



# ПОИСК ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ В РЕАКТОРАХ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Болдырев А.М.(МИФИ), Ляпин Е.П.(БАЭС), Селезнев Е.Ф.(НИЦ КИ)



**Реакторы типа БН (БН-600 и БН-800), занимают в Ядерной Энергетике страны менее 5% и темпы развития в стране реакторов этого типа невысоки.**

**Понятие «коммерческий быстрый реактор» предполагает современный уровень топливоиспользования, обеспечивающий конкурентоспособность с тепловыми реакторами, что не достигается с использованием традиционного оксидного топлива.**

**Однако дальнейшее развитие таких реакторов, как в нашей стране, так и за рубежом, связано с проведением мероприятий по снижению стоимости отпускаемой электроэнергии.**

**БР производят два продукта – электроэнергию и избыточное ядерное топливо. Для увеличения производства последнего рассматривают переход на всё более плотное топливо: карбидное, нитридное и наиболее плотное – металлическое.**



Металлическое топливо имеет большой опыт работы в реакторах типа БН. Достигнуты глубины выгорания 10%, продемонстрирована способность достичь глубины выгорания до 20% с оболочками из ферритно-мартенситных сталей.

**Преимущества металлического топлива:** высокая плотность, позволяющая достигать высоких КВ, а также низкая стоимость переработки отработавшего топлива из-за использования технологии плавления.

С таким топливом в реакторах типа БН:

- более жесткий спектр нейтронов благоприятен с точки зрения баланса нейтронов;
- высокая теплопроводность, из-за чего топливо работает при пониженных температурах;
- отличная химическая совместимость с натриевым теплоносителем;
- относительно простой процесс изготовления топлива;
- продемонстрированная способность к электрохимической переработке, что обеспечивает желательный уровень нераспространенческих свойств



**Изготовление металлического топлива экологично, т.к. почти безотходное, занимает небольшие площади и обеспечивает высокую производительность.**

**Пирохимическая переработка U-Pu-Zr топлива требует в 5 раз меньше энергии, чем для двуокиси, позволяет извлекать отдельно изотопы U и Pu, продуктов деления остаётся около 1%.**

**Металлическое топливо отливается под давлением в виде длинных стержней из бинарных (U-Zr) или тройных (U-Pu-Zr, U-TRU-Zr) сплавов с долей циркония от 5% до 30%. Наличие циркония позволяет повысить температуру плавления и прочность конструкции, а также минимизировать возможности химического взаимодействия топлива и оболочки. Топливо термически связано с оболочкой через натриевый подслоя, что обеспечивает почти беспрепятственную передачу тепла от топлива к теплоносителю.**

**Имеется химическая совместимость металлического топлива и натриевого теплоносителя, что несёт отсутствие реакций с выделением энергии при взаимодействии топлива и натрия.**



**Под облучением в металлическом топливе происходят: перераспределение компонентов топливного сплава; образование пористости; удержание и выделение газообразных осколков; радиальное и аксиальное распухание топлива; образование легкоплавкой эвтектики на границе раздела топливо-оболочка, приводящие к постепенному истончению оболочки.**

**Рабочая температура обычно составляет от  $700^{\circ}\text{K}$  до  $1000^{\circ}\text{K}$  в центре ТВЭЛов, в зависимости от состава топлива и позиции по высоте. Температура плавления топлива составляет около  $1500^{\circ}\text{K}$ , в зависимости от его состава.**

**Низкие рабочие температуры и температуры в переходных процессах обеспечивают относительно небольшие Допплер-эффекты реактивности, что облегчает контроль за реактивностью и уменьшает возможную величину случайно введённой реактивности.**



## Недостатки металлического топлива:

- высокая теплопроводность дает малый перепад температур по топливной таблетке по сравнению с оксидным топливом, что снижает обратную связь по реактивности;
- более жесткий спектр нейтронов в а.з. ведёт к увеличению НПЭР;
- повреждение под воздействием газообразных осколков оболочки твэла. При рабочих температурах это повреждение медленное, но при повышенных температурах и аварийных режимах оно может привести к ускоренному разрушению оболочки. Образование эвтектики зависит от температуры, что накладывает ограничения на выходную температуру теплоносителя.



- Рассмотрим некоторые пути модернизации реакторов типа БН, связанные с использованием :
  - оригинальных конструкций ТВС, с аксиальной прослойкой воспроизводящего материала с металлическим топливом и металлического обогащенного топлива в нижней половине активной зоны реактора;
  - путем внедрения новых конструкционных материалов для оболочек ТВЭЛОВ,
  - возможному использованию газовой турбины вместо паровой.



Торцевой экран металлический легированный обедненный уран	35	35	Натриевая полость
Активная зона таблетки $\text{PuO}_2+\text{UO}_2$	40	90-100	Активная зона таблетки $\text{PuO}_2+\text{UO}_2$
Прослойка металлический легированный обедненный уран	10-20		
Активная зона металлический легированный сплав U-Pu-10Zr	40		
Торцевой экран металлический легированный обедненный уран	35	35	Торцевой экран обедненный оксид урана

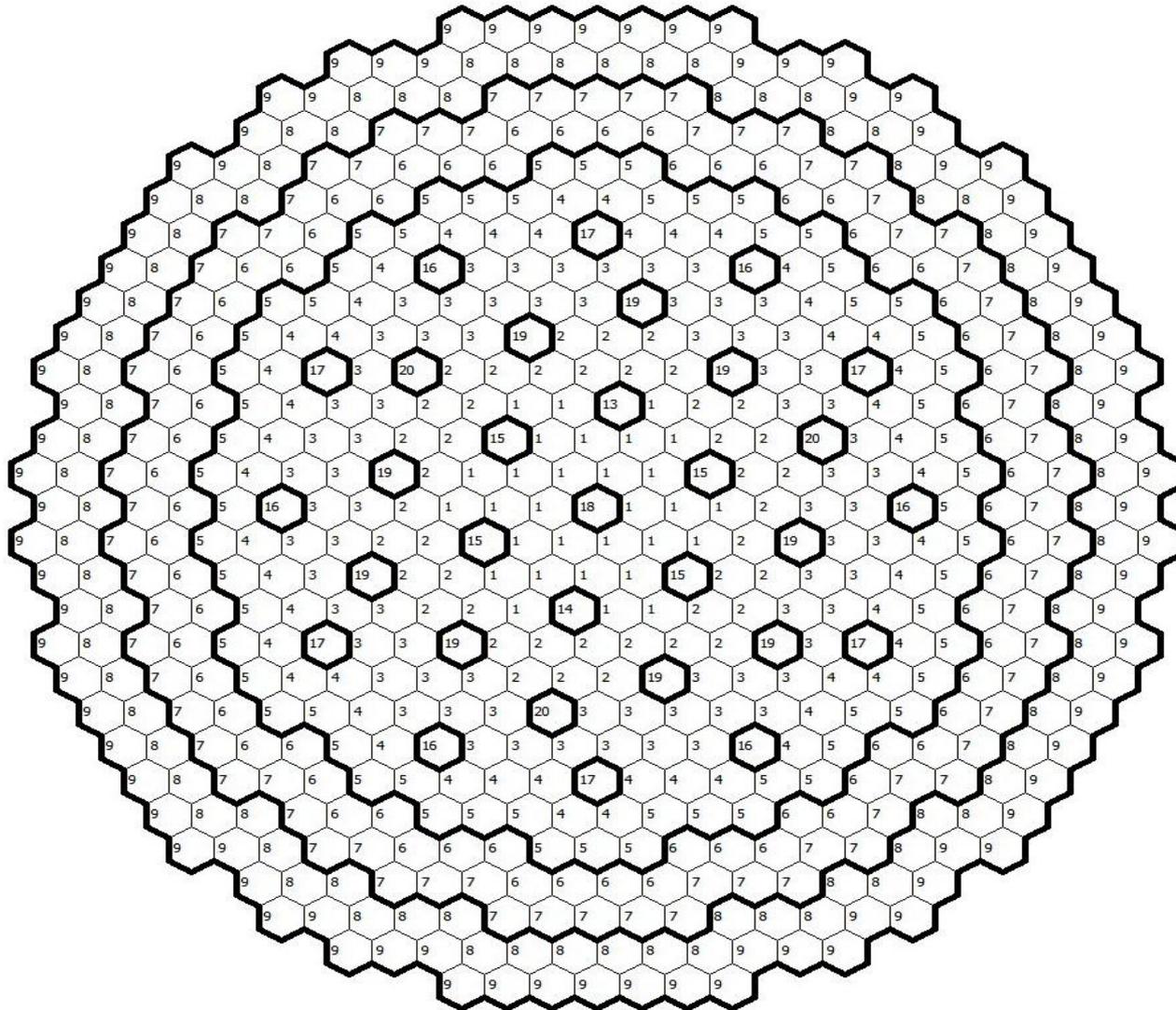
Структура разбиения гетерогенной и гомогенной ТВС а.з. по высоте (см)

Гибридная зона может быть размещена вместо гомогенной без изменений конструкции реактора и напорного коллектора



<b>Мощность реактора, тепловая/электрич., МВт</b>	<b>2800 / 1200</b>
<b>Топливо активной зоны</b>	<b>U-13,3Pu-10Zr/(18,5Pu-U)O<sub>2</sub></b>
<b>Эффективная плотность топлива, г/см<sup>3</sup></b>	<b>12,5/9,0</b>
<b>Длительность микрокампании, эф. сут.</b>	<b>330</b>
<b>Материал зон воспроизводства</b>	<b>металлический обедненный уран</b>
<b>Содержание U-235 в обедненном уране, %</b>	<b>0,2</b>
<b>Высота металлических торцевых экранов, см</b>	<b>2*35</b>
<b>Число органов СУЗ</b>	<b>27</b>
<b>Шаг ТВС, мм</b>	<b>185</b>
<b>Диаметр твэл×толщина оболочки, мм</b>	<b>9,3×0,6</b>
<b>Количество твэлов в ТВС</b>	<b>271</b>
<b>Объемная доля топлива в активной зоне</b>	<b>0,498</b>
<b>Объемная доля теплоносителя</b>	<b>0,298</b>

# Картограмма загрузки а.з.



1,2,3,4,5 – ТВС ЗМО (223);  
6,7 – ТВС ЗБО (168);  
8,9 – ТВС БЗВ (162);  
13-20 – стержни СУЗ (31)

**Крайний ряд ТВС а.з. без аксиальной прослойки.**

**Это позволило:**

**-поднять мощность крайних ТВС на ~20%;**

**-выровнять накопление  $P_{th}$  в прослойке.**

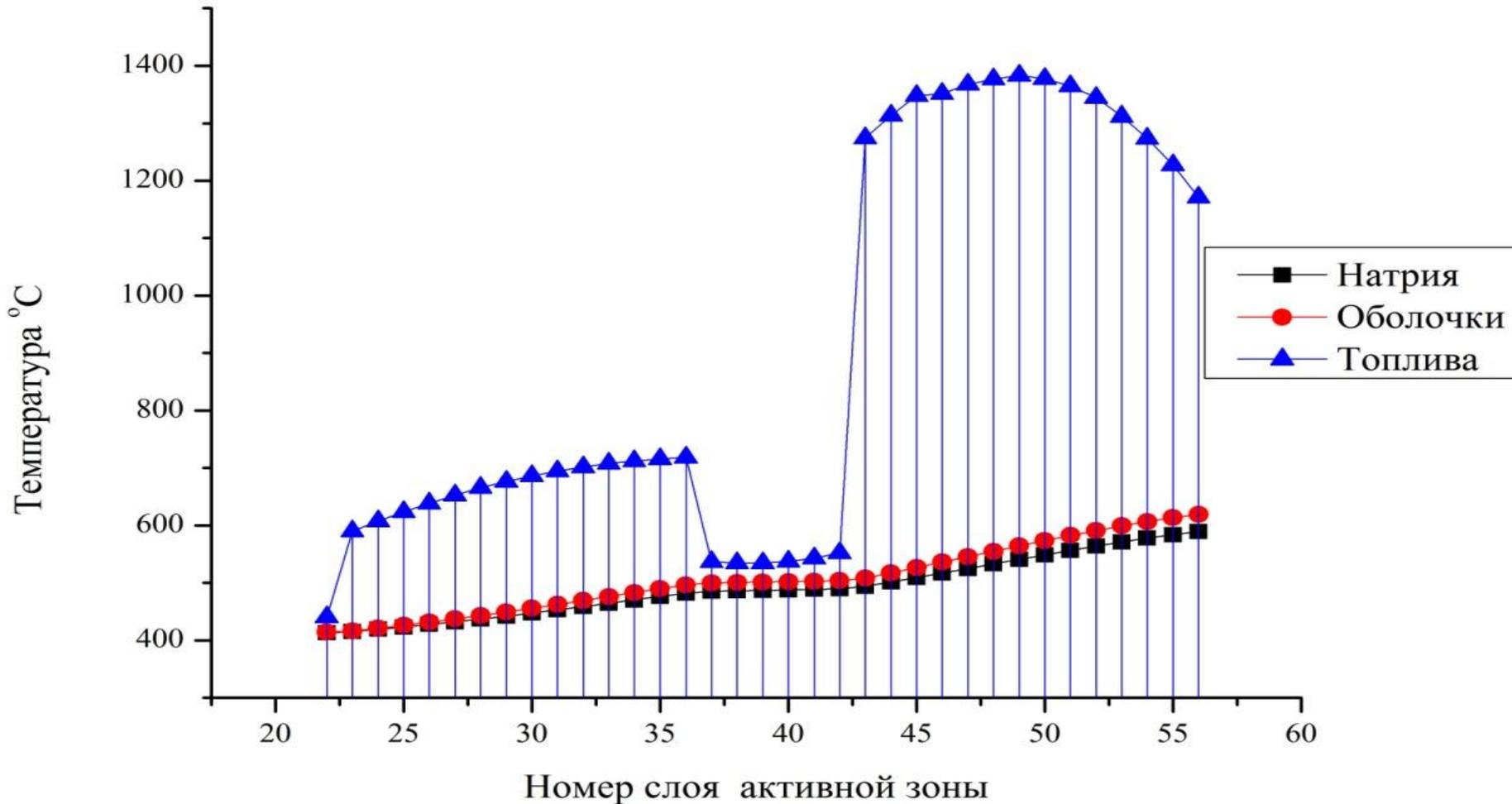
# Температура теплоносителя, оболочки и топлива в канале с ТВС а.з.



НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

КУРЧАТОВСКИЙ КОМПЛЕКС АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

## с максимальным энерговыделением



# Характеристики активной зоны



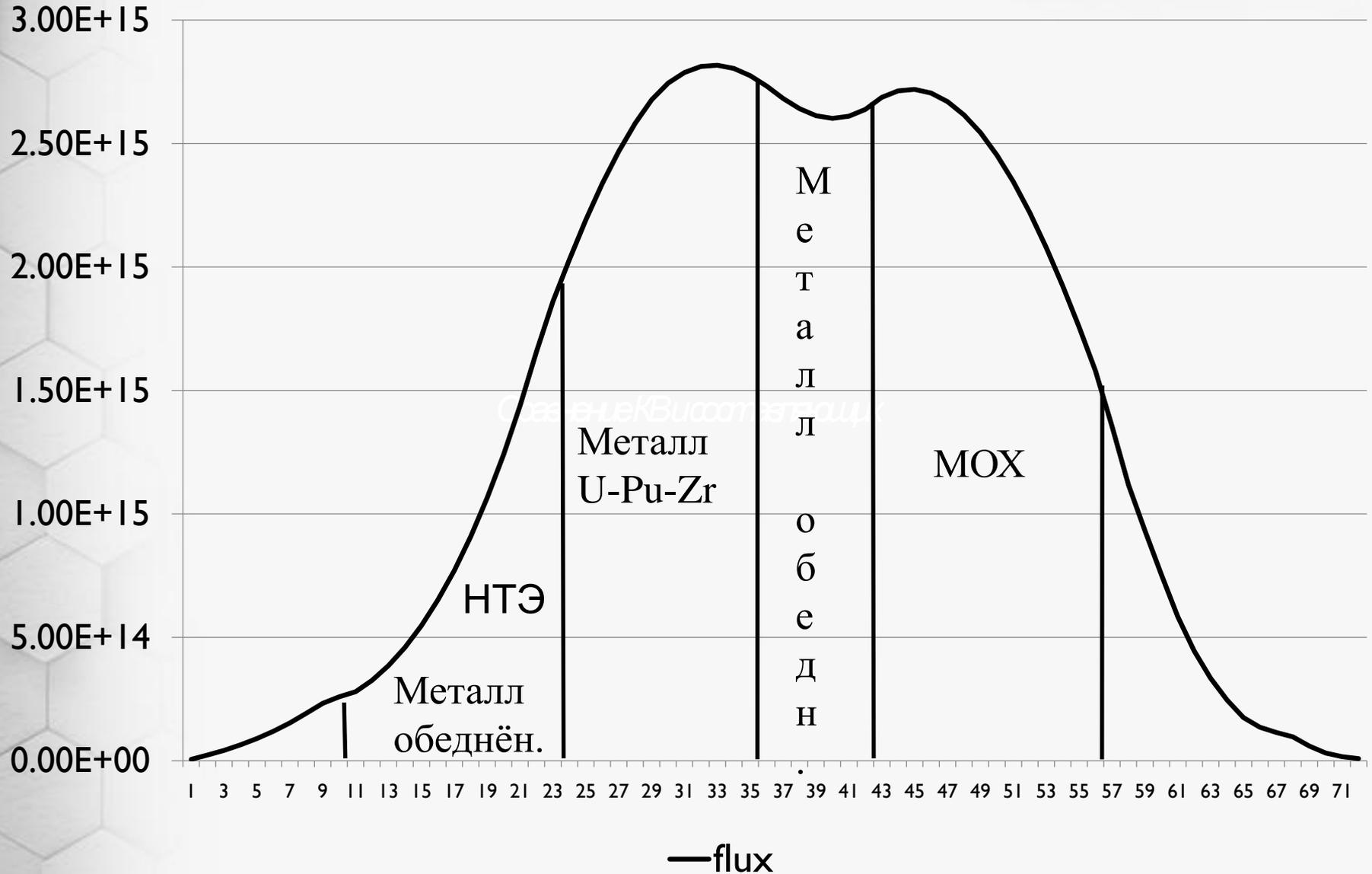
Название функционала	Един.	Гетерогенная модель	Гетер. с Na полостью	Гомогенная модель
$\beta_{eff}$	$10^{-3}$	<b>4,16</b>	<b>4,12</b>	<b>4,06</b>
Максимальная линейная нагрузка	КВт/м	<b>39,2</b>	<b>43,2</b>	<b>43,5</b>
Максимальная температура оболочки в части с металлическим топливом	°C	<b>535</b>	<b>552</b>	-
Максимальная температура оболочки в МОХ части	°C	<b>639</b>	<b>670</b>	<b>642</b>
КВ		<b>1,48 (-ВТЭ)</b>	<b>1,45</b>	<b>1,23</b>
КВА		<b>0,88</b>	<b>0,85</b>	<b>0,96</b>
КВ БЗВ		<b>0,16</b>	<b>0,16</b>	<b>0,12</b>
КВ НТЭ		<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,15</b>
КВ прослойки		<b>0,24</b>	<b>0,24</b>	-
Кz ТВС		<b>1,12</b>	<b>1,18</b>	<b>1,20</b>
Температурный коэффициент реактивн.	pcm/°C	<b>-0,54</b>	<b>-0,60</b>	<b>-0,85</b>
Мощностной коэффициент реактивности	pcm/%N	<b>-1,32</b>	<b>-1,48</b>	<b>-2,91</b>
НПЭР	% ΔК/К	<b>2</b>	<b>0,34</b>	<b>0,29</b>
Потеря реактивности за кампанию	% ΔК/К	<b>0,33</b>	<b>0,90</b>	<b>1,30</b>



Отказ от использования металлического топлива в сегодняшних проектах реакторов связывают с недостаточностью экспериментального обоснования использования такого топлива в реакторе.

Сегодня в работе находятся АЭС с РУ БН-600 и БН-800.

Почему бы в них не провести экспериментальное обоснование использования металлического топлива в реакторе через облучение экспериментальных сборок или ТВЭЛОВ с ним, аналогичные эксперименты с нитридным топливом там проводятся.





Снижение стоимости продукции за счет увеличения длины кампании сборки из-за перехода на использование новых материалов в чехле ТВС и оболочках ТВЭЛОВ планируется в проекте БН-1200М.

Целью программы работ, созданной на основе БН-1200М, является выполнение работ для снижения удельных расходов на ядерное топливо и составных частей активных зон реакторов БН-600, БН-800.

Цель достигается путем увеличения выгорания топлива и длительности кампании ТВС путем внедрения новых материалов для оболочек ТВЭЛОВ (новой аустенитной стали ЭК164-ИД х.д.), а затем ферритно-мартенситных сталей типа (ЧС-139), разработки и реализации новых проектов активных зон, в том числе – активных зон с аксиальной прослойкой из воспроизводящего материала.



Сейчас для РУ БН-600 разрабатывается а.з. 01М4 с кампанией до 800 эфф.сут для основного массива ТВС при сохранении четырёхкратной схемы перегрузки.

Максимальная повреждающая доза на оболочку ТВЭла составит 110 сна, максимальное выгорание топлива – 15,2%.

Аналогичные работы планируются и по переходу ТВС РУ БН-800 на увеличение их кампании до  $5 \cdot 155$ , т.е. 775 эфф.сут с максимальной величиной выгорания до 145 сна.

Эти работы, проводимые под эгидой главного конструктора, следует только приветствовать.

Оценку радиационной повреждающей дозы реакторных материалов характеризуют числом смещений на атом (СНА) с использованием специальных сечений атомов материала

$$СНА = \sigma_{СНА} * F * T,$$

где  $\sigma_{СНА}$  - микроскопическое сечение образования СНА,  
F – плотность потока нейтронов,  
T – время облучения.

Для расчета микроскопического сечения образования СНА во многих работах рекомендуется использовать классическую NRT-модель, согласно которой

$$\sigma_{СНА} = K \frac{E_{damage}}{2E_d}$$

где  $E_{damage}$  – передаваемая атому повреждающая энергия,  
 $E_d$  – пороговая энергия смещения,  
K – коэффициент эффективности повреждающей энергии.



# Конструкционные материалы

$E_{damage}$  зависит от спектра первично выбитых атомов и распределения энергии отдачи между возбуждением электронов и движением ядер, первоисточников для величины  $E_d$  не так уж много, а для ряда важнейших нуклидов они и вовсе отсутствуют (Si, Ca, Cr, Mn);

$E_d$  не определится с хорошей точностью, не только из-за точности эксперимента, но и **зависимостью от кристаллографической направленности** проводимого эксперимента.

Величину  $K$  переопределяют от 0.8 до 1.0.

Полная величина  $E_{damage}$  для нуклида определяется как

$$E_{damage,g}^{tot} = E_{damage,g}^{et} + E_{damage,g}^{inl} + E_{damage,g}^{cap}$$

где  $E_{damage,g}^{et}$ ,  $E_{damage,g}^{inl}$ ,  $E_{damage,g}^{cap}$  величины повреждающей дозы от упругого рассеяния, неупругих процессов и захвата.

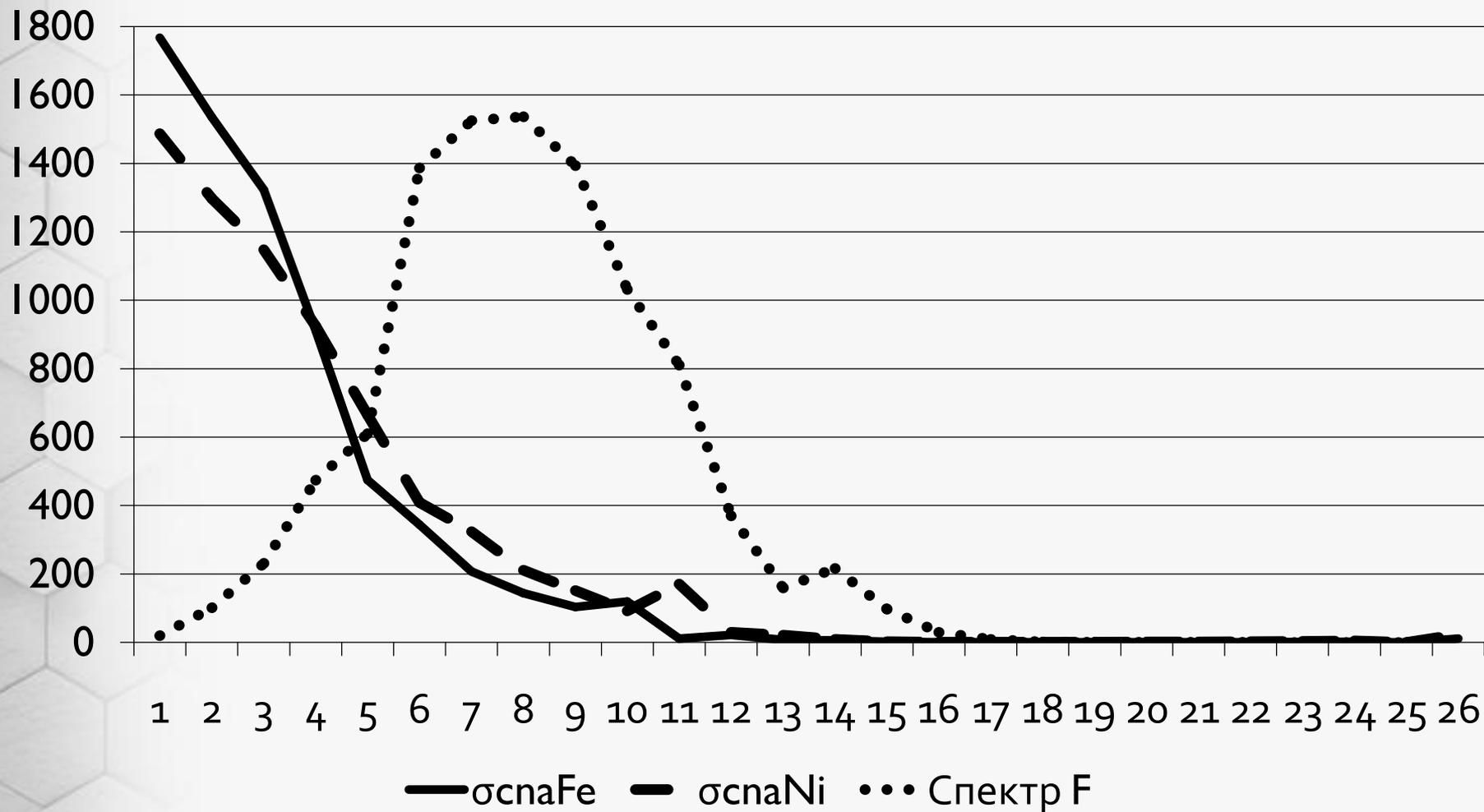
Для оценки влияния нейтронных данных на США берутся данные

$E_{damage}$  в групповом энергетическом разбиении

$$\sigma_{СНА,g} = \sigma_{damage,g}^{tot} = \sigma_{damage,g}^{el} + \sigma_{damage,g}^{inl} + \sigma_{damage,g}^{cap}$$

Эту сумму расширяют сечениями  $(n,2n)$ ,  $(n,a)$  и т.д.

## Сечения смещения Fe и Ni и спектр в БН



# Сечения смещения Fe и Ni и спектр в БН



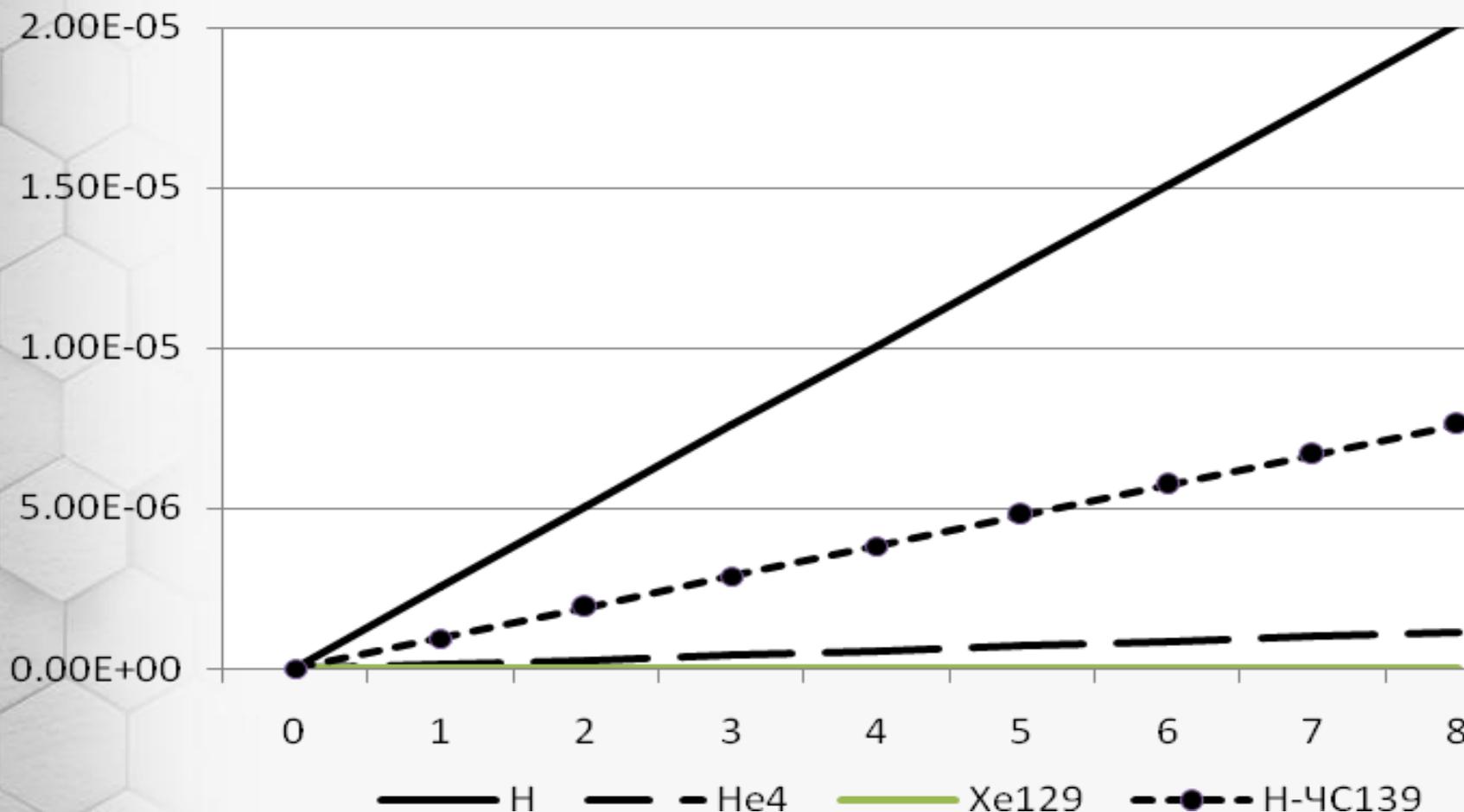
Использование программы расчета изменения концентраций нуклидов металла под воздействием плотности потока нейтронов (поля нейтронов) с отслеживанием образования более 500 нуклидов с возможностью дальнейшего моделирования изменений в кристаллической структуре металла (образование газовых молекул – H, He, C, N, O и др. в кристаллической структуре) реализовано в комплексе ГЕФЕСТ с использованием соответствующих сечений.

Получаемые расчетные данные могут предоставить возможность отхода от интегральной оценки радиационной нагрузки (СНА) к детальной оценке поведения нуклидов в кристаллической структуре. Ниже на рис. представлены данные по концентрациям газов в штатной стали ЧС68-ИДх.д. и стали ЧС-139, в последней накопление водорода в три раза меньше, чем в стандартной стали.



# Газы в оболочках ТВЭЛОВ БН

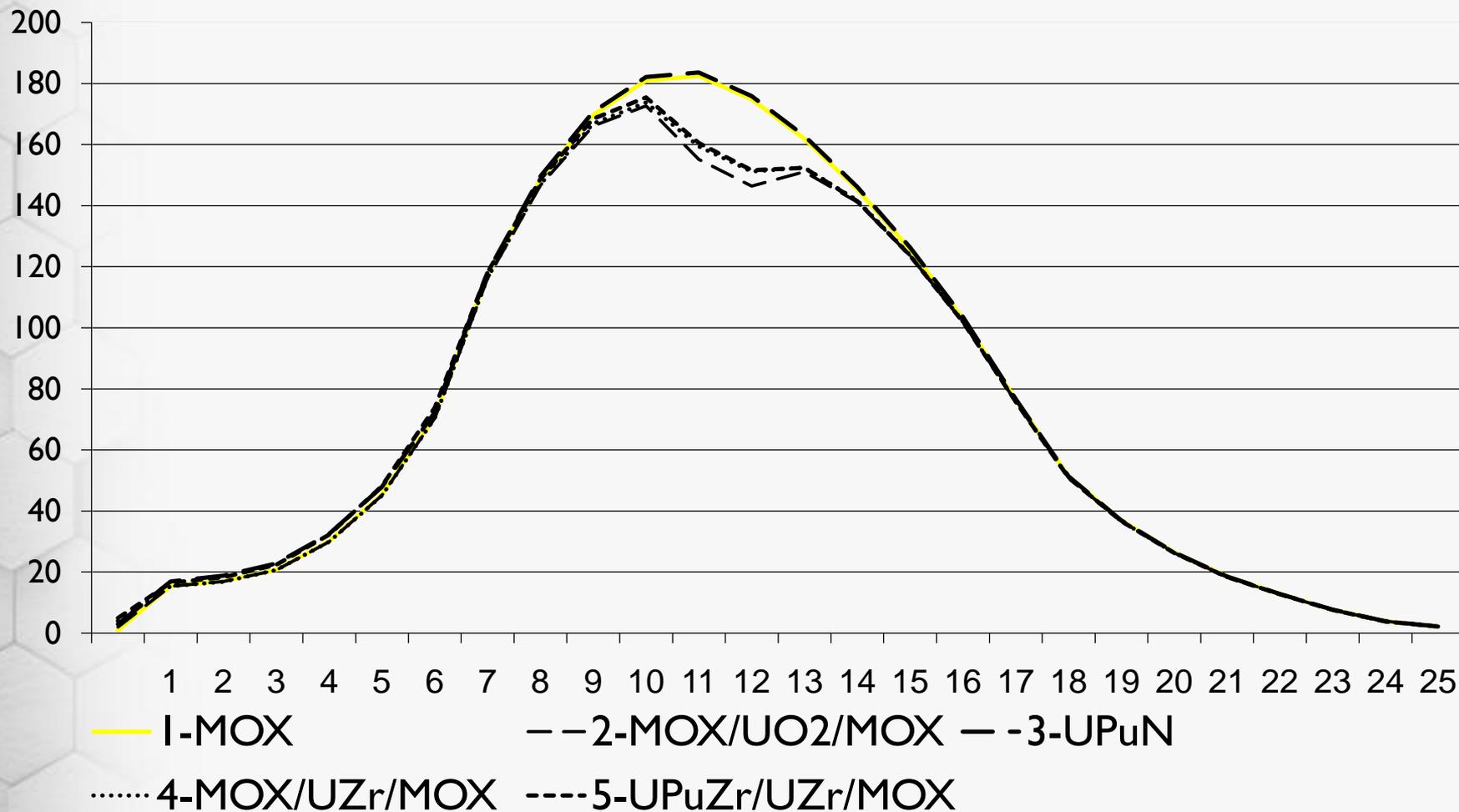
Изменение концентраций газов по МКК в штатной стали  
ЧС68-ИДх.д. и ЧС139



# Значение смещения в ТВС БН



## Значения СНА на оболочке твэла по высотным ячейкам твэла в БН-800



# Перевод паровой турбины на газовую



Переход возможен при использовании силового цикла со сверхкритическим  $s\text{CO}_2$  – газ, удерживаемый выше критической температуры и давления, что заставляет его действовать как газ, имея плотность жидкости. Он нетоксичен и негорюч, служит высокоэффективной жидкостью для выработки энергии, поскольку небольшие изменения температуры или давления вызывают значительные сдвиги в его плотности.

Замена пара  $s\text{CO}_2$  повышает КПД почти на 10%. Оборудование  $s\text{CO}_2$  составляет 1/10 размера обычных компонентов электростанций, что снизит воздействие АЭС на окружающую среду, а также стоимость строительства новых объектов, которые будут значительно меньше, чем современные АЭС.

Кроме того, использование теплообменника натрий-газ, вместо натрий-вода/пар устраняет проблему аварийности при контакте натрий-вода/пар.



# Заключение

Представлены данные первичных исследований а.з. в БН с металлическим топливом с легированным топливом U-nPu-10Zr.

Показано, что гетерогенный вариант а.з. с металлическим топливом в нижней, холодной её части, и оксидного топлива в верхней, горячей её части, с прослойкой между ними из металлического обедненного урана имеет преимущества в плане воспроизводства топлива.

Предлагается продолжить исследования с целью поиска оптимальной компоновки а.з. с точки зрения безопасности для РУ типа БН-1200, а также начать облучение в БН-600 и БН-800 ТВС с металлическим топливом.

Рассмотрена возможность оценки радиационной нагрузки на основе анализа накопления газа в рамках работ по снижению операционных затрат на эксплуатацию БН-600 и БН-800.

**Спасибо  
за  
внимание!**