

## Оценка влияния кюрия на нейтронно-физические и теплофизические характеристики реакторов типа ВВЭР и БН в условиях гомогенного размещения

В.В. Храмков,<sup>\*</sup> Д.Р. Алиев,<sup>†</sup> А.А. Воронцова, Э.А. Гердт, М.А. Попов, В.О. Скулкин  
Обнинский институт атомной энергетики — филиал Национального исследовательского  
ядерного университета «МИФИ», отделение ядерной физики и технологий  
Калужская область, 249039, городской округ «Город Обнинск», г. Обнинск, тер. Студгородок, д. 1  
(Поступила в редакцию 03.06.2025; подписана в печать 28.09.2025)

Целью работы является исследование влияние кюрия на нейтронно-физические и теплофизические характеристики ВВЭР-1200 и БН-600. Для проведения расчетов были созданы нейтронно-физическая и теплофизическая модели тепловыделяющих сборок (далее ТВС) реакторов. Кюрий добавлялся к основному топливу гомогенно в различных долях в диапазоне от 0.1 до 20% в виде оксида  $\text{CmO}_2$ . Рассматриваемые характеристики: коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде, энергетический спектр, пространственное распределение температур в тепловыделяющем элементе (далее ТВЭЛе). Более сильное воздействие наблюдается на реактивность модели ВВЭР-1200, где  $K_{\text{беск}}$  уменьшается на 3.85%. В случае с БН-600 максимальное падение составило 3%. Добавление кюрия способствует увеличению плотности потока нейтронов в тепловой области ВВЭР-1200. Также кюрий значительно влияет на реактивность быстрого реактора, что говорит о возможности использования его в качестве топлива. При добавлении оксида кюрия максимальные температуры топлива снижаются на величину порядка  $500^\circ$ .

PACS: 89.30.Gg.

УДК: 621.039.54.

Ключевые слова: кюрий, минорные актиниды, отработавшее ядерное топливо, быстрые реакторы, тепловые реакторы, коэффициент размножения нейтронов, градиент температур, спектр нейтронов, топливная кампания.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассматривается влияние кюрия на нейтронно-физические характеристики реакторов. Кюрий, являющийся представителем минорных актинидов, нарабатывается во время эксплуатации ядерного реактора путём трансмутации из урана-238 и других трансурановых элементов. В настоящее время данный элемент не используется, однако он является одним из основных источников радиотоксичности в отработавшем ядерном топливе (далее ОЯТ), что усложняет его утилизацию и захоронение. В следствие этого, актуальна проблема с накоплением кюрия [1].

Минорные актиниды нарабатываются в результате ядерных превращений элементов ядерного топлива в реакторе и извлекаются из него в составе ОЯТ. Конкретный изотопный состав и количество минорных актинидов (далее МА) в ОЯТ сильно зависят от типа исходной топливной композиции, обогащения, нейтронного спектра реактора, глубины выгорания топлива, продолжительности выдержки облученного топлива после выгрузки из реактора. Основными нарабатываемыми изотопами кюрия тепловых реакторов являются  $^{242}\text{Cm}$ ,  $^{243}\text{Cm}$  и  $^{244}\text{Cm}$ . Их образование происходит в активной зоне через механизм последовательного нейтронного захвата: ядра тяжелых элементов, таких как уран или плутоний, поглощают нейтроны, что приводит к увеличению их массового числа. После каждого захвата нейтрона ядро может претерпевать бета-

распад, в ходе которого нейтрон превращается в протон, повышая атомный номер элемента. Многократное повторение этих процессов создаёт цепочку ядерных превращений, в результате которой формируются всё более тяжёлые изотопы, включая кюрий [2]. Данные процессы показаны на рис. 1.

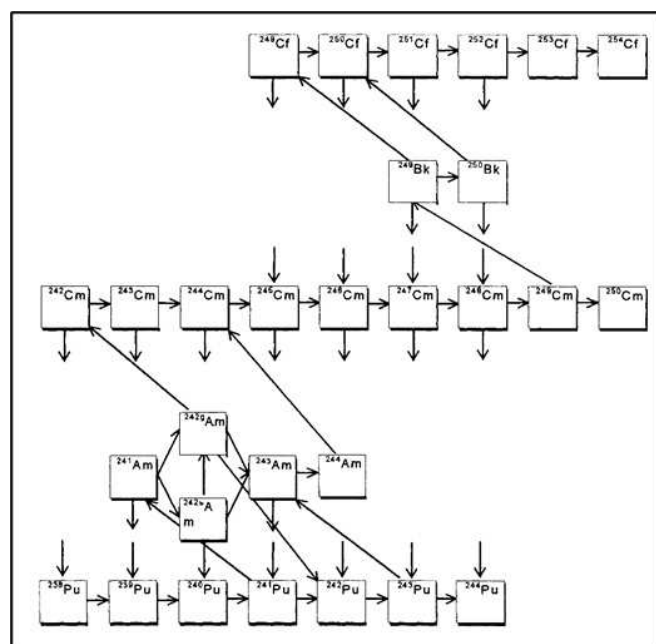


Рис. 1. Цепочки ядерных превращений

Одним из способов утилизации МА является их трансмутация — добавление в топливо реакторов. Это можно осуществить двумя подходами: гомогенно, до-

<sup>\*</sup> vsevolod.200532@gmail.com

<sup>†</sup> alievdv23@oiate.ru

бавляя определённые малые доли МА в основные топливные таблетки, или гетерогенно, изготавливая отдельные таблетки, мавэлы или ТВС. На эффективность трансмутации в большей степени влияет рабочий спектр активной зоны реактора. В основном для этих целей рассматриваются реакторы на быстрых нейтронах, но также проводятся исследования о целесообразности трансмутации в тепловом спектре [3].

Масштабная трансмутация тяжелых ядер в осколки деления в настоящее время и в ближайшие десятилетия будет возможна только в реакторах на тепловых нейтронах, поэтому имеет смысл рассмотреть и оценить возможность трансмутации и выжигания в данном спектре. На модели реактора ВВЭР-1000 было рассчитано, что выигрыш в радиоактивности кюрия наблюдается через 5-30 лет облучения, однако выигрыш в снижении радиоактивности в лучшем случае достигает 10 раз [4].

Исследования трансмутации и выжигания МА в реакторах на быстрых нейтронах являются более перспективными. Спектр нейтронов в них позволяет осуществлять преимущественно деление, а не только поглощение с последующим накоплением старших изотопов, поскольку микросечения большинства актинидов имеют пороговый характер. Для сохранения преимуществ двух подходов размещения МА по активной зоне (гомогенный и гетерогенный) и частичного решения их недостатков было исследовано выжигание МА в гетерогенной ТВС реактора БН-1200. Для исследования было проведено варьирование содержания МА в воспроизводящих твэлах от 0 до 30%. В результате, была оценена эффективность выжигания: всего за один цикл возможно сократить более 33% объема, приходящегося на МА (или около 20% от объема для всех высоко активных отходов (далее ВАО)) реактора типа ВВЭР, а в зависимости от загружаемой доли один БН-1200 с гетерогенными ТВС может обслуживать от одного до восьми блоков ВВЭР [5].

Также в быстром спектре нейтронов рассматривалось выжигание МА в реакторе БРЕСТ-1200. Особенности реактора позволяют без каких-либо трудностей трансмутировать, т.е. сжигать за счет деления  $\text{Am}$ ,  $\text{Sm}$ ,  $\text{Np}$ , наработанные тепловыми реакторами ВВЭР или РБМК. Повышая долю МА в топливе, можно увеличивать и объем трансмутации, однако при этом будут изменяться и характеристики реактора. Было исследовано, что при кампании топлива 5 эф. лет будет задействовано, в качестве 5% добавки, 126.04 кг МА от ВВЭР-1000 (130 годовых наработок), и будет трансмутировано из них 96.6 кг. Остальное количество МА будет находиться постоянно в топливе [6].

Целью настоящей работы было поставлено исследование и качественная оценка влияния гомогенного размещения кюрия в ТВС реакторов БН-600 и ВВЭР-1200 на их нейтронно-физические характеристики, а также на теплофизические параметры, что является альтернативой прямому захоронению. Исследование основано на численном моделировании нейтронно-физических

процессов в среде SERPENT и градиента температур топливных элементов в ПО ANSYS. Варьируемым параметром является концентрация оксида кюрия  $\text{SmO}_2$  в топливе. Отслеживаемые характеристики:

- коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде;
- радиальное и аксиальное распределение температур по ячейке;
- спектр нейтронов.

## 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Настоящее исследование целесообразно проводить на моделях ТВС реакторов ВВЭР-1200 (классический тип энергетического реактора в России) и БН-600, на котором ведутся испытания новейших видов топлива для инновационных реакторов. Данное решение позволило рассмотреть влияние кюрия на характеристики активной зоны в тепловом и быстром спектрах нейтронов соответственно.

### 1.1. ПК Serpent

Для оценки воздействия исследуемого элемента на нейтронно-физические характеристики (далее НФХ) реакторов были разработаны упрощенные расчётные модели ячейки и ТВС ВВЭР-1200 и БН-600 в ПК Serpent. Как видно из рисунков типовым для российских реакторов является формат размещения твэлов в ТВС, при этом для тепловых реакторов характерно размещение компенсирующих избыточную реактивность поглотителей (пэлов) внутри ТВС, в то время как поглотители в быстрых реакторах размещаются в виде отдельных кассет. Кроме того, в последних версиях ВВЭР отсутствует чехол [7], в то время как и для БН-800, и для БН-600 наличия чехла характерно [8].

#### 1.1.1 ВВЭР-1200

Геометрические размеры модели: внешний диаметр твэла 9.1 мм, внешний/внутренний диаметр направляющих каналов 12,9/11 мм, размер ТВС «под ключ» 235.1 мм, высота топливного столба — 3730 мм. Расчётная модель (рис. 2) набрана из ячеек, имитирующих тепловыделяющие элементы (312 шт.), направляющих каналов (19 шт.).

Материал топлива — диоксид урана  $\text{UO}_2$  с обогащением 4.95%, материал оболочек твэлов и направляющих каналов — циркониевый сплав Э110 ( $\text{Zr} + 1\% \text{Nb}$ ), материал теплоносителя — лёгкая вода.

Для имитации бесконечной решетки активной зоны на границе гексагональной области теплоносителя было задано условие полного отражения нейтронов.

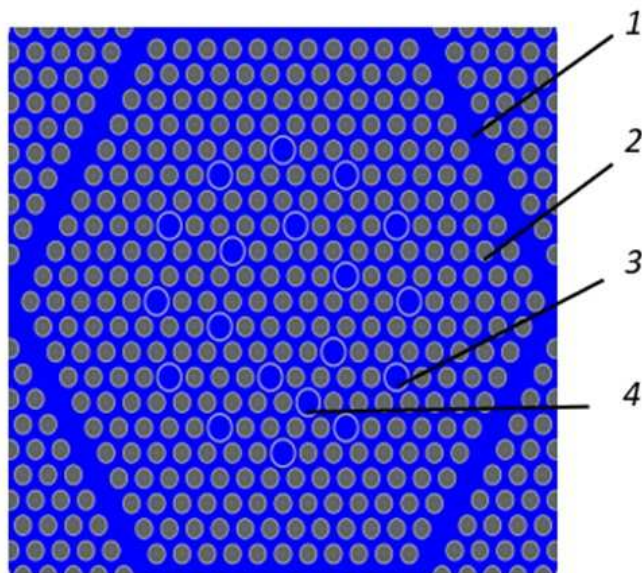


Рис. 2. Расчетная модель ВВЭР-1200. 1 — замедлитель/теплоноситель; 2 — ТВЭЛы (312 шт.); 3 — направляющие каналы (18 шт.); 4 — инструментальный канал

### 1.1.2 БН-600

Геометрические размеры модели: внешний диаметр твэла 6.8 мм, размер чехловой трубы «под ключ» 96 мм, толщина чехла 2 мм, высота топливного столба 738.1 мм, высота столбов зон воспроизводства 373.95 мм. Расчетная модель (рис. 3) набрана из ячеек, имитирующих тепловыделяющие элементы (127 шт.).

Материал топлива — диоксид урана  $UO_2$  с обогащением 17%, материал оболочек твэлов и чехла — сплав ЧС68, материал теплоносителя — натрий.

Для имитации бесконечной решетки активной зоны на границе гексагональной области теплоносителя было так же задано условие полного отражения нейтронов.

## 1.2. ПК Ansys

Для анализа влияния на теплофизические характеристики топливных элементов реакторов ВВЭР-1200 и БН-600 было получено численное решение уравнения теплопроводности реализовано в Ansys Fluid Flow CFX — инструменте вычислительной гидродинамики (CFD), который позволяет создавать области твердого тела и жидкости, для которых решаются уравнения переноса тепла [10]. Разработаны модели тепловыделяющей сборки (ТВС). Моделирование выполнено с учетом вышеупомянутых параметров ТВЭЛов и каналов, включая геометрию, состав материалов и условия энерговыделения.

19 тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) в модели выбрано исходя из принципа симметрии и миними-

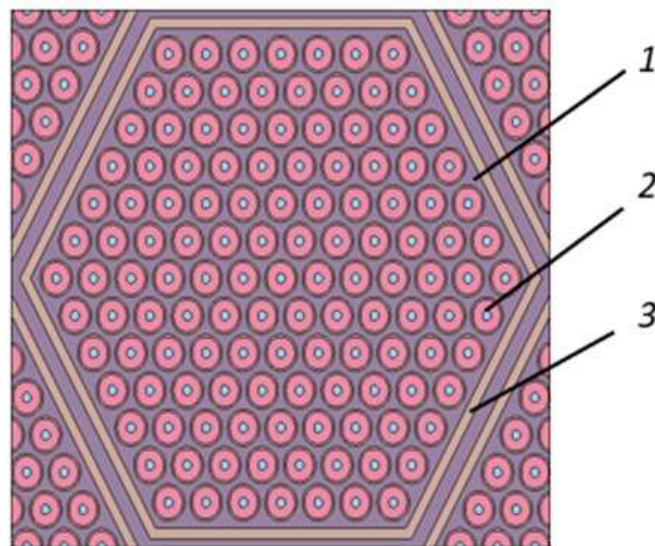


Рис. 3. Расчетная модель БН-600  
1 — теплоноситель; 2 — ТВЭЛы (127 шт.); 3 — чехловая труба

зации вычислительных затрат при сохранении точности результатов. В гексагональной структуре ТВС центральный ТВЭЛ окружен 18 элементами, что формирует характерный кластер, достаточный для корректного моделирования радиального распределения нейтронного потока и температурных полей. Такая конфигурация обеспечивает адекватный учет эффектов взаимовлияния ТВЭЛов без избыточной детализации, критичной для ресурсоемких расчетов.

### 1.2.1. ВВЭР-1200

Геометрические параметры модели аналогичны вышеуказанным для Serpent. Расчетная модель (рис. 4) набрана из ячеек, имитирующих тепловыделяющие элементы (19 шт.). Материал топлива — диоксид урана  $UO_2$ , материал оболочек твэлов и направляющих каналов — циркониевый сплав Э110 материал теплоносителя — лёгкая вода.

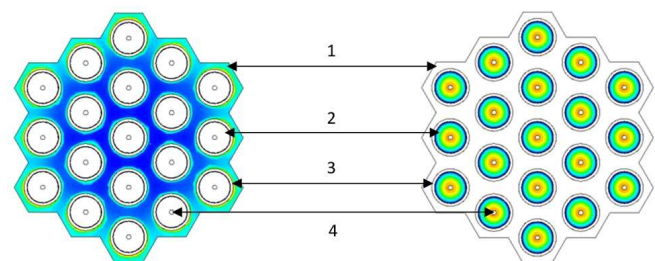


Рис. 4. Расчётная модель ВВЭР-1200: 1 — замедлитель/теплоноситель; 2 — ТВЭЛ (19 шт.); 3 — оболочка твэлов (19 шт.); 4 — гелиевый зазор(19шт)



### 1.2.2. БН-600

Геометрические параметры модели аналогичны вышеуказанным для Serpent.

Расчетная модель (рис. 5) набрана из ячеек, имитирующих тепловыделяющие элементы (19 шт.). Материал топлива — диоксид урана  $UO_2$ , материал оболочек твэлов и направляющих каналов — сплав ЧС68, материал теплоносителя — натрий.

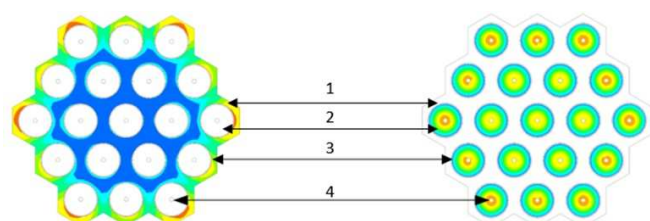


Рис. 5. Расчетная модель БН -600: 1 — теплоноситель; 2 — ТВЭЛ (19 шт.); 3 — оболочка твэлов (19 шт.); 4 — гелиевый зазор(19шт)

### 1.3. Условия расчёта

В целях исследования кюри добавлялся в модели гомогенно, в качестве примеси  $SmO_2$  к основному топливу. Доля данного соединения в ТВС БН-600 была варьирована от 1 до 20%, однако в модели ВВЭР-1200 использованы концентрации от 0.1%, что более актуально для теплового спектра. В расчётах было допущено, что плотность топливной таблетки не изменялась при добавлении кюри. Изотопный состав  $SmO_2$  ( $^{242}Sm$  — 0.02%,  $^{243}Sm$  — 1.65%,  $^{244}Sm$  - 98.33%) выбран в соответствии с составом ОЯТ ВВЭР-1000 после 5-летней выдержки [3].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальное исследование двух реакторных систем ВВЭР-1200 и БН-600 направлено на анализ ключевых параметров, определяющих их эффективность и безопасность. Особое внимание уделено коэффициенту размножения нейтронов  $K_{беск}$ , градиенту температур и энергетическому спектру нейтронов, так как эти показатели критически влияют на устойчивость цепной реакции, тепловое распределение и оптимизацию топливного цикла. Полученные данные, представленные в виде графиков и таблиц, включают:

- зависимость  $K_{беск}$  от процентного содержания кюри, отражающую возможность работы реактора при запуске и во время эксплуатации;
- пространственное распределение температуры, выявляющее зоны риска термических напряжений;

- спектральные характеристики нейтронного потока, определяющие эффективность деления ядер.

### 2.1. ВВЭР-1200

Из графической зависимости (рис. 6) видно, что коэффициент размножения нейтронов значительно уменьшается с увеличением доли  $SmO_2$  в топливе (при 20% концентрации кюри  $K_{беск}$  падает на 0.05). В результате сильного снижения  $K_{беск}$  запуск реактора становится проблематичнее, следовательно целесообразно не превышать долю добавляемого кюри в 1% для теплового реактора.

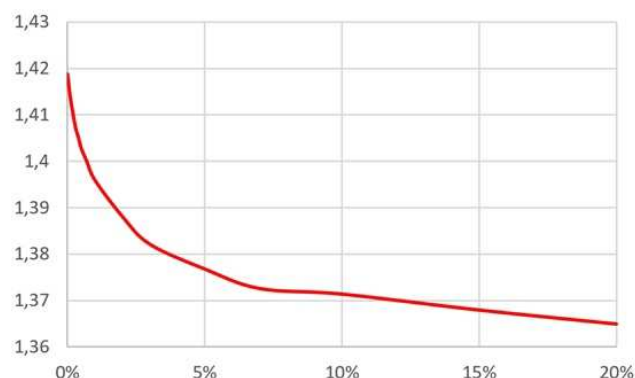


Рис. 6. Зависимость  $K_{эф}$  на начало кампании ВВЭР-1200 от процентного содержания кюри

### 2.2. БН-600

Зависимость теплофизических характеристик от доли добавленного кюри представлена в табл. 1.

Таблица 1. Теплофизические характеристики

| Доля $Sm$ , % | Температура теплоносителя на выходе, К | Макс. температура в центре ТВЭЛа, Т |
|---------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
| 0             | 608                                    | 1600                                |
| 0.1           | 600                                    | 1518                                |
| 0.5           | 595                                    | 1310                                |
| 1             | 591                                    | 1288                                |
| 2             | 587                                    | 1259                                |
| 5             | 580                                    | 1211                                |
| 10            | 576                                    | 1169                                |
| 15            | 572                                    | 1139                                |
| 20            | 569                                    | 1096                                |

При добавлении кюри температура ячейки модели не превышала максимально допустимой

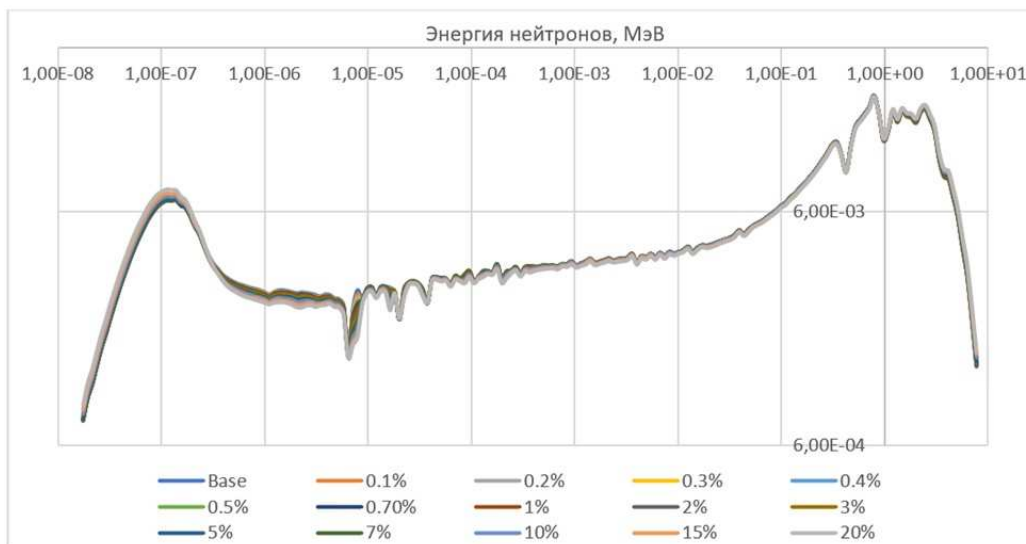


Рис. 7. Энергетическое распределение нейтронов

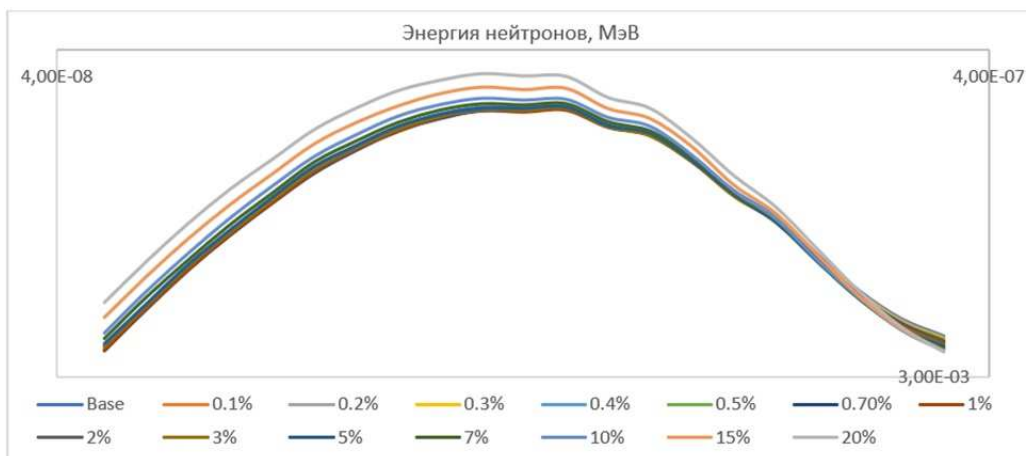
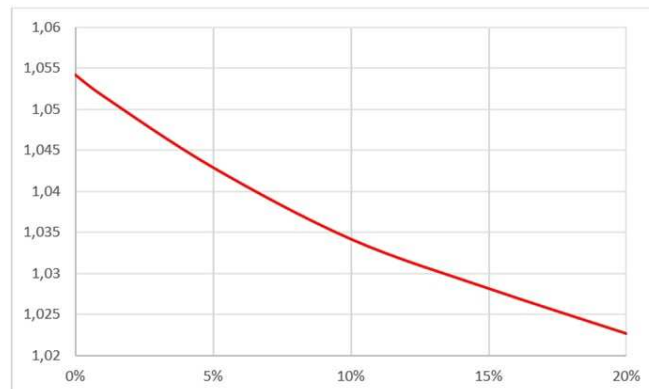


Рис. 8. Приближенная тепловая часть спектра

$T_{\max} = 1873.15\text{K}$  [9]. Из-за уменьшения энерговыделения и теплопроводности при добавлении данного элемента температура ТВЭЛа значительно падает, с такими значениями реактор не выйдет на стандартную мощность.

Из графического представления спектральных характеристик нейтронного потока (рис. 7) видно, что кюриум в большей степени влияет на долю тепловых нейтронов. При рассмотрении рабочей области реактора (рис. 8), было выявлено, что при малых долях кюриума (до 1%), количество тепловых нейтронов уменьшается в среднем на 1%, однако при дальнейшем добавлении  $\text{StO}_2$  (вплоть до 20%) повышается, достигая увеличения на 11.43%.

По сравнению с ВВЭР-1200,  $K_{\text{беск}}$  на начало кампании БН-600 при добавлении кюриума снижается менее активно (при 20% доли  $\text{StO}_2$  падение  $K_{\text{беск}}$  составляет всего 0.03). Графическая зависимость представлена

Рис. 9. Зависимость  $K_{\text{беск}}$  на начало кампании БН-600 от процентного содержания кюриума

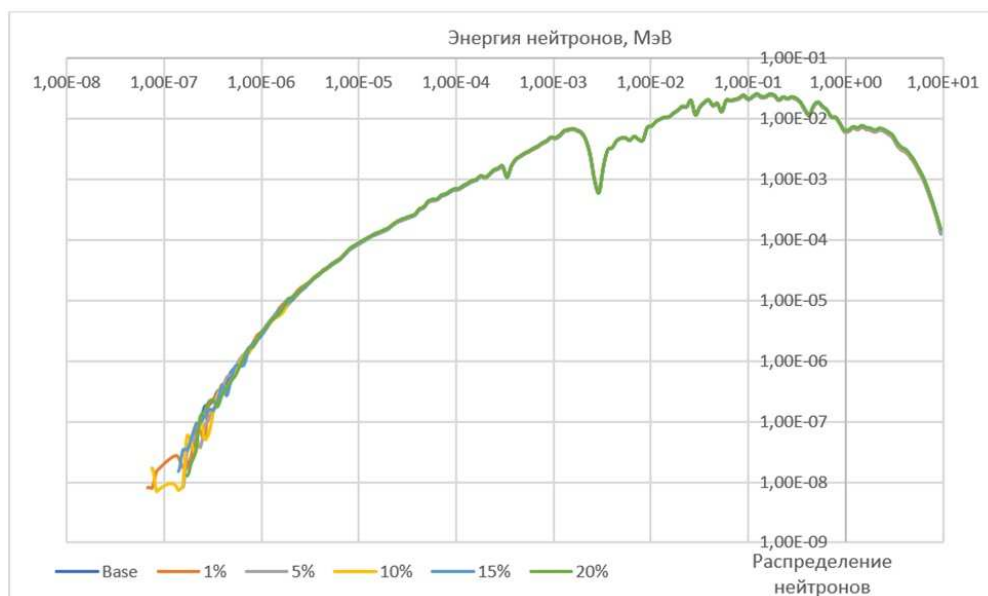


Рис. 10. Энергетическое распределение нейтронов

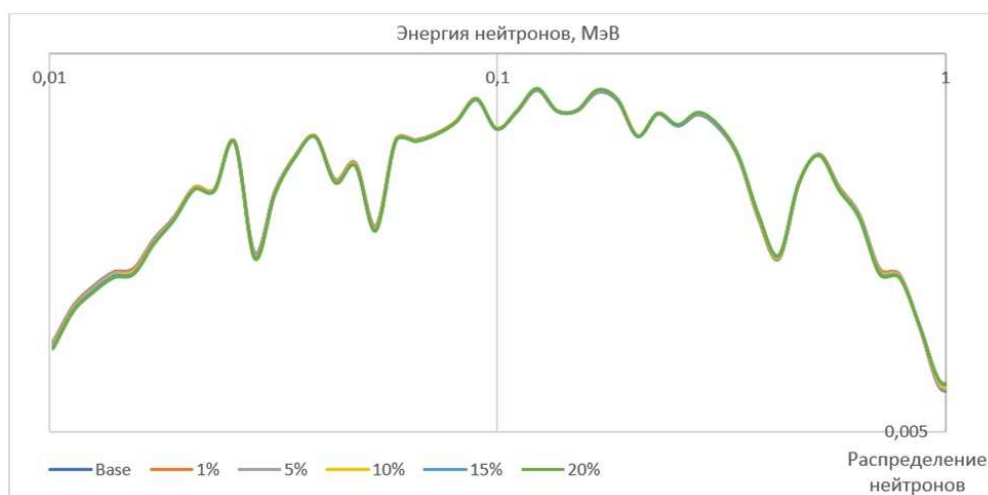


Рис. 11. Рабочая область спектра БН-600

на рис. 9. Незначительное уменьшение коэффициента размножения позволяет добавить в топливо более 1% кюрия, теряя в значении  $K_{\text{беск}}$  от 0.01 до 0.03.

Экспериментальное исследование теплофизических свойств представлена в табл. 2. Аналогично реактору ВВЭР-1200 уменьшения энерговыделения и теплопроводности приводит к значительному уменьшению температур ТВЭЛа.

Расчеты показали, что влияние кюрия на энергетическое распределение нейтронов в БН-600 незначительно: флуктуации появляются только тепловой части спектра (рис. 10). Из графика рабочей области реактора (рис. 11) видно, что добавление  $\text{CmO}_2$  не изменяет долю быстрых нейтронов.

Таблица 2. Теплофизические характеристики

| Доля<br>$\text{Cm}$ , % | Температура теплоносителя<br>на выходе, К | Макс. температура<br>в центре ТВЭЛа, Т |
|-------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| 0                       | 900                                       | 2380                                   |
| 1                       | 894                                       | 2258                                   |
| 5                       | 850                                       | 2018                                   |
| 10                      | 803                                       | 1900                                   |
| 15                      | 786                                       | 1848                                   |
| 20                      | 757                                       | 1816                                   |

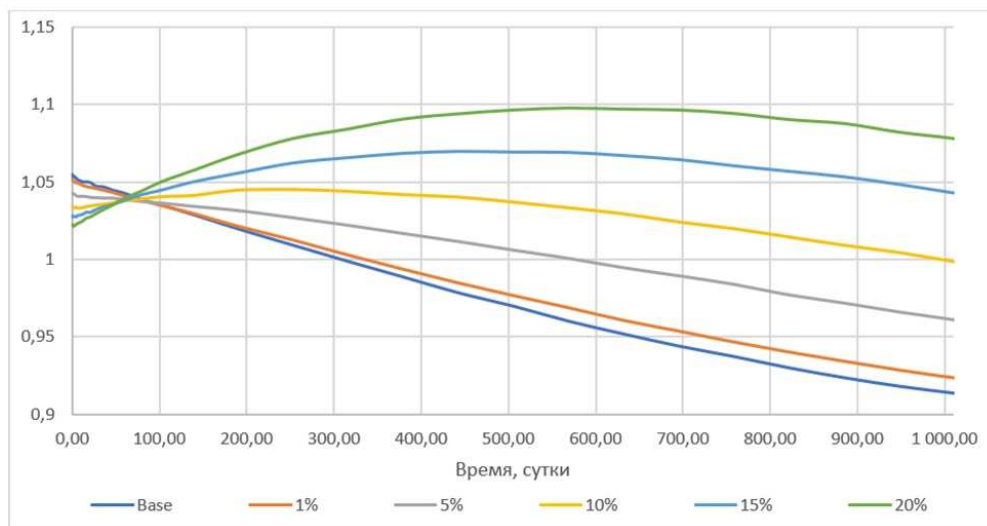


Рис. 12. Топливные кампании БН-600

Так как у БН-600 более перспективные показатели, была рассмотрена возможность продления его кампании с помощью добавления юрия. Расчеты изменения  $K_{\text{беск}}$  по суткам в процессе эксплуатации представлены на рис. 12.

Из графика видно, что добавление юрия положительно сказывается на коэффициенте размножения. В процессе эксплуатации запас реактивности увеличивается, а в конце топливной кампании больше относительно стандартной модели, вплоть до 17,3%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов расчетного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Добавление юрия уменьшает коэффициент размножения нейтронов на начало кампании, что может значительно усложнить пуск реактора. Более сильное воздействие наблюдается на модели ВВЭР-1200, где минимальное значение  $K_{\text{беск}}$  меньше стандартного на 3,85%. В случае с БН-600 максимальное падение составило 3%.
2. Доля  $\text{CmO}_2$  в топливе положительно сказывается на рабочем спектре ВВЭР-1200: пик увеличения плотности потока тепловых нейтронов составил 11,43%. На модели БН-600 воздействие юрия на энергетическое распределение нейтронов ми-

нимально и практически совпадает со стандартными значениями.

3. Добавление юрия в топливо БН-600 позволяет продлить его топливную кампанию. Несмотря на падение  $K_{\text{эф}}$  на старте, уже через 60–70 дней коэффициент достигает более высоких значений, по сравнению со стандартным. В результате максимальная разница  $K_{\text{беск}}$  на конец кампании составила 17,3%. Данная тенденция также наблюдается в других исследовательских работах, что подтверждает перспективность добавления юрия к топливу быстрого реактора [11].
4. Гомогенное добавление элемента значительно снизило энерговыделение и вследствие понизило максимальную температуру ТВЭЛов. Теплофизический расчет показал уменьшение  $\Delta T_{\text{max}} = 564\text{K}$  для модели реактора БН-600 и  $\Delta T_{\text{max}} = 504\text{K}$  для модели реактора ВВЭР-1200.
5. Изменение температуры и теплопроводности ТВЭЛов оказало влияние на температуру теплоносителя: значительно для модели БН-600 ( $-\Delta T = 143\text{K}$ ) и менее значимо для модели реактора ВВЭР-1200 ( $-\Delta T = 39\text{K}$ ). Из этого и значительного уменьшения  $\Delta T_{\text{max}}$  следует недопустимость использования сборок с содержанием юрия.

[1] Терехова А.М., Хорасанов Г.Л. Оценка количеств изотопов юрия и америция в ОЯТ реактора БН-600 // Будущее атомной энергетики. Atom Future 2017. 2018. С. 56–57.

[2] Изотопы: свойства, получение, применение. / Б.М. Андреев, Д.Г. Арефьев, В.Ю. и др.. Том 2. Moscow, 2005. 728 с.

- [3] Зимин В.А., Столотнюк Я.Д., Семишин В.В. Исследование выгорания минорных актинидов в активной зоне быстрого реактора.
- [4] Казанский Ю.А., Романов М.И. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. № 2. 140 (2014)
- [5] Котов Я.А., Невиница В.А., Фомиченко П.А. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. № 2. 102 (2023).
- [6] Ганев И.Х., Лопаткин А.В., Орлов В.В. // Атомная энергия. **89**, № 5. 355 (2000).
- [7] Лазарева И.А., Парамонова И.Л. // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». **15**, № 5/6. 15 (2022). doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-5/6-15-21.
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, BN-600 Hybrid Core Benchmark Analyses, IAEA-TECDOC-1623, IAEA, Vienna (2010).
- [9] Сиро Р.Ф., Зевякин А.С. // Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. № 4. 2440303 (2024).
- [10] Bergman Theodore L. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Corp., 2011.
- [11] Ширкова Д.Е., Дикова Т.С. // Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. № 4. (2023).

## Estimation of Curium effect on neutron-physical characteristics of BN and VVER reactors under the homogeneous distribution

V.V. Khramkov<sup>a</sup>, D.R. Aliev<sup>b</sup>, A.A. Vorontsova, E.A. Gerdt, M.A. Popov, V.O. Skulkin

IATE NRNU MEPhI, Obninsk, 249039, Russia

E-mail: <sup>a</sup>vsevolod.200532@gmail.com, <sup>b</sup>alievdv23@oiate.ru

The research aim is investigation of the curium affection on neutron-physical and thermophysical characteristics of VVER-1200 and BN-600. The fuel assemblies neutron-physical and thermophysical models have been created for the calculations to be made. Curium was added to the common fuel homogeneously in the proportions from 0,1 to 20% as CmO<sub>2</sub> oxide. Characteristics considered are: neutron multiplication factor, neutron spectrum, temperature distribution. A stronger effect on the reactivity is observed of the VVER-1200 model –  $K_{eff}$  decreases by 3.85%. The maximum decrease of BN-600 neutron multiplication factor is 3%. Adding curium increases the neutron flux density of VVER-1200. Also curium does a considerable positive effect on the fast reactor's reactivity, that creates a possibility of using Cm as a fuel. The maximum fuel temperature decreases by 500°, when curium is added.

PACS: 89.30.Gg.

**Keywords:** curium, minor actinides, spent nuclear fuel, fast reactors, thermal reactors, neutron multiplication factor, temperature gradient, neutron specter, reactor campaign.

Received 03 June 2025.

### Сведения об авторах

1. Храмков Всеволод Владимирович — студент ИАТЭ НИЯУ МИФИ; e-mail: vsevolod.200532@gmail.com.
2. Алиев Давид Русланович — студент ИАТЭ НИЯУ МИФИ; e-mail: alievdv23@oiate.ru.
3. Воронцова Александра Александровна — студент ИАТЭ НИЯУ МИФИ; e-mail: paradisecitymake@gmail.com.
4. Гердт Эдуард Аликович — студент ИАТЭ НИЯУ МИФИ; e-mail: gerdtea@mail.ru.
5. Попов Максим Александрович — студент ИАТЭ НИЯУ МИФИ; e-mail: maksim.popovf@yandex.ru.
6. Вячеслав Скулкин Олегович — сотрудник ИАТЭ НИЯУ МИФИ; e-mail: slava\_skulkin@mail.ru.