

На правах рукописи

Дробышев Юрий Юрьевич

**ГИБРИДНАЯ ТОПЛИВНАЯ ЗАГРУЗКА РЕАКТОРА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ НА
БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТОПЛИВОМ**

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Автор:



Москва – 2021

Работа выполнена во Всероссийском научно-исследовательском институте по эксплуатации атомных электростанций АО «ВНИИАЭС».

Научный руководитель: д.т.н., главный эксперт, старший научный сотрудник
АО ВНИИАЭС, Селезнёв Евгений Фёдорович

Официальные
оппоненты: Кирилл Фёдорович Раскач, д.ф.-м.н., зам.
руководителя комплекса НИЦ "Курчатовский
институт"

Коробейников Валерий Васильевич, д.ф.-м.н.,
профессор, главный научный сотрудник
Акционерное общество «Государственный научный
центр Российской Федерации Физико-
энергетический институт имени А.И. Лейпунского»
(АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)

Шевченко Сергей Александрович, к.ф.-м.н.,
начальник отдела Научно-технический центр по
ядерной и радиационной безопасности («НТЦ ЯРБ»)

Защита состоится __22__ декабря__ 2021 г. в _15:00_ на заседании диссертационного
совета МИФИ.01.03. федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ» (115409, г.Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://ds.mephi.ru/>
федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Отзывы и замечания по автореферату в одном экземпляре, заверенные печатью,
просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.

Куликов Е.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Для повышения конкурентоспособности быстрых реакторов, способных производить два товарных продукта – электроэнергию и избыточное ядерное топливо, рассматривают множество представленных в литературе решений. Вопрос о необходимости замыкания топливного цикла переходит в практическую плоскость. Основой для современных установок служит хорошо изученное за годы освоения ядерной энергии оксидное урановое топливо, использующееся как в тепловых, так и в быстрых реакторах. При этом у данного типа топлива имеется ряд недостатков, как с точки зрения эксплуатации его в активной зоне установки, так и с точки зрения замыкания топливного цикла.

Для увеличения производства избыточного ядерного топлива рассматривают переход на всё более плотное топливо: с наиболее освоенного оксидного на карбидное, нитридное и наиболее плотное – металлическое. Из всех видов топлива, многократно рассмотренных в мировой практике развития быстрых реакторов, металлическое топливо обеспечивает достижение самых высоких значений наработки в реакторе избыточного ядерного топлива, т.е. получение высокого коэффициента воспроизводства (КВ), и самой низкой стоимости переработки отработавшего топлива благодаря использованию технологий пирометаллургии. Однако, у проектов быстрого реактора с металлическим топливом большой мощности существуют и проблемы низких значений обратных связей по температуре топлива, следствием которых является отсутствие на сегодня таких завершённых проектов. Настоящая работа ставит перед собой задачи предложить решения для ряда этих проблем.

Цель работы

Целью работы является поиск таких решений для топливной загрузки реактора на быстрых нейтронах с металлическим топливом, которые удовлетворяли бы современным критериям, предъявляемым для проектируемых ядерных энергетических установок (ЯЭУ), которые можно разделить на две определяющие группы:

- критерии с точки зрения ядерной безопасности ЯЭУ;
- критерии с точки зрения эффективности ЯЭУ.

Основная задача работы заключается в разработке проекта реактора большой мощности со следующими параметрами безопасности:

- значение пустотного эффекта должно быть в приемлемом сценарии меньше по абсолютному значению, чем для референтного проекта реактора;
- значение обратной связи по температуре топлива по знаку должно совпадать с референтными и быть одного порядка с ним, в наиболее благоприятном варианте расхождения не более чем в 2 – 3 раза.

Между тем, стоит отметить, что в активных зонах быстрых реакторах достаточно затруднены какие-либо измерения, количество данных для все тех же коэффициентов и эффектов реактивности ограничено. Поэтому вспомогательная задача заключается в разработке и применении методики для повышения расчетной точности значений параметров обратной связи для загрузки с металлическим топливом.

Научная новизна

1. Впервые представлен проект тепловыделяющего элемента для быстрого реактора большой мощности с металлическим топливом с гетерогенным размещением по высоте обогащенного металлического топлива в нижней половине активной зоны, оксидного обогащенного топлива в верхней половине активной зоны и прослойкой из обедненного урана в центральной части этого твэла, а также тепловыделяющей сборки реактора на быстрых нейтронах большой мощности и замедлителем в виде соединений бериллия и магния, размещенных гетерогенно в плане и по высоте ее топливной части.
2. Впервые разработана методика повышенной точности при определении обратных связей реактивности установки по температурным параметрам активной зоны. Алгоритм учета влияния аксиальных расширений топлива на нейтронно-физические характеристики загрузки позволил повысить точность определения температурного и мощностного коэффициентов реактивности, как для реакторных установок с оксидным топливом, так и для исследовательских установок с металлическим топливом, что подтверждено верификацией алгоритма на экспериментах действующих РУ БН-600 и БН-800.

Достоверность

Достоверность результатов выполненных исследований подтверждается:

- использованием общепринятых методов и программных средств для вычислений характеристик активной зоны;
- верификацией расчетных результатов на тестовых объектах;
- апробацией новых методик на основании имеющихся данных по действующим реакторным установкам (РУ) на натриевом теплоносителе с быстрым спектром нейтронов БН-600 и БН-800 и экспериментальной установки с металлическим топливом EBR-II.

Апробация работы

Результаты работы представлялись на российских и международных семинарах и конференциях. В том числе на школе молодых ученых ИБРАЭ РАН «Безопасность и риски в атомной энергетике» (2015-2018 гг.); Всероссийской отраслевой научно-технической конференции под эгидой «Росатом» «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетике» (2016-2019 гг.); международной конференции по технологиям быстрых реакторов и замкнутым топливным циклам под эгидой МАГАТЭ FR-17 (2017 г.), на международной научно-технической конференции под эгидой «Концерн Росэнергоатом» «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетике» (2016, 2018 гг.).

Личный вклад автора

Автор непосредственно участвовал как в разработке методик и программных средств для повышения точности определения нейтронно-физических характеристик быстрого реактора, так и прорабатывал возможные варианты загрузок реактора с металлическим топливом. Весь процесс проектирования, начиная с изучения характеристик и видов топлива и конструкционных материалов, заканчивая выбором состава, размеров и геометрии расположения, составляющих загрузки и проведением расчетов для объекта, был выполнен автором в полном объеме. Разработаны модели гибридной сборки с металлическим и МОХ топливом и проведен полный комплекс реакторных расчетов, необходимых для подтверждения ее ядерной безопасности. Для поиска оптимального варианта топливной загрузки автор лично предложил и реализовал схему трехстадийных вариантных расчетов.

Практическая значимость

В результате работ по определению состава, размера и компоновки ядерного реактора большой мощности с металлическим топливом был получен патент на изобретение №2680252

«Тепловыделяющий элемент ядерного энергетического реактора на быстрых нейтронах» и зарегистрирован в Государственном реестре изобретений 19 февраля 2019 года.

Также разработанные в ходе работы методики и алгоритмы по повышению точности определения коэффициентов и эффектов реактивности для реакторных установок были успешно верифицированы и включены в комплекс «ГЕФЕСТ» сопровождения эксплуатации действующих реакторов на быстрых нейтронах БН-600 и БН-800 на площадке Белоярской АЭС.

Положения, выносимые на защиту

1. Оценка топливной загрузки быстрого реактора с натриевым теплоносителем, с металлическим и оксидным топливом, гетерогенно расположенным по высоте.
2. Методика повышенной точности при определении обратных связей реактивности установки по температурным параметрам активной зоны.
3. Оценка топливных загрузок быстрого реактора с натриевым теплоносителем и металлическим топливом и замедлителем, размещенным по высоте и в плане топливной сборки. Со значением интегрального натриевого пустотного эффекта реактивности меньше доли запаздывающих нейтронов, с величиной обратных связей, выраженной в значении мощностного коэффициента реактивности, одного порядка с действующими реакторными установками при снижении коэффициента воспроизводства активной зоны до значений не меньше, чем для смешанного уран-плутониевого оксидного.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 101 библиографической ссылки. Общий объём работы составляет 200 страниц основного текста, включая 39 таблиц, 59 рисунков и 2 Приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, достоверность результатов, личный вклад автора, апробация и публикации по теме исследования.

В первой главе проведен ретроспективный анализ основных проектных решений при освоении технологий быстрого реактора. Так, исходя из целей настоящей работы, для рассмотрения

была определена интегральная компоновка реактора с принудительным натриевым охлаждением и наиболее изученными видами топлива металлическим и оксидным с конструкционными материалами сталей аустенитного и ферритно-мартенситного классов.

Во второй главе дается описание существующих проектов быстрых реакторов большой мощности. В частности, референтный проект реактора на быстрых нейтронах БН-1200 и многоцелевая с точки зрения замыкания топливного цикла разработка GE-Hitachi PRISM мощностью 840 МВт(эл.). Проведено исследование по видам металлического топлива и материала стали топливной оболочки, имеющих опыт эксплуатации в реакторных установках. В качестве базового варианта был выбран следующий состав: U-xPu-0,1Zr (x–доля плутония произвольна). Для него также были определены основные теплофизические и термомеханические характеристики, важные с точки зрения эксплуатации (см. таблица 1).

Таблица 1 – Предельные величины при эксплуатации металлического топлива в быстром реакторе (за основу взято U-20Pu-10Zr металлическое топливо).

Наименование	Предельное значение
Максимальная температура топлива, °С	1132
Максимальная температура внутренней поверхности оболочки, °С	662
Максимальная линейная тепловая нагрузка на ТВЭЛ, кВт/м	50,0
Выгорание, % т.а.	20,0
Максимальный флюенс на оболочку ТВЭЛ, н/см ² (состав ферритно-мартенситная сталь)	2,8*10 ²³

Определено пространство нейтронно-физических характеристик, обуславливающих нормальную эксплуатацию реакторной установки, в соответствии с которыми будет проводиться анализ ее расчетных показателей (см. таблица 2).

Таблица 2– Критерии оценки загрузки быстрого реактора

Критерии безопасности		Критерии эффективности	
Обозначение	Ед. измерения	Обозначение	Ед. измерения
Доля запаздывающих нейтронов		Эффект потери реактивности за кампанию/темп потери реактивности за кампанию	$\% \Delta k/k$ $\% \Delta k/k/\text{эфф.с}$ утки
Время жизни мгновенных нейтронов	с^{-1}	Коэффициент воспроизводства (КВ)	
Эффективность органов регулирования	$\% \Delta k/k$	Коэффициент воспроизводства (КВ) по области реактора	
Коэффициент реактивности по мощности/температуре на входе т/н	$\% \Delta k/k/\% \text{мощности}$ $\% \Delta k/k^{\circ}\text{C}$	Масса топлива в загрузке	т
Пустотный эффект реактивности	$\% \Delta k/k$ или \$		
Температурный коэффициент реактивности	$\% \Delta k/k^{\circ}\text{C}$		
Максимальное выгорание	% т.а.		
Максимальная линейная нагрузка	кВт/м		
Флюенс/быстрый флюенс	н/см ²		
Дозовая нагрузка на конструкционный материал оболочки твэл	с.н.а		
Максимальная температура внутренней поверхности оболочки, топлива	$^{\circ}\text{C}$		

В третьей главе приводятся основные расчетные инструменты и методики, использованные в данном проекте. Для возможности проведения большого количества вариантных расчетов для проектируемой загрузки была реализована программа «Конструктор нейтронно-физических моделей активной зоны».

Программа DOLCE VITA предназначена для моделирования переноса нейтронов в стационарных состояниях РУ БР в трехмерной гексагональной геометрии с использованием как гомогенного, так и гетерогенного представления ТВС. Энергетическая зависимость представлена многогрупповым приближением. Программа позволяет решать стационарные задачи.

Перенос нейтронов описывается линеаризованным уравнением Больцмана относительно плотности потока и соответствующими граничными условиями. В многогрупповом приближении ($g = 1, \dots, G$) постановка задачи имеет вид:

$$-D^g \Delta \varphi^g(r) + \Sigma_a^g \varphi^g(r) - \sum_{l=1}^{g-1} \Sigma_s^{l \rightarrow g} \varphi^l(r) = 1/k_{ef} \chi^g \sum_{l=1}^G \nu \Sigma_f^l \varphi^l(r) \quad (1)$$

где $\varphi^g(r)$ – плотность потока нейтронов в точке r ; D^g - коэффициент диффузии; Σ_a - сечение увода нейтронов; $\Sigma_s^{l \rightarrow g}$ - сечение перевода нейтронов из группы l в группу g ; χ - спектр нейтронов деления; G - число групп нейтронов в энергетическом разбиении; ν – число рождаемых при делении нейтронов; Σ_f – сечение деления.

Уравнение (1) дополняется граничными условиями третьего рода:

$$\left. \frac{\partial \varphi(r,t)}{\partial r} \right|_{r_g} = - \frac{\gamma \varphi(r,t)}{D^g(r,t)} \Big|_{r_g} \quad (2)$$

где γ – граничное условие (при $\gamma=0$ имеем на границе «зануление» токов, а при $\gamma \rightarrow 1$ имеем на границе «обнуление» плотности потока нейтронов).

Пространственная расчетная сетка состоит из прямых призм с гексагональным основанием, каждая из которых моделирует высотную часть ТВС, твэла или пэла, в совокупности описывая всю активную зону.

Для определения распределенных по объему топливной загрузки значений физических функционалов (поля энерговыделения, флюенса, температур), использовались модули программно-технического комплекса (ПТК) ГЕФЕСТ, предназначенные для проведения эксплуатационных расчетов нейтронно-физических характеристик быстрого реактора с натриевым теплоносителем.

Программное средство стохастического метода решения уравнения переноса (Монте-Карло метод) OpenMC выбрана для получения наиболее точных оценок интегральных эффектов в особенности натриевого пустотного эффекта. Код предоставляет следующие возможности пользователю:

- работа с ядерными данными и библиотеками формата ENDFB, ACE для ФОЯД РОСФОНД, JEFF, ENDFB и т.д.
- моделирование 2-мерных и 3-мерных объектов и задач;
- решения связанных задач переноса нейтронов и фотонов в среде;
- возможность использовать как непрерывную, так и многогрупповую зависимость сечений ядерных реакций от энергий;
- расчет характеристик запаздывающих нейтронов;
- решение связанной задачи уравнения переноса и нуклидной кинетики.

Для учета обратных связей в нейтронно-физическом расчете была модифицирована программа, решающая условно-критическую задачу в диффузионном приближении на трехмерной гексагональной сетке. В нее добавлена возможность вызова алгоритма расчета с учетом аксиального перемещения топливных слоев друг относительно друга. Высотные размеры топливных ячеек в случае свободного расширения изменяются в зависимости от температуры топлива:

$$z = z_0 [1 + \alpha_T(T_t, w_{Pu})(T_t^i - T_{t0}^i)] \quad (3)$$

где z_0 , z – исходный (базовый) высотный размер топливной ячейки и приведенный к температуре; T_t^i – температура топлива в расчетной ячейке; $\alpha_T(T_t, w_{Pu})$ – коэффициент линейного расширения топлива $1/^\circ\text{C}$, зависящий от температуры и содержания плутония w_{Pu}

Определение сечений в ячейках математической модели при решении задачи переноса производится с весом объема мелких слоев, на которые дополнительно разбивается модель, и полей нейтронов в них для каждой группы нейтронов:

$$\Sigma_{ij}^g = \frac{\sum_{m=1}^n \Sigma_m^g V_m}{\sum_{m=1}^n V_m}, \quad (4)$$

где Σ_m^g – значение сечения группы g в ячейке m топливной сборки; V_m – объем ячейки m топливной сборки; Σ_{ij}^g – итоговое сечение группы g ячейки j в топливной сборке i ; ϕ_m^g – значение потока нейтронов в ячейке m топливной сборки.

После внесения правок в нейтронные сечения производится трехмерный диффузионный расчет.

Проектирование загрузки представляет собой итерационный процесс поиска наиболее оптимальной конфигурации с точки зрения выбранных критериев. В процессе поиска наилучшего варианта нуклидного состава и взаиморасположения элементов исследуемой топливной загрузки мы получим набор интересующих нас функционалов для уровней моделирования:

- гомогенный топливный сосав бесконечной размножающей среды;
- топливная сборка с граничными условиями полного отражения;
- полноценная топливная загрузка реактора на быстрых нейтронах.

Как определить из всего множества параметров-характеристик одно или несколько решений, наиболее подходящее под установленные критерии? Для систематизации и автоматизации поиска воспользуемся инструментами многокритериальной оптимизации, позволяющими находить такие решения.

Постановка задачи:

На множестве исходных по отношению к задаче параметров $X \subset R_+$ имеется набор функций $F_j: X \rightarrow R_+$, где $j = 1..N$, а N – общее число функций, значения которых необходимо минимизировать при условии, что на этом же множестве заданы ограничения в виде функций $f_i: X \rightarrow R_+$, где $j = 1..M$, а M – общее число ограниченных критериев.

Пусть множество решений данной задачи $\tilde{X} \subset X$. Нас интересует лишь часть решений данной задачи, называемая термином множества решений эффективных по Парето или Парето-фронт. Которое определяется следующим образом: подмножество решений $\tilde{X}^p \subset \tilde{X}$ эффективно по Парето, если не существует другого решения $x' \in \tilde{X}$ для любого $x^p \in \tilde{X}^p$, чтобы $F_j(x') \leq F_j(x^p)$ для всех $j = 1..N$, при этом, хотя бы для одного j $F_j(x') < F_j(x^p)$. Нахождение множества решений эффективных по Парето и есть основная цель этого подхода. Сочетание многоуровневого моделирования и подхода многокритериальной оптимизации приводит к необходимости решать оптимизационную задачу на каждом из уровней. Такая структура направлена на то, чтобы постепенно снижать размерность Парето эффективных решений на каждом следующем уровне. При нахождении оптимальных параметров для всей задачи возникает необходимость в сужении множества возможных решений в том числе при помощи итерационного процесса как в рамках одного уровня, так и циклов, включающих два и более уровня (см. рис. 1).

В четвертой главе для трех уровней моделирования, упомянутых в третьей главе, проведены расчеты нейтронно-физических характеристик для МОХ и металлического топлива (МЕ). Так на

модели бесконечной гомогенной размножающей среды были проанализированы следующие величины:

- показатель критичности среды;
- показатель воспроизводства;
- температурный Доплер-эффект;
- эффект натриевого опустошения;
- эффективная доля запаздывающих нейтронов.



Рисунок 1. Итерационная схема последовательных трехуровневых (трехстадийных) решений оптимизационных задач.

Анализ проводился через декомпозицию результатов расчета по программе OpenMC по различным типам взаимодействия нейтронов со средой и основным нуклидам. Так с точки зрения критичности, как видно из данных таблицы 3, ^{238}U в металлическом топливе в большей степени вовлечен как в генерацию вторичных нейтронов в результате деления, так и захвата, и, следовательно, образования нового делящегося материала.

Таблица 3 – Скорости реакций взаимодействия нейтронов со средой по отношению к общему числу реакций.

Нуклид	МЕ	МОХ	(МОХ-МЕ)/МЕ,%
генерация			
²³⁹ Pu	0,0170	0,0165	-3%
²³⁸ U	0,0035	0,0025	-29%
поглощение			
²³⁹ Pu	0,0071	0,0073	3%
²³⁸ U	0,0101	0,0078	-23%
деление			
²³⁹ Pu	0,0058	0,0056	-4%
²³⁸ U	0,0013	0,0009	-29%
рад. захват (n, γ)			
²³⁹ Pu	0,0011	0,0017	50%
²³⁸ U	0,0088	0,0068	-22%
параз. Захват			
констр.мат.	2,64E-04	3,66E-04	39%

Связано это с большей плотностью металлического топлива и возможностью добиться критичности с меньшей долей делящегося, а значит, с большей долей воспроизводящего материала. Сравнительно менее «жесткий» спектр нейтронного потока у МОХ приводит к еще двум значимым с точки зрения критичности последствиям:

- меньшему значению величины α_f - доли реакций деления по отношению к общему числу поглощенных нейтронов для делящихся изотопов, что демонстрируется в большей доле реакции (n, γ) для этого вида топлива;
- большей доли поглощения на нетопливных нуклидах, так как их сечения взаимодействия выше в области резонансных и тепловых значениях энергий, что приводит к еще большей потребности в увеличении обогащения по плутонию для оксидного «горючего».

Факторы, влияющие на воспроизводство, в целом совпадают с теми, что воздействуют на критичность. Основное различие между двумя видами топлива, с точки зрения воспроизводства, состоит в меньшей доле воспроизводящих топливных изотопов в случае МОХ топлива. В нем снижение коэффициента воспроизводства происходит в результате присутствия ядер кислорода, ведущих к смягчению спектра нейтронов, дополнительному паразитному поглощению нейтронов и уменьшению доли урана.

В результате изучения составляющих температурного эффекта в модели размножающей среды реактора на быстрых нейтронах было установлено, что основной вклад в Доплер-эффект обуславливает:

- повышение скорости реакции поглощения на нетопливных ядрах;
- повышение скорости поглощения, а в особенности радиационного захвата, на сырьевых ядрах.

При изучении эффекта натриевого опустошения показано, что основной причиной положительного значения пустотного эффекта - значительное увеличение скорости деления при куда меньшем росте поглощения нейтронов в среде. Основной прирост при изъятии натрия приходится для реакций на ^{238}U и ^{240}Pu как для оксидного, так и для металлического топлива. Относительный вклад отдельно воспроизводящих изотопов (^{238}U и ^{240}Pu) и делящихся (^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu) в суммарную величину произведенных вторичных нейтронов в таблице 4.

Таблица 4 – Вклад воспроизводящих и делящихся изотопов в суммарное значение скорости производства вторичных нейтронов

Описание	МОХ исходное	МОХ без Na	МЕ исходное	МЕ без Na
Воспроизводящие нуклиды	17,5%	18,3%	20,0%	20,5%
Делящиеся нуклиды	82,5%	81,7%	80,0%	79,5%

Из полученных результатов расчета можно сделать вывод о том, что механизм натриевого пустотного эффекта выглядит следующим образом: изъятие натрия в первую очередь как элемента замедлителя, а не поглотителя ведет к более жесткому энергетическому спектру нейтронов в среде. Что в свою очередь приводит к росту генерации вторичных нейтронов в результате реакции деления, и в особенности на сырьевых нуклидах в быстрых энергетических группах. Относительно высокая концентрация таких нуклидов в металлическом топливе обуславливает положительное значение натриевого пустотного эффекта в быстром реакторе.

Как и коэффициент воспроизводства, $\beta_{\text{эфф}}$ в большей степени зависит от нуклидного состава тех изотопов, которые способны к делению. Наибольшее содержание ^{238}U в металлическом топливе обеспечивает значение доли запаздывающих нейтронов выше, чем для оксидного топлива из-за большей доли ^{239}Pu в последнем.

В разделе 4.2 рассматривались физические характеристики топливной сборки. Так на большинстве проектов, начиная с БН-800, используется конфигурация ТВС с натриевой полостью и поглощающим борным экраном (рисунок 2).

Помимо реактивностного эффекта при опустошении еще одно ограничение применимости металлического топлива связано с пределами по температурной совместимости материалов между собой. Что выражается в предельных значениях линейной нагрузки q_l .

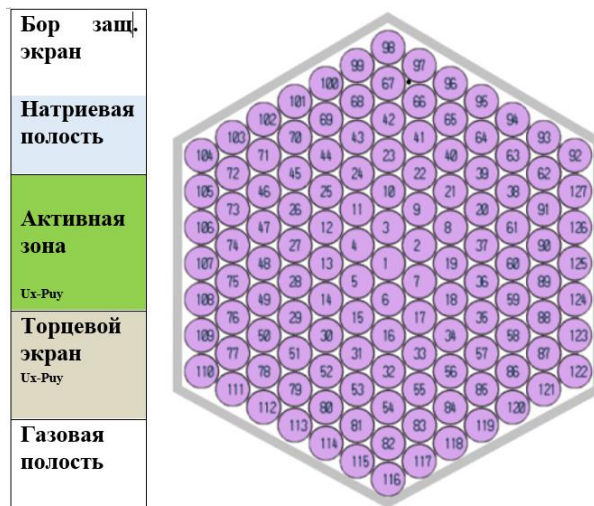


Рисунок 2. Схематичное представление ТВС быстрого реактора в разрезе по высоте и в плане для активной части.

Чтобы оценить влияние геометрических соотношений на пустотный эффект была построена модель с двумя топливными составами, отвечающими гомогенизированным составам из раздела 4.1, для металлического и базового варианта для МОХ-топлива с граничными условиями полного отражения на краях шестигранной призмы. В результате анализа результатов расчета и соображений на счет величины q_l можно прийти к следующим выводам:

- с точки зрения ограничения линейной нагрузки наиболее оптимальные зоны с большим уплощением, то есть минимальным значением H/D ;
- с точки зрения получения минимальных значений натриевого пустотного эффекта реактивности все линейные размеры сборки должны быть минимизированы для повышения величины утечки нейтронов;

- для обеспечения критичности загрузки необходимо либо иметь наименьшую утечку, то есть максимальные размеры зоны, либо при меньших размерах наибольшую долю делящихся нуклидов;
- для достижения высоких значений КВ необходима наименьшая утечка, чтобы максимально эффективно использовать нейтроны, а также требуется наибольшая доля воспроизводящих нуклидов.

В разделе 4.3 рассматривалась принципиальная конструкция топливной загрузки реакторной установки на быстрых нейтронах. Набор сборок в загрузке быстрого реактора (рисунок 3), основываясь на проектах новых и уже существующих реакторов, можно свести к нескольким базовым типам сборок:

- топливные сборки различные по обогащению и кратности перегрузки;
- зона воспроизводства;
- сборка регулирования/компенсации реактивности в погруженном состоянии и канала с гильзой и с натрием в состоянии с изъятой сборкой регулирования;
- сборка аварийной защиты в погруженном состоянии и канал с гильзой и с натрием в изъятном состоянии;
- сборки стальной/борной защиты для уменьшения радиационной нагрузки на внереакторные устройства и приборные каналы.

Также для пуска реактора могут быть установлены специальные сборки с пусковым источником.

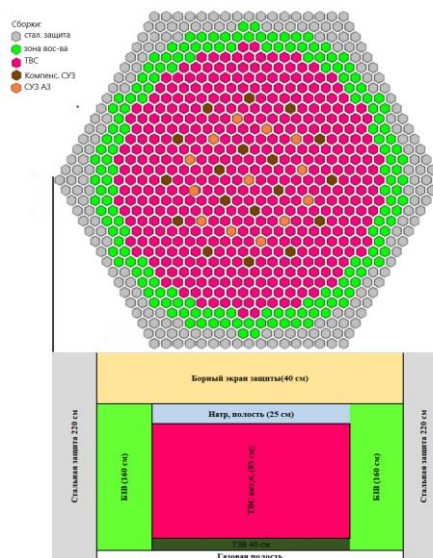


Рисунок 3. Схематичное взаимоположение ТВС быстрого реактора в разрезе в плане и по высоте.

Одним из основных показателей всей загрузки выступает коэффициент неравномерности энерговыделения по ТВС. С целью снижения его величины для зон с низким значением потери реактивности по кампании в настоящей работе рассматриваются годовые интервалы МКК с 4-х и 6-и кратной перегрузкой ТВС.

К недостаткам проектов быстрых реакторов с металлическим топливом помимо натриевого пустотного эффекта относят низкий уровень обратной связи, выражающийся в сравнительно меньшей по сравнению с оксидным материалом значении мощностного коэффициента реактивности. Одна из причин такого положения дел является низкое значение доплеровского коэффициента. Но его вклад не является решающим фактором. Рассмотрим распределение температур по топливной таблетке для металлического и оксидного топлива при одинаковой линейной нагрузке 46 кВт/м и сравнительной энерговыработке (рисунок 4).

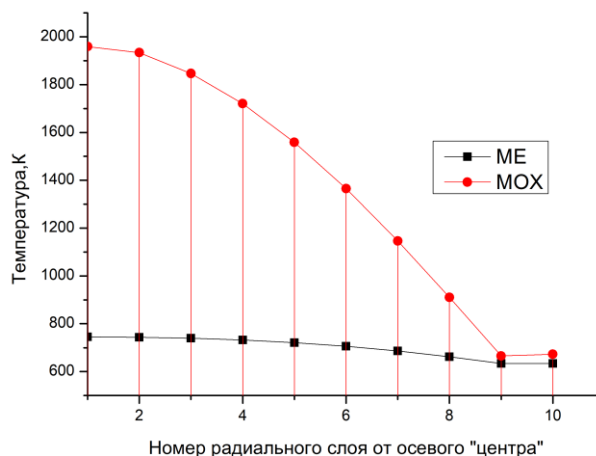


Рисунок 4. Профиль температур в топливной таблетке для металлического и оксидного топлива при равном энерговыделении.

Из приведенного рисунка видно, что температурный перепад отличается на порядок, что приводит к наименьшему значению мощностного эффекта реактивности для металла. Для проверки работы новой методики учета обратных связей по термомеханике в разделе 4.4 приведены результаты расчетов эффектов реактивности на моделях загрузок РУ БН-600 и БН-800 с оксидным урановым и MOX-топливом и ЕВР-II с металлическим. Полученные результаты для РУ БН-800 (см.

таблица 5) говорят о хорошем согласии с экспериментальными данными на невыгоревшей активной зоне.

Таблица 5 – Отклонение расчетов эффектов и коэффициентов реактивности от эксперимента на РУ БН-800

Наименование	Отклонение от эксперимента, %
ТКР, цент/°С	5,00
МКР, цент/%Nном	-3,70
Мощностной эффект р-ти, (40-50 %Nном), % (ΔК/К)	-3,10

В разделе 4.4 также содержатся результаты верификации методики на модели ЕВР-II с металлическим топливом, полученные в комплексе ГЕФЕСТ и другими программами. Для решения проблем, стоящими перед загрузками быстрого реактора с металлическим топливом, предлагается использование гибридных или гетерогенных загрузок. В разделе 4.5 приводятся различные типы гетерогенности, которые применялись в реакторной практике ранее. Для настоящей работы применяются следующие типы гетерогенности:

1. гетерогенность внутри ТВС потвэльная, пример - уран-гадолиниевое, уран-эрбиевое топливо нынешних ВВЭР и РБМК;
2. гетерогенность внутри ТВС аксиальная, пример-действующие реакторы типа БН с топливом и прослойкой, топливом и торцевыми экранами;

Повышение воспроизводящего потенциала для быстрого реактора – основная задача введения металлического топлива в сборку с оксидным топливом. Раздел 4.6 посвящен вариантным расчетам загрузки с МОХ топливом и обедненным металлическим топливом, расположенным потвэльно, и обогащенным металлическим топливом, отделенным по высоте воспроизводящей прослойкой (см. рисунок 6).

Цель проведения вариантных оптимизационных расчетов согласно алгоритмам, описанным в разделе 3.6, отыскание такого соотношения между металлическим и оксидным топливом, которое соответствовало критериям безопасности и эффективности.

Проведенные вариантные расчеты показали, что наиболее оптимальный вариант с аксиальной гетерогенностью предпочтителен, чем с потвэльной, как с точки зрения параметров

безопасности, так и эффективности. Поэтому такой вариант конфигурации был представлен на ряде межведомственных и международных конференций. Был получен патент на сборку с гибридным аксиальным положением металлического и оксидного топлива. Также в разделе содержатся результаты детального анализа полей энерговыделения и температур, показателей воспроизводства и запаздывающих нейтронов для гибридной загрузки.

В ходе анализа НФХ размножающей среды быстрых реакторов на примере кислорода в оксидном топливе было показано, что введение в среду быстрого реактора относительно легких ядер замедлителя приводит к уменьшению «жесткости» спектра, что ведет с одной стороны к улучшению показателей обратных связей, а с другой, к росту «паразитного» захвата нейтронов и падению величины воспроизводства.

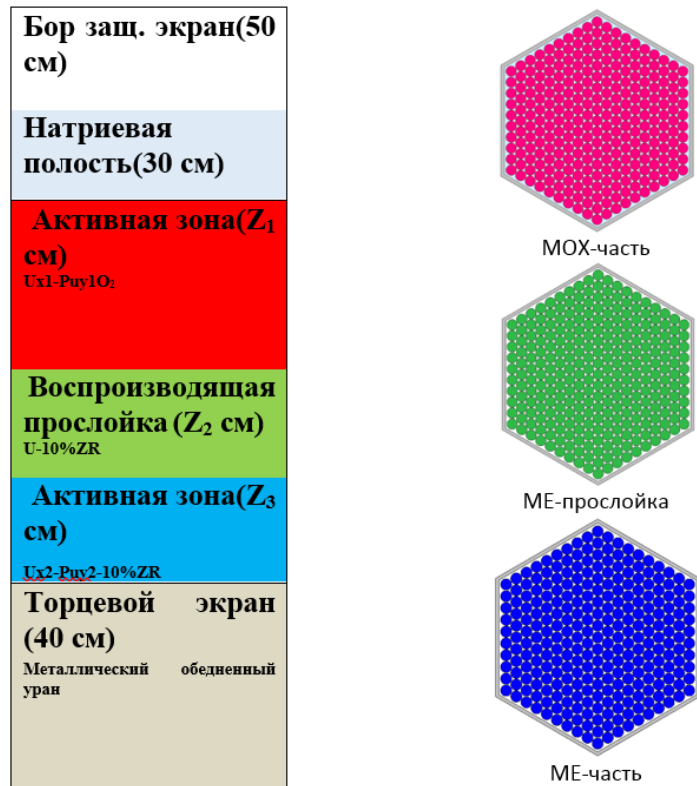


Рисунок 6. Шаблоны для вариантных расчетов для гибридного МОХ и металлического топлива при аксиальном расположении с воспроизводящей прослойкой.

В разделе 4.7 даны результаты расчетного анализа с целью поиска наилучшего замедлителя среди нуклидов с атомной массой не выше циркония по коду Монте-Карло. С точки зрения функционалов: $R_5^{1 \rightarrow 2}$ – скорости реакции увода нейтронов за границу ~ 1 Мэв в трехгрупповом

представлении и R_c - скорости реакции поглощения нейтронов на данном нуклиде на одно ядро для усредненного изотопного состава среды быстрого реактора. Наиболее оптимальные значения при таком рассмотрении у элементов O, F, Be, Mg, Ti, что подтверждается примером MOX топлива по сравнению с металлическим.

В разделе 4.8 содержится описание моделей и результатов расчета для гибридных топливных загрузок с металлическим топливом и замедлителем. Были использованы следующие шаблоны расположения замедлителя в ТВС для построения решений в вариантных расчетах:

- 1) гетерогенное расположение замедлителя в оболочках боковых и угловых твэлов сборок с целью создания двух спектральных зон: центральной топливной и боковой-причехольной с целью удержания воспроизводства;
- 2) гетерогенное расположение замедлителя в оболочках твэлов равномерно по ТВС – вариант позиционирования, при котором формируется единая спектральная область внутри сборки;
- 3) гетерогенное расположение замедлителя в сборке с двойным чехлом и замедлителем, расположенным в межчехловом пространстве – вариант, практически полностью совпадающий с 1), отличие в конструкционном исполнении и доле конструкционного материала в расчетной ячейке;
- 4) гетерогенное расположение замедлителя в оболочке твэлов по высоте, отвечающей двум частям активной зоны, разделенной воспроизводящей прослойкой – конкретное позиционирование замедлителя в плане не принципиально, в сборку аналогично варианту с MOX-топливом вводится аксиальная воспроизводящая прослойка с целью повышения воспроизводства и снижения линейной нагрузки.

Материал замедлителя принимается, исходя из соображений раздела 4.6:

- оксид бериллия (BeO);
- оксид магния (MgO);
- фторид магния (MgF₂).

Помимо вариации замедлителя и варианта его размещения, решения находились для двух типов изотопного состава плутония: отвечающих переработанному топливу тепловых и быстрых реакторов.

Был проведен расчет для 10 из 24-х описанных вариантов. Результаты нейтронно-физических функционалов сравнивались с реперными загрузками с МОХ и металлическим топливом. Полученные значения свидетельствуют о том, что:

- внедрение замедлителя в топливную сборку позволяют более чем на 50 % улучшить показатели обратных связей, выраженных в Доплер-эффекте, по сравнению с гомогенной металлической загрузкой, в то же время почти в 3 раза по сравнению с металлической загрузкой и более чем на 70 % по сравнению с гомогенной МОХ загрузкой сократить максимальные значения пустотного эффекта реактивности;
- внедрение замедлителя позволяет снизить изменение реактивности за одну кампанию на уровень сравнимый с эффективной долей запаздывающих нейтронов;
- внедрение замедлителя снижает коэффициент воспроизводства зоны до уровня $1,0 \pm 0,1$, что без дополнительных зон воспроизводства позволяет работать установке в рамках топливного цикла в режиме самоподдержания или утилизации ядерных материалов;
- использование BeO в качестве замедлителя с различными шаблонами расположения и типами топлива в сборке в среднем дает лучшие результаты с точки зрения поставленных критериев, так как для достижения желаемых значений требуется меньшее количество замедляющего материала;
- использование соединений магния (MgO , MgF_2) в качестве замедлителя позволяет достичь приемлемых результатов с точки зрения критериев оптимизационных задач, комбинация их с плутонием - рефабрикатом тепловых реакторов позволяет получить наибольшие значения Доплер-эффекта;
- принципиальной разницы с точки зрения НФХ от типа плутония не выявляется, для рефабриката тепловых реакторов лучше показатели обратных связей, выраженные в величине Доплер-эффекта, рефабрикат быстрых установок обеспечивает наименьшее содержание высших актинидов в отработанном топливе;
- установки с ТВС со всеми типами гибридного топлива могут работать в режиме расширенного воспроизводства при использовании боковой воспроизводящей зоны и торцевых экранов, при этом вариант с воспроизводящей прослойкой дает в коэффициенте воспроизводства значение выше, чем для гомогенного металлического топлива;

- максимальные значения распределенных характеристик были получены на приближенных значениях модели загрузки реактора, при вариациях в конфигурации они могут отличаться вплоть до 10 % из-за изменения неравномерности энерговыделения, выраженных в величинах K_z и K_r ;
- основная проблема для всех вариантов с размещенным замедлителем - относительно высокое значение линейной энергонапряженности, этот показатель можно снизить в режиме профилирования загрузки в 6-и кратных топливных кампаниях.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Для проведения поисковых проектных работ и получения эксплуатационных характеристик загрузки были разработаны расчетные средства и методики, включая методику учета термомеханических эффектов в быстрых реакторах в нейтронно-физическом расчете. Разработанный подход позволил впервые в проектных и эксплуатационных нейтронно-физических расчетах определять показатели безопасности активной зоны с обратной связью по температурным параметрам реакторной установки, таких как мощностной коэффициент реактивности, напрямую в результате решения условно-критической задачи с учетом относительного перемещения топлива, что позволило повысить точность определения величин на 20-30% относительно результатов измерений.
2. Разработан проект быстрого реактора мощностью 1200 МВт (эл.) с гетерогенной активной зоной, удовлетворяющий поставленным критериям. Результатом работы является предэскизный проект активной зоны реактора большой мощности с гетерогенным расположением МОХ и металлического топлива, для которого получены нейтронно-физические характеристики его загрузки. В том числе при значении мощностного коэффициента реактивности выше, чем для аналогичной загрузки с металлическим топливом, с ростом показателей воспроизводства, более чем в полтора раза выше относительно референтного проекта с МОХ-топливом и темпом потери запаса реактивности на выгорание в 4 раза ниже. На разработанные расчетные средства получены аттестационные паспорта в надзорном органе.
3. Применение алгоритма поиска оптимальных решений для гибридных загрузок быстрого реактора позволило найти такие параметры топливных сборок с металлическим топливом и замедлителем, которые бы удовлетворяли как критериям ядерной безопасности

реакторной установки в значениях натриевого пустотного эффекта активной зоны в 2 раза ниже, чем для референтной загрузки с МОХ-топливом, так и эффективности использования топлива в ней с КВ в среднем на 20% выше.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Дробышев Ю.Ю., Селезнев Е.Ф. «Расчет эффектов реактивности для активных зон реакторных установок на быстрых нейтронах в программно-техническом комплексе ГЕФЕСТ» // «Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов» 2017, вып. 2, с. 44-52. (Входит в перечень ВАК).
2. Селезнев Е.Ф., Белов А.А., Белоусов В.И., Чернова И.С., Дробышев Ю.Ю. «DOLCE VITA» // «Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы» 2018, вып. 1:, с. 157-168 (Входит в перечень ВАК).
3. Асатрян Д.С., Белов А.А., Белоусов В.И., Березнев В.П., Ивченко Д.В., Селезнев Е.Ф., Чернова И.С., Карташов К.В., Перегудов А.А., Раскач К.Ф., Семенов М.Ю., Сорокин А.П., Цибуля А.М., Якунин А.А., Дробышев Ю.Ю., Карпов С.А., Федоров И.В. «Комплекс программ ГЕФЕСТ800 для проведения эксплуатационных расчетов нейтронно-физических характеристик БН-800 в нестационарном режиме» Атомная энергия. 2015. Т. 119. № 1. С. 3-7. (Web of Science).
4. Асатрян Д.С., Белов А.А., Белоусов В.И., Березнев В.П., Ивченко Д.В., Селезнев Е.Ф., Чернова И.С., Кощеев В.Н., Мантуров Г.Н., Перегудов А.А., Семенов М.Ю., Цибуля А.М., Дробышев Ю.Ю., Карпов С.А., Федоров И.В. «Комплекс программ ГЕФЕСТ800 для проведения эксплуатационных расчетов нейтронно-физических характеристик БН-800 в стационарном режиме» Атомная энергия. 2015. Т. 118. № 6. С. 303-309. (Web of Science).
5. Drobyshev I.I., Seleznev E.F. // «Analysis of the Characteristics of the Fast Breeder Reactor with Metallic Fuel» / международная конференция по быстрым реакторам и соответствующим топливным циклам (FR17), проведенная МАГАТЭ 26-30 июня 2017 г. ,г.Екатеринбург
6. Seleznev E.F., Belov, A.A., Drobyshev I.I. and etc. // «Using of computer code GEFEST800 at the initial stage of NPP operation with BN-800» / международная конференция по быстрым реакторам и соответствующим топливным циклам (FR17), проведенная МАГАТЭ 26-30 июня 2017 г. , г.Екатеринбург
7. Дробышев Ю.Ю. Селезнев Е.Ф. «Расчет коэффициентов реактивности в программно-техническом комплексе ГЕФЕСТ» Научно-технической конференции «Нейтронно-

физические проблемы атомной энергетики» «НЕЙТРОНИКА-2017», проводимой Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» 29 ноября –1 декабря 2016 г. в ФГУП «ТНЦ РФ ФЭИ им. А.И. Лейпунского» (Входит в перечень ВАК).

8. Селезнев Е.Ф., Белов А.А., Белоусов В.И., Дробышев Ю.Ю. «Нейтронно-физические модули потвального расчета комплекса ГЕФЕСТ» // Сборник докладов по результатам конференции «Десятая Международная научно-техническая конференция АО «Концерн Росэнергоатом» на тему «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» МНТК-2016, стр.134
9. Селезнев Е.Ф., Дробышев Ю.Ю., и др., «ГЕФЕСТ 800 с системой подготовки констант CONSYST и библиотекой БНАБ-93» // Аттестационный паспорт программного средства № 404 от 14 июля 2016 г., Экспертный совет по регистрации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре
10. Селезнев Е.Ф., Дробышев Ю.Ю., и др., «Отраслевой нейтронно-физический расчетный код на базе диффузионного приближения. Версия 1.1 (DOLCE VITA/V1.1)» // Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин № 500 от 14 декабря 2020 г., Экспертный совет по регистрации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре