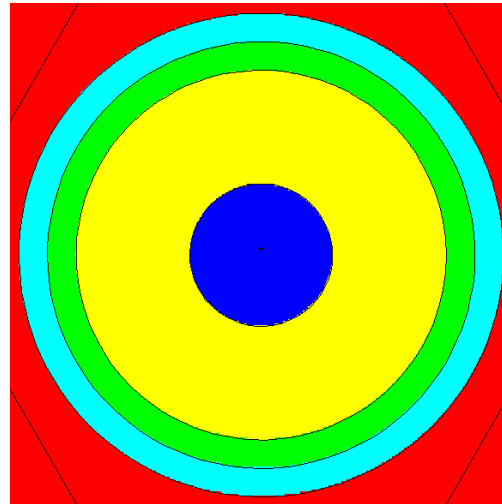
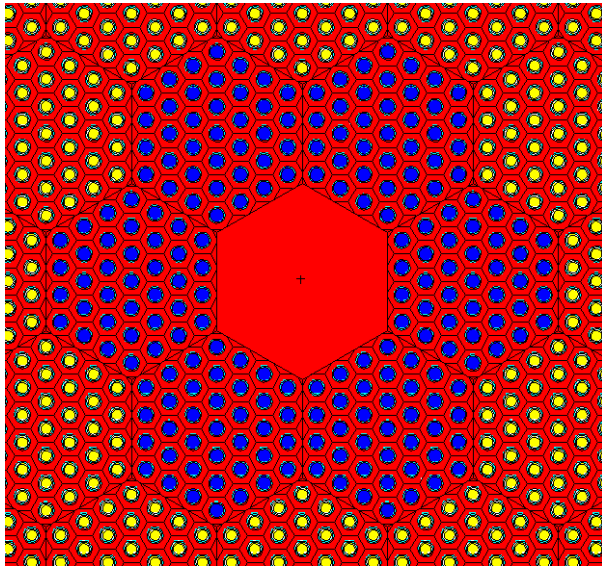


Рис.1. Радиальное сечение 0 варианта а.з.

Рис.2. Радиальное сечение твэл и осевое сечение ТВС 1 варианта а.з.

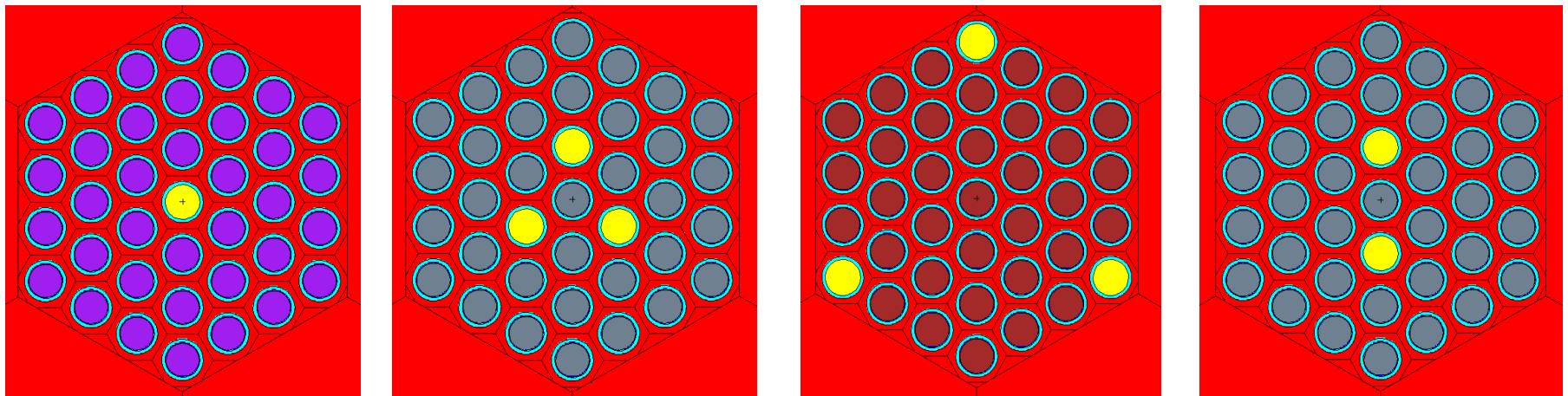


Рис.3. Осевые сечения ТВС 2-5 вариантов а.з.

Технические характеристики моделей активных зон



Параметр	Значение					
Вариант исполнения а.з.	0	1	2	3	4	5
Диаметр а.з., см	40	190	220	230	220	220
Высота а.з., см	30	51	100	94,0	93,0	96
Теплоноситель	Эвтектика Pb-Bi					
Материал топливных ТВЭЛ	Сплав Pu-Cu					
Материал нарабатывающих ТВЭЛ	-	Me U ²³⁸ Zr + Pu				
Содержание Pu в нараб. ТВЭЛ, %	-	0	6,0	1,5	2,1	4,1
Загрузка Pu в а.з., кг	32	871,7	1509	1788	1558	1539
Количество ТВЭЛ в ТВС	37					
Количество ТВС в а.з.	6	163	385			
Количество топливных/ нарабатывающих ТВЭЛ в ТВС	37/0	-	1/36	3/34	3/34	2/35
Диаметр наружный ТВЭЛ, см	1,2	1,7	1,2	1,3	1,2	1,2
Толщина экрана из урана в ТВЭЛ, см	-	0,4	-	-	-	-
Толщина Na-подслоя, см	-	0,1	0,123	0,126	0,123	0,123
Толщина стали в оболочке ТВЭЛ, см	0,1					

Примечания:

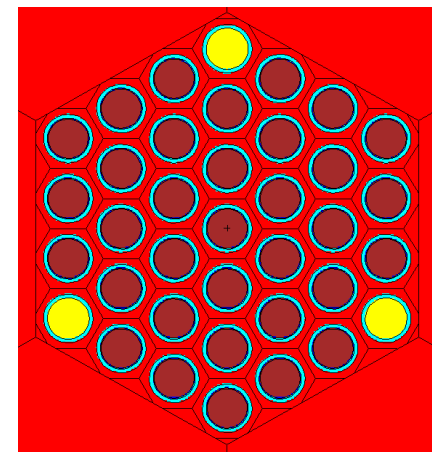
* - изотопный состав плутония: Pu²³⁸ – 0,012%; Pu²³⁹ – 93,800%; Pu²⁴⁰ – 5,800%; Pu²⁴¹ – 0,350%; Pu²⁴² – 0,022% [Morrison S.L., Lindley B.A., Parks G.T. Isotopic and spectral effects of Pu quality in Th-Pu fueled PWRs. Annals of Nuclear Energy. 2018, с. 320];

** - верхний экран над Pu-Cu отсутствует.

Результаты расчёта НФХ и выгорания

Для демонстрации эффекта реактивности были проведены расчёты НФХ и выгорания для различных вариантов исполнения а.з. со свинцово-висмутовым теплоносителем

- ТВС состоит из 3 твэлов из Pu-Cu и 34 твэлов из U-Pu-Zr
- Назначение твэлов из Pu-Cu – **управление**
- Назначение твэлов из U-Pu-Zr – **наработка Pu**



*Осевое сечение ТВС
варианта а.з.*

Эффект реактивности при $T = 100$, (Pu)	48,1
Тепловая мощность, МВт	386
Энергонапряжённость а.з., кВт/л	99
Теоретическое время работы на запасе реактивности, эфф. год	83
СПЭР, (Pu)	-6,2
СНА в год	21,2

Загрузка Pu^{239} в а.з. в начале кампании, кг	1640,0
Выгрузка Pu^{239} из а.з. через 10 лет, кг	1727,5
Выгрузка Pu^{239} из зоны в-ва через 10 лет, кг	511,8
КВА(10 лет)	1,05
КВ(10 лет)	1,37

Сводная таблица результатов расчёта НФХ

Результаты расчёта НФХ для разных вариантов а.з.

Вариант исполнения а.з.	0	1	2	3	4	5
Эффект реактивности при $T = 100$, \$ (Pu)	8,2	54,6	16,8	48,1	44,6	31,7
Тепловая мощность, МВт*	4,2	280	545	386	360	375
Энергонапряжённость а.з., кВт/л	125	194	145	99	102	103
Теоретическое время работы на запасе реактивности, эфф. год**	1	5	***	83	55	***
СПЭР, \$ (Pu)	< 0	-25,2	-8,0	-6,2	-9,4	-8,7
СНА в год	6,7	32,3	41,7	21,2	28,6	25,4

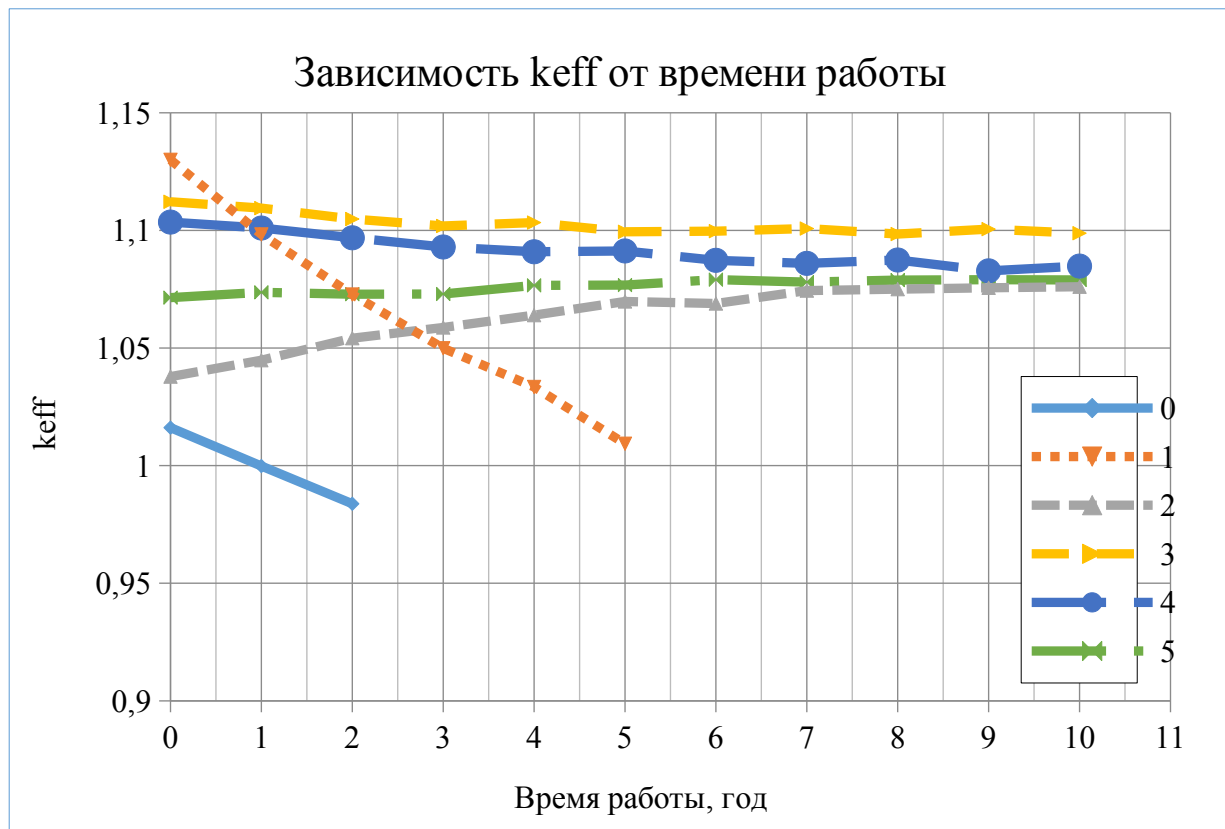
Примечания:

* - мощность вычислена из сравнения площади тепловыделяющей поверхности варианта а.з. и МБИР с учётом зависимости энерговыделения от обогащения топлива;

** - результат экстраполяции без учёта уменьшения компенсационной способности Pu-Cu;

*** - во время кампании k_{eff} возрастает.

Время работы без перегрузки



Из рисунка видно, как меняется динамика k_{eff} при вводе в состав ТВС или твэла U^{238} . Для некоторых вариантов получается положительная динамика k_{eff} . Видно, что оптимально использовать 3 из 37 твэл из Pu-Cu в составе ТВС. Остальные твэлы необходимо выполнить из металлического сплава отвалного U с цирконием.

Расчёт параметров кампании и выгорания

Вариант исполнения а.з.	0	1	2	3	4	5
Тепловая мощность, МВт	4,2	280	545	386	360	375
Теоретическое время работы на запасе реактивности, эфф. год	1	5		83	55	
Общее выгорание на конец кампании или через 10 лет, GWd/MTU	0,6	26,0	43,7	25,9	29,2	30,2
Загрузка Pu ²³⁹ в а.з. в начале кампании, кг	55,0	799,5	1383,8	1640,0	1429,3	1411,6
Выгрузка Pu ²³⁹ из а.з. на конец кампании или через 10 лет, кг	54	920	1520	1730	1460	1500
Выгрузка Pu ²³⁹ из зоны в-ва на конец кампании или через 10 лет, кг	1,4	-	720	512	505	520
КВА(10 лет)*	-**	1,15	1,10	1,05	1,02	1,06
КВ(10 лет)*	1,00	-	1,62	1,37	1,37	1,42

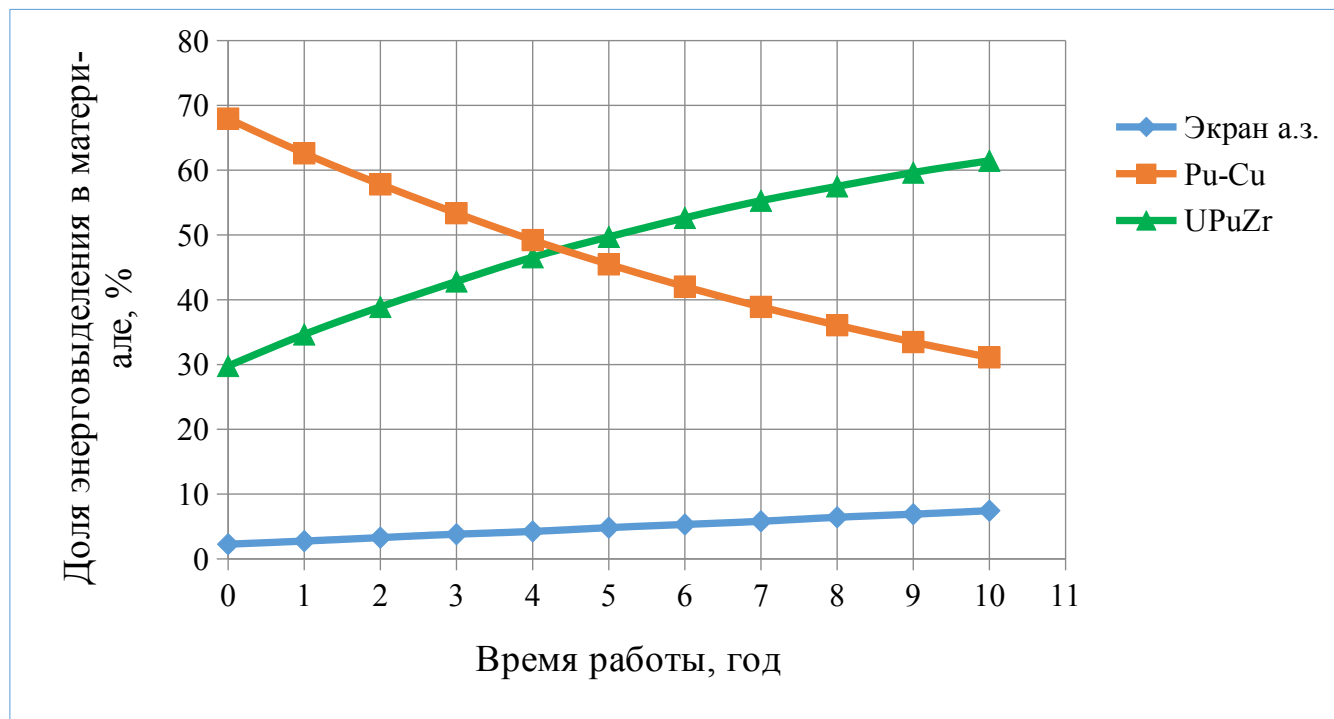
Примечания:

* - КВА, КВ = ;

** - в а.з. 0 варианта воспроизводящий материал отсутствует.

Перераспределение энерговыделения

Зависимость доли энерговыделения в материалах от времени для 3-го варианта а.з.



Наблюдается снижение темпа выгорания в топливных твэлах, которое происходит вследствие наработки плутония и увеличения темпов выгорания в нарабатывающих твэлах.

Так для а.з. 3 варианта энерговыделение в **Pu-Cu** и в **UPuZr** сравнивается к 54 месяцу работы, т.е. в середине кампании. Далее плутоний в основном будет выгорать именно в нарабатывающих твэлах, а сплав плутония с медью будет выступать в роли компенсатора реактивности.

Результаты расчёта НФХ и выгорания



1. Эффект реактивности от расслоения расплава при охлаждении составляет **десятки** ;

2. Ввод в состав а.з. обеднённого урана позволил реализовать возможность **воспроизводства** топлива, что **замедлило скорость выгорания** «управляющих ТВЭЛОВ»;

3. Свинцовый пустотный эффект реактивности **отрицательный**;

4. Время работы без перегрузок ограничивается величиной **СНА** и составляет **5 лет**.

Показана возможность создания реактора с пассивным регулированием мощности, КВА и потенциалом к внутренне присущей безопасности

В результате дальнейшей работы будет:

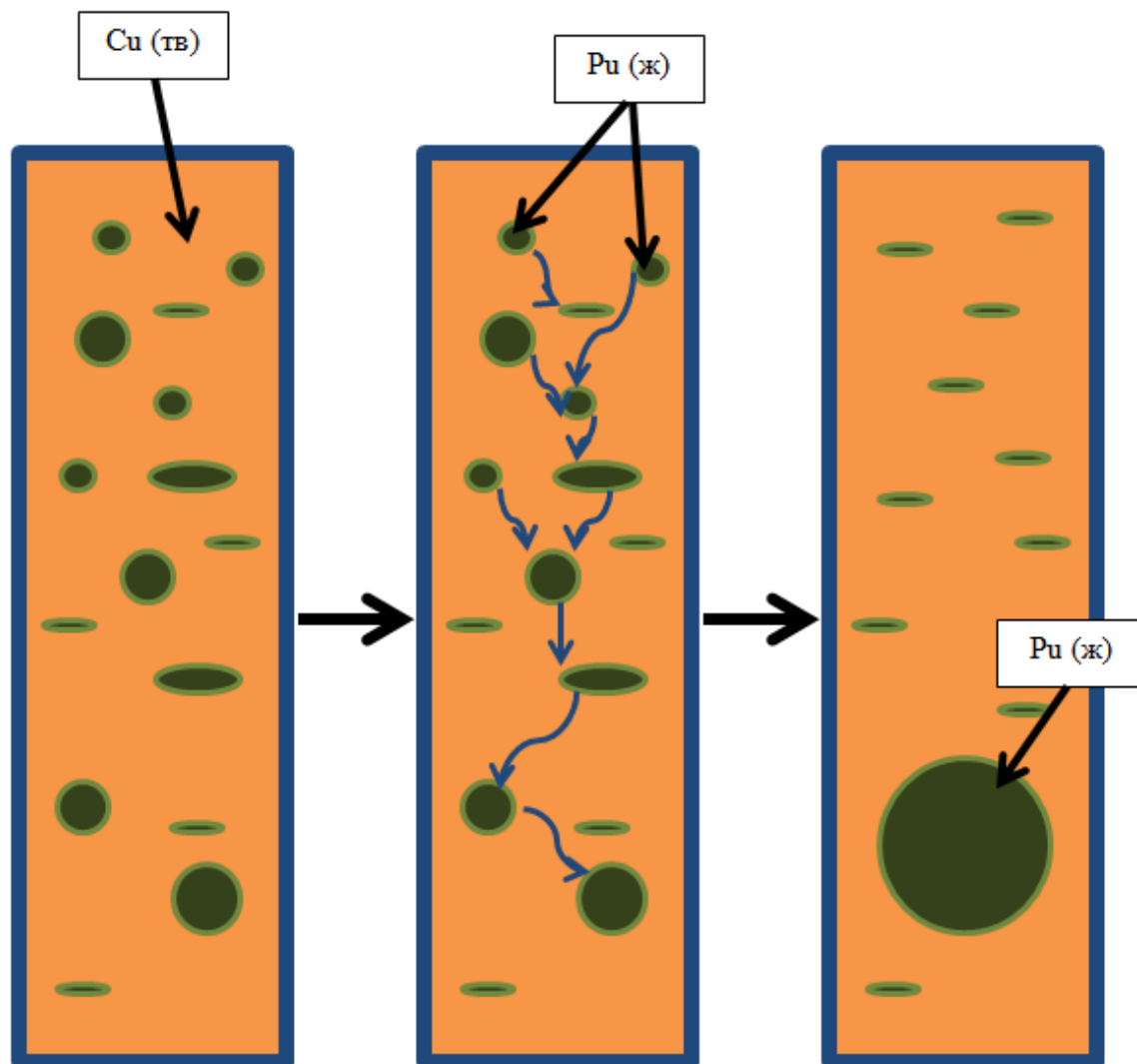
- **Обоснован** выбор материала топлива «управляющих» ТВЭЛ из сплава плутония с металлом
- Расчётным путём обоснована **внутренне присущая безопасность** а.з., которая управляется за счёт свойств материала топлива
- Разработана и обоснована **концепция** ядерного реактора с внутренне присущей безопасностью

Благодарю за консультации и замечания **Гулевича А.В., Елисеева В.А., Пышко А.П., Загорулько Ю.И., Гончар Н.И., Ярыгина В.И., Алексеева П.А.**

Спасибо за внимание

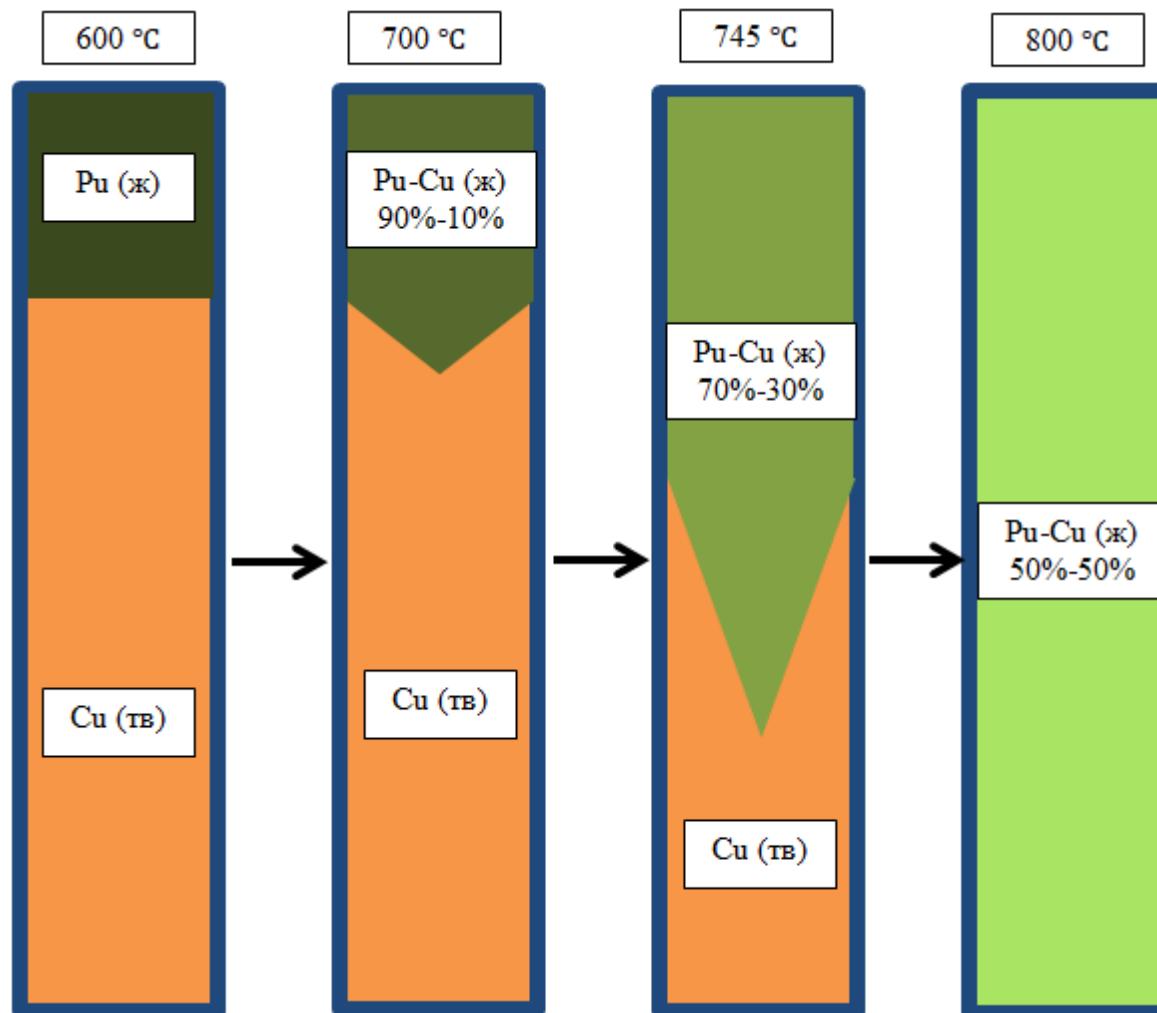
Докладчик: Мокшанов Никита Андреевич
м.н.с., АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

Подготовка сплава Pu-Cu (50%/50%)



Есть **риск** того, что «пузыри» через поры в порошке Cu могут объединяться и собираться преимущественно в нижней части управляющего твэл. Стержней с поглотителем там уже нет, поэтому если это произойдёт даже в одном управляющем твэл, положительная реактивность может превысить , что приведёт к СЦР.

Подготовка сплава Pu-Cu (50%/50%)



Кинетика фазовых переходов в сплаве Pu-Cu

1. Скорость гетерогенных процессов, т.е. компенсация 10 за 100 ч, вполне позволяет реагировать на снижение реактивности а.з. в процессе выгорания (температура расплава снижается с 800 до 700 за 5 лет);
2. Необходимо наличие стержней АЗ, т.к. в случае ввода положительной реактивности (откуда она возьмётся, если реактор работает без перегрузок? – отдельный сложный вопрос) мгновенно компенсировать реактивность только за счёт гетерогенных превращений не удастся;
3. Если реактор по каким-либо причинам будет выведен на нулевую мощность на любом этапе кампании (аварийные процессы или ППР), гетерогенная реакция прекратится. При условии не убывания температур внутри твэла кампания может быть продолжена с «сохранённой на предыдущем шаге» структурой расплав/ PuCu_2 .

Проблемы стойкости металлических оболочек



Реактор LAMPRE-I отличается от основной части твердотопливных РБН, поскольку в качестве ЯТ использовали достаточно редкий вариант – **жидкое топливо на основе эвтектического сплава Pu-Fe ($T_{пл} = 410$)** в танталовых оболочках.

20-мегаватный (тепловая мощность) LAMPRE-I с натриевым теплоносителем был запущен в 1961 г. на площадке Лос-Аламоса и проработал на пониженной мощности в 1 МВт в течение **менее 1 года**.

Эксплуатация реактора показала, что **главной проблемой является коррозионная стойкость конструкционных материалов активной зоны, работающих при воздействии температуры и радиации в условиях коррозионного повреждения со стороны жидкого ЯТ.**

Источник: Вахрушин А.Ю., Квятковский С.А., Коновалов И.И., Птицын П.Б. Уран-плутониевое топливо: история, технико-экономические оценки, перспективные области применения. ЦАИР.