



ЛУБИНА Анна Сергеевна

**ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ТВС АКТИВНОЙ ЗОНЫ
БЫСТРОГО НАТРИЕВОГО РЕАКТОРА С ВЫСОКИМ ТЕМПОМ НАРАБОТКИ
ВТОРИЧНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

Специальность 2.4.9. – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная
безопасность

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

Научный руководитель: *Субботин Станислав Анатольевич*
кандидат технических наук,
начальник отдела стратегических исследований
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

Официальные оппоненты: *Марков Павел Владимирович*
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Семёнов Владимир Николаевич
доктор физико-математических наук,
заместитель заведующего отделением анализа
безопасности ядерных энергетических установок
ИБРАЭ РАН, г. Москва

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНИЦ РФ – ФЭИ»), г. Обнинск

Защита диссертации состоится 3 декабря 2024 г., начало в 14.00, на заседании диссертационного совета 02.1.003.04 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 02.1.003.04,
кандидат физико-математических наук



Д.А. Шкаровский

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Основные системные проблемы существующей атомной энергетики связаны с ограниченностью доступных ресурсов природного урана и накоплением отработавшего ядерного топлива. Обе эти проблемы предлагается решить путем ввода в ядерную энергетику необходимой доли быстрых реакторов и замыкания ядерного топливного цикла в двухкомпонентной ядерной энергетике с тепловыми и быстрыми реакторами.

Однако и при наличии быстрых реакторов в системе ядерной энергетики существует ряд проблем. Для перехода к устойчивой системе ядерной энергетики с быстрыми реакторами, имеющими низкий коэффициент воспроизводства (1,05-1,2) и низкую энергонапряженность, требуется почти полное замещение и вытеснение тепловых реакторов из системы. Необходимо отметить, что такая система позволит сохранить достигнутую к тому времени мощность ядерной энергетики, однако не даст возможностей для ввода дополнительных мощностей и роста ядерной энергетики в целом.

Для развития ядерной энергетики необходимо введение в структуру перспективных быстрых реакторов с избыточной наработкой нечетных изотопов плутония на уровне не менее 300 кг дел. Pu/год/ГВт(эл.) при стартовой загрузке по ^{239}Pu и ^{241}Pu не более 3-4 т/ГВт(эл.) и длительности внешнего ядерного топливного цикла не более 3 лет.

Указанный темп наработки плутония достигается, например, в реакторе на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, с металлическим U-Pu-топливом в активной зоне и металлическим ураном в бланкетах. Особенности данного реактора, которые позволяют достичь необходимых системных параметров по наработке, являются высокая энергонапряженность активной зоны и металлическое U-Pu топливо. В следствие этого, к конструкции ТВС и теплоносителю предъявляются жесткие требования по обеспечению надежного теплоотвода от тепловыделяющих элементов в активной зоне.

Для данного типа быстрого реактора были сформированы предложения по конструкциям ТВС активной зоны, удовлетворяющим требования обеспечения надежного теплоотвода от ТВЭлов реактора при повышенной энергонапряженности в металлическом уран-плутониевом топливе. Эти варианты ТВС являлись объектами исследования с точки зрения обеспечения необходимых запасов теплотехнической надежности при охлаждении их натриевым теплоносителем. В таблице 1 приведено сравнение параметров быстрых реакторов, существующих, проектируемых и исследуемых в данной работе.

Таблица 1 – Параметры быстрых реакторов

	БН 350	БН 600	БН 800	БН 1200	Реактор 1	Реактор 2
Тепловая мощность, МВт	750	1470	2100	2800	440	2580
Температура теплоносителя на входе/выходе, °C	288/437	368/535	354/547	410/550	350/490	350/550
Средняя энергонапряженность, МВт/м ³	500	413	450	230	300	330
Объемная энергонапряженность в топливе, МВт/м ³ (макс./сред.)	1995/1155	1587/940	1264/843	750/500	894/588	2361/1527
Высота активной зоны, мм	1000	1030	900	850	800	800
Диаметр ТВЭла, мм	6,9	6,9	6,9	9,3	8,1	6,1
Относительный шаг решетки	1,15	1,15	1,15	1,112	1,16-1,19	1,34-1,4
КВ	1,35	1,3	1	1,19(1,36)	1,6-1,7	1,35

Степень разработанности темы исследования

Ранее разрабатывались варианты ТВС для быстрых реакторов, имеющие плотную упаковку твэлов, с целью повышения объемной доли топлива внутри активной зоны и обеспечения наиболее быстрого спектра нейтронов. Для таких ТВС с плотной упаковкой стержней проводились обширные исследования нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик. В частности, исследовались теплогидравлические характеристики по гидродинамике и теплообмену в пучке стержней с относительными шагами в диапазоне от 1,1 до 1,2, с дистанционированием проволочными навивками.

В данной работе поведилось исследование возможности использования плотных топливных решеток при увеличенном диаметре твэлов (8,1 мм) в кассетах с чехлом без чехла. Кроме того, исследовались варианты кассет с широкими твэльными решетками с чехлом и без чехла с твэлами уменьшенного диаметра (6,1 мм), позволяющими обеспечивать надежный теплообмен при очень высокой объемной энергонапряженности в топливе активной зоны (2...2,5 ГВт/м³).

Цели и задачи исследования

Цель настоящей работы состояла в исследовании гидродинамики и теплообмена в ТВС перспективных быстрых натриевых реакторов с высоким потенциалом воспроизводства вторичного ядерного топлива в обоснование возможности обеспечения надежного теплоотвода от твэлов активной зоны при высокой энергонапряженности.

В соответствии с поставленной целью были решены следующие задачи:

- определение наиболее подходящих расчетных моделей расчета гидродинамики и теплообмена ТВС;
- исследование характеристик гидродинамики и теплообмена в ТВС с твэлами уменьшенного диаметра (6,1 мм) и широкими решетками стержней (в диапазоне s/d от 1,34 до 1,4);
- исследование характеристик гидродинамики и теплообмена в ТВС с плотными топливными решетками стержней ($s/d = 1,16$) и увеличенным диаметром твэлов (8,1 мм);
- исследование влияния разных видов дистанционирования на гидродинамику и теплообмен (проволочные навивки, дистанционирующие решетки);
- изучение влияния чехловых и бесчехловых вариантов ТВС на неравномерности температур оболочек твэлов;
- разработка и усовершенствование конструкции ТВС активной зоны с целью обеспечения высокой теплотехнической надежности ТВС;
- выработка рекомендаций и технических предложений по вариантам конструкций ТВС, обеспечивающих высокую теплотехническую надежность.

Научная новизна работы

- Изучены особенности гидродинамики и теплообмена ранее не использовавшихся конструкций ТВС с относительно широкими топливными решетками (s/d от 1,34 до 1,4) и твэлами уменьшенного диаметра (6,1 мм).
- Изучены особенности гидродинамики и теплообмена ранее не использовавшихся конструкций ТВС с плотными упаковками ($s/d = 1,16$) твэлов увеличенного диаметра (8,1 мм), дистанционирующихся решетками и проволочными навивками.
- Предложены и обоснованы с помощью расчетов варианты конструкции ТВС с широкими и плотными решетками, обеспечивающие минимальные неравномерности температур оболочек твэл в кассетах.

Практическая значимость работы

Полученные результаты могут найти применение при проектировании реактора-бридера на быстрых нейтронах с металлическим топливом и натриевым теплоносителем для эффективной наработки вторичного ядерного топлива в замкнутом ядерном топливном цикле.

Достоверность

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается как за счет кросс-верификации при использовании кодов, расчеты по которым сверялись с расчетами по другим кодам, так и за счет сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными.

Апробация работы и публикации

Результаты исследования докладывались на российских и международных конференциях и семинарах [1-7], изложены в периодических рецензируемых изданиях из списка ВАК [8-10] и WoS [11, 12].

Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов ОВК НИЦ «Курчатовский институт», <http://computing.nrcki.ru/>.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

- Результаты верификации моделей турбулентной гидродинамики, используемых в CFD-коде ANSYS на прецизионных экспериментальных данных по полям скорости и турбулентных характеристик потока воздуха в каналах разной формы: труба, щель, гексагональные решетки стержней.
- Результаты расчетных исследований гидродинамики и теплообмена в ТВС с твэлами уменьшенного диаметра (6,1 мм) и широкими решетками стержней (в диапазоне s/d от 1,34 до 1,4), в том числе влияния разных видов дистанционирования (проволочные навивки, дистанционирующие решетки) на гидродинамику и теплообмен, а также влияния чехловых и бесчехловых вариантов ТВС на уровень максимальных температур и неравномерности температур оболочек твэлов в ТВС.
- Результаты исследования гидродинамики и теплообмена в ТВС с плотными топливными решетками стержней ($s/d = 1,16$) и увеличенным диаметром твэлов (8,1 мм), в том числе влияния чехловых и бесчехловых вариантов ТВС на уровень максимальных температур и неравномерности температур оболочек твэлов в ТВС.
- Рекомендации по усовершенствованию конструкции ТВС активной зоны с целью обеспечения высокой теплотехнической надежности ТВС.

Личный вклад автора

Научные результаты, обобщенные в научно-квалификационной работе получены автором самостоятельно. Автором самостоятельно произведен сбор и анализ отечественной и зарубежной литературы по изучаемой теме. В ходе изложенных в работе исследований, автор участвовала в постановке задач исследований и выборе методов решения; проведении необходимых расчетных исследований, требуемых для решения поставленных задач, по итогам анализа полученных результатов автором были предложены и обоснованы необходимые усовершенствования конструкции ТВС. Автор принимала непосредственное участие в анализе, обработке, интерпретации полученных результатов и подготовке статей к публикации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 124 наименований, содержит 208 страниц, 11 таблиц и 104 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели и задачи, показана научная новизна, практическая значимость, представлены доводы в обоснование достоверности результатов и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен аналитический обзор методов расчета теплогидравлики ТВС быстрых реакторов и экспериментальных данных по характеристикам гидравлического сопротивления, теплообмена и турбулентных характеристик изотермических и нагреваемых потоков в пучках стержней.

Приведены основные корреляции по трению и теплоотдаче в гексагональных пучках стержней, которые могут использоваться в кодах расчета поячейковой теплогидравлики ТВС быстрых реакторов.

Отобраны корреляции для учета влияния на трение и теплообмен следующих факторов:

- относительного шага расположения твэлов в ТВС;
- оребрения твэлов;
- наличия дистанционирующих решеток;
- отличия центральных ячеек ТВС от периферийных на границе с чехлом ТВС с учетом и без учета вытеснителей потока в этих ячейках;
- входных участков гидравлической и термической стабилизации потока.

Рассмотрены экспериментальные работы, в которых проводились прецизионные измерения температурных полей жидкометаллических теплоносителей и температур поверхности имитаторов твэлов в моделях ТВС быстрых реакторов. Отобраны корреляции по теплоотдаче для проведения кроссверификации с CFD-расчетами.

Собранные в главе данные в дальнейшем использовались при моделировании поячейковой теплогидравлики ТВС быстрых реакторов с плотными и широкими решетками твэлов с проволочным и решеточным дистанционированием.

Проведен обзор экспериментальных данных по прецизионным измерениям полей скорости, температуры и турбулентных характеристик в моделях пучков стержней с изотермическим потоком воздуха и нагреваемым потоком натрия в пучках стержней. Отмечены основные закономерности формирования турбулентных профилей скорости, температуры, турбулентных касательных напряжений и теплового потока, а также масштаб анизотропии турбулентной диффузии импульса и энергии в радиальном и азимутальном направлении. Эти данные использовались в дальнейшей верификации CFD-моделей с целью выбора наиболее точных расчетных инструментов, способных правильно оценивать не только интегральные характеристики потока теплоносителя (коэффициент трения, перепад давления, коэффициент теплоотдачи), но и локальные неравномерности температур, скоростей и давлений.

Во второй главе представлено описание расчетных методик и моделей, используемых для решения задач данной работы.

В работе использовались два основных расчетных метода:

- 3-мерная локально-распределенная мелкосеточная термогидродинамическая модель (CFD – computational fluid dynamics) для прецизионных расчетов распределений полей скоростей,

давлений, турбулентных характеристик и температур теплоносителя, а также температур конструкций ТВС отдельных ячеек и секторов ТВС методами конечных элементов (МКЭ).

Данный подход реализовывался с помощью встроенных CFD-пакетов CFX и Fluent программного комплекса ANSYS (ANSYS Incorporated, США)

- Квази-3-мерная ячейковая (поканальная) теплогидравлическая модель ТВС на огрубленной сетке с контрольными объемами, образуемыми аксиальными слайсами ячеек ТВС, опирающаяся на пакеты эмпирических корреляций по гидросопротивлению, теплообмену, а также межячейковому обмену массой, импульсом и энергией.

Для моделирования теплогидравлических характеристик в ячейковом приближении использовалась программа COBRA-IV-I, разработанная и верифицированная для проведения расчетов теплогидравлических процессов в ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем в Battelle Pacific Northwest Laboratories (США).

В третьей главе проводится обоснование возможности использования турбулентных моделей программного комплекса ANSYS в рамках поставленной задачи по исследованию процессов гидродинамики и теплообмена ТВС быстрого реактора-бридера усовершенствованной конструкции.

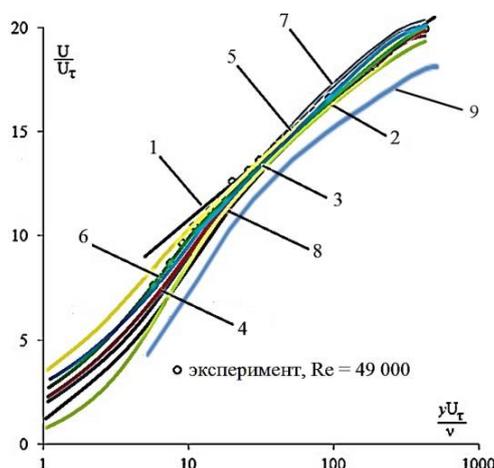
Была проведена верификация следующих моделей турбулентности, запрограммированных в программном комплексе ANSYS:

- модель с двумя дополнительными уравнениями: для турбулентной кинетической энергии (ТКЕ) и диссипативной функции ($k-\omega$);
- модель ТКЕ - диссипация ($k-\epsilon$);
- модель больших вихрей (Large Eddy Simulation-LES);
- модель отрывающихся вихрей (Detached Eddy Simulation-DES);
- модель транспорта касательных напряжений ($k-\omega$ Share Stress Transport - SST);
- модель Рейнольдсовых напряжений (Reynolds Stress Model - RSM) с опциями:
 - линейное приближение момента давление - скорости деформаций (Linear Pressure Strain);
 - квадратичное приближение момента давление – скорости деформации (Quadratic Pressure Strain);
- модель Рейнольдсовых напряжений – диссипативная функция (Omega Reynolds Stress - ORS);
- модель Рейнольдсовых напряжений по базисным линиям (Baseline Reynolds Stress – BSLRS).

Верификация перечисленных выше расчетных моделей проводилась на известных экспериментальных данных, полученных на потоках воздуха по полям скорости, турбулентной кинетической энергии (ТКЭ), а также напряжениям Рейнольдса в каналах различной формы: щель, цилиндрическая труба и гексагональные ячейки пучка стержней с относительным шагом расположения стержней в диапазоне $s/d=1,2...1,5$. В качестве исходных данных были взяты классические эксперименты Лауфера в трубе, Хуссейна и Рейнольдса в щели, Труппа в гексагональных пучках стержней с различным шагом решетки и эксперименты Никурадзе для широкого диапазона чисел Рейнольдса.

На рисунке 1 приведено сравнение экспериментальных и расчетных данных в гексагональной ячейке пучка стержней по безразмерным профилям скорости.

Все модели показывают хорошее согласование с экспериментальными данными и между собой при $y^+ > 10$ (кроме модели $k-\varepsilon$, которая в случае гексагонального пучка стержней с $s/d = 1,2$ показала заниженные результаты). В пристеночном пространстве ($y^+ < 10$) результаты расчетов по разным моделям различаются уже значительно (различие достигает более 50 % от экспериментальных величин). Наилучшее согласование с экспериментом по профилям скорости в этой области дают модели Рейнольдсовых напряжений и SST.



$y^+ = \frac{y \cdot U_\tau}{\nu}$ – безразмерное расстояние от стенки, $U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}}$ – скорость, ассоциированная с касательным напряжением на стенке канала; ν – кинематическая вязкость, U – скорость

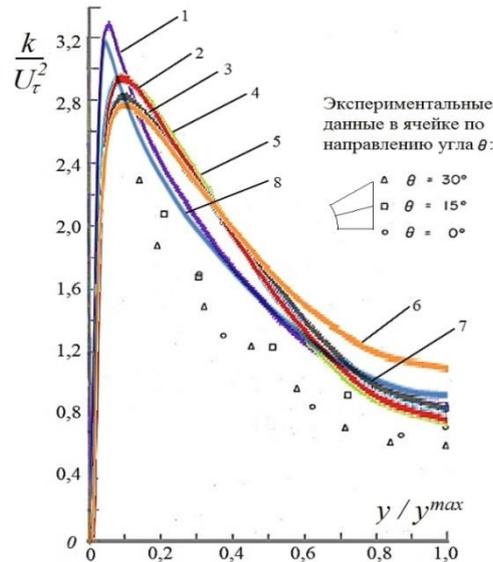
Рисунок 1 - Сравнение экспериментальных данных Труппа по безразмерным профилям скорости для воздуха в гексагональной ячейке стержней с $s/d = 1,2$ для $Re=49000$, с данными расчетов по моделям: 1 – корреляция Кармана; 2 – RSM; 3 – ORS; 4 – SST; 5 – BSL; 6 – BSL RS; 7 – BSL EARSM; 8 – $k-\omega$; 9 – $k-\varepsilon$.

На рисунке 2 приведены некоторые результаты по турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) для гексагональной ячейки в сравнении с экспериментальными данными. Наилучшее согласование с экспериментом по профилям скорости в этой области дают модели Рейнольдсовых напряжений и SST.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных для всех трех каналов показало, что в пристеночной области корректно моделирует профиль турбулентной кинетической энергии только модель RSM. Остальные модели показывают хорошие результаты в ядре потока, но заниженный результат в пристеночной области.

Так же было проведено тестирование моделей турбулентности на экспериментальных данных по теплообмену в пучках стержней.

В качестве сравнительного параметра был взят критерий Нуссельта. По расчетным данным были построены зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса для воздуха и числа Нуссельта от числа Пекле для натрия для разных моделей.



y^{max} - расстояние до линии максимальных скоростей, k – ТКЭ

Рисунок 2 - Сравнение экспериментальных данных А. Труппа по безразмерным профилям ТКЭ для ячейки $s/d=1,2$, $Re=49\ 000$ с расчетами по моделям: 1 – RSM, 2 – Omega RS, 3– BSL RS, 4 – BSL, 5 – BSL EARSM, 6 –SST, 7 – k- ω , 8 – k- ϵ

Расчетные значения Нуссельта вычислялись по формуле

$$Nu = \frac{\alpha d_r}{\lambda}, \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{q_f}{T_{ст} - \bar{T}}$ – коэффициент теплоотдачи, d_r – гидравлический диаметр, λ – коэффициент теплопроводности, $T_{ст}$ – получаемые в расчетах значения температур поверхности стержня (стенки), \bar{T} – осредненное по сечению значение температуры теплоносителя:

$$\bar{T} = \frac{\int \rho U c_p T d\omega}{\int \rho U c_p d\omega} \quad (2)$$

ρ , c_p , U – соответственно локальные значения плотности, теплоемкости и скорости потока; Ω - площадь проходного сечения ячейки.

Теоретические значения числа Нуссельта ($Nu_{теор}$) рассчитывались по известным корреляциям по теплообмену, взятым из справочника по теплогидравлическим расчетам за авторством Кириллова П.Л., Юрьева Ю.С. и Бобкова В.П.

По итогам верификации были сделаны следующие выводы:

- Все протестированные модели показали хорошее соответствие по профилям скорости в трубе, щели и ячейках пучков стержней.
- Простые модели на основе k- ϵ и k- ω могут использоваться для расчетов полей скорости вдали от чехла ТВС, и таких интегральных характеристик, как трение и средняя скорость потока в каналах с неизменной формой по длине.
- Более сложная модель транспорта Рейнольдсовых напряжений с семью дополнительными уравнениями предпочтительна для наиболее точного определения характеристик потока в

непосредственной близости к чехлу ТВС, а также в тех случаях, когда необходим учет анизотропии турбулентных обменов.

- Проведенное сравнение расчетных и экспериментальных данных по теплообмену показало хорошее качественное согласие расчета по моделям и корреляциям. Различие в 5 % для потока воздуха и до 20 % для потока натрия можно считать приемлемым для дальнейшего использования всех моделей ANSYS, за исключением модели больших вихрей (LES). Последняя не может использоваться для расчетов турбулентных потоков, т.к. не демонстрирует даже качественного согласия с проверенными корреляциями.

В четвертой главе приведены исследования особенностей теплогидравлических характеристик ТВС быстрого реактора-бридера с плотной упаковкой твэлов увеличенного диаметра с решеточным дистанционированием и с широкой упаковкой твэлов малого диаметра с решеточным дистанционированием и дистанционированием проволокой.

В данной главе представлены данные, полученные в результате теплогидравлических расчетов наиболее энергонапряженных кассет активной зоны реактора с ТВС, имеющими плотную решетку (s/d от 1,16 до 1,19) с твэлами увеличенного диаметра (8,1 мм), дистанционирующихся с помощью решеток, изготавливаемых по технологии фигурной лазерной резки из стальной пластины 20 мм, а так же представлены данные, полученные в результате теплогидравлических расчетов наиболее энергонапряженных кассет активной зоны реактора с ТВС, имеющими широкую решетку (s/d от 1,34 до 1,4) с твэлами уменьшенного диаметра (6,1 мм), дистанционирующихся с помощью решеток и проволоочной навивки.

Особенностью ТВС реактора с плотной упаковкой твэлов является высокая линейная энергонапряженность твэлов (от 500 до 520 Вт/см в максимуме).

В настоящей работе особенности теплогидравлики ТВС с плотными решетками твэлов исследовались с помощью поячейкового кода COBRA-IV-I.

Первоначально предполагалось исследование ТВС с плотной упаковкой твэлов в бесчехловом варианте исполнения. Однако, в процессе расчетов были предложены последовательно конструктивные изменения: применение чехла в конструкции ТВС, уменьшение расстояния от периферийного ряда до внутренней стенки чехла и увеличение относительного шага твэльной решетки 1,16 до 1,19.

Температура входа теплоносителя в ТВС во всех вариантах задавалась равной 350°C. В качестве еще одного граничного условия на входе в ТВС также задавался суммарный расход через кассету и межкассетный зазор (12,2 кг/с), определяемый, как средний расход через ТВС в активной зоне (дросселирование в случае бесчехловых ТВС не применяется). В таблице 2 приведены геометрические параметры исследуемых ТВС.

Таблица 2 – Конструктивные параметры исследуемых ТВС с плотной упаковкой твэлов, дистанционируемые решетками.

	ТВС №1	ТВС №2	ТВС №3	ТВС №4
Размер «под ключ», мм	107,6	113,6	112,6	115,3
Межкассетный зазор, мм	2	2	2	2
Наличие чехла	без чехла	с чехлом	с чехлом	с чехлом
Толщина чехла, мм	-	2	2	2
Шаг твэльной решетки, мм	9,4	9,4	9,4	9,6
Расстояние от периферийного ряда	-	1	0,5	0,5
Высота твэла, мм	2500	2500	2500	2500
Диаметр твэла, мм	8,1	8,1	8,1	8,1
Количество твэлов в ТВС, шт.	121	127	127	127

Для первого, второго и третьего варианта были проведены расчеты теплогидравлических характеристик для трех ТВС с соответствующими им уровнями энерговыделения: центральная ТВС, ТВС седьмого ряда и ТВС восьмого ряда.

Конструкция безчехловой ТВС предполагает замену угловых твэлов на стальные стержни. Было получено распределение температур по оболочкам характерных твэлов: №001 – угловой стержень, №002 и №004 – твэлы периферийного ряда ТВС, №014 – твэл предпериферийного ряда; №064 – центральный твэл ТВС. На рисунках 3, 4 и 5 приведены расчетные данные для варианта ТВС без чехла.

Как видно из рисунка 3, максимальная температура в центральной кассете достигается на центральном твэле №64 (660 °С). Однако, азимутальная неравномерность температуры оболочки этого твэла минимальна.

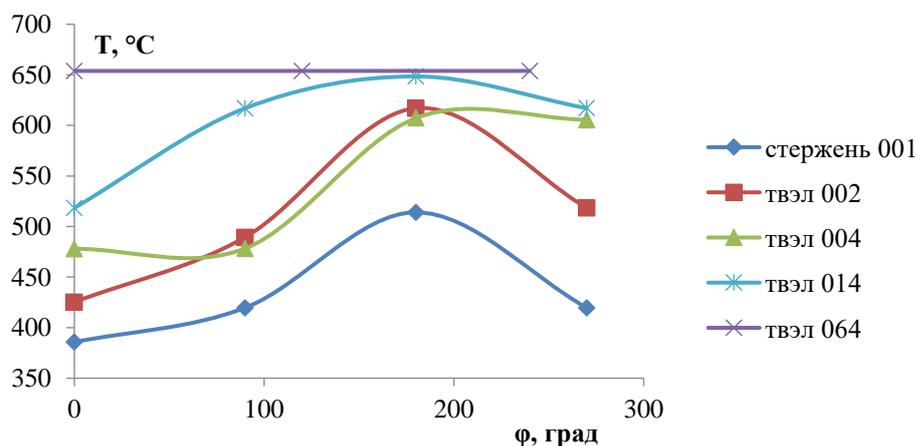


Рисунок 3 – Азимутальное распределение температур оболочек твэлов в центральной ТВС активной зоны на высоте максимальных температур.

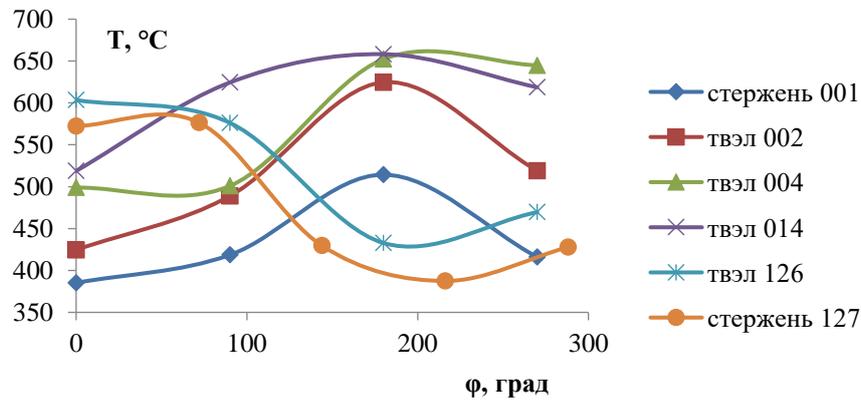


Рисунок 4 – Азимутальное распределение температур оболочек твэлов в ТВС седьмого ряда активной зоны на высоте максимальных температур.

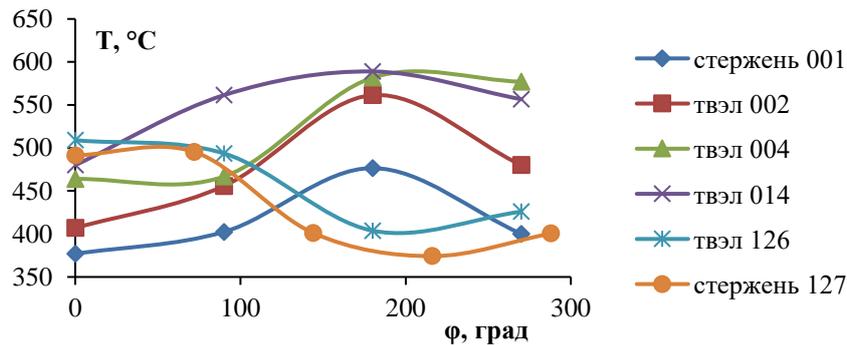


Рисунок 5 – Азимутальное распределение температур оболочек твэлов в ТВС восьмого ряда активной зоны на высоте максимальных температур.

Проведенные расчетные исследования плотноупакованных ТВС с твэлами увеличенного диаметра (до 8,1 мм), дистанционируемых с помощью решеток (без закручивания потока) показали следующее:

- В ТВС с плотной упаковкой твэлов ($s/d = 1,16$) реализуются большие неравномерности подогревов в периферийных и предпериферийных ячейках, из-за чего оболочки твэлов периферийных рядов кассеты испытывают большие азимутальные неравномерности температур.

- Самые большие неравномерности температур на оболочках твэлов (190 °C) реализуются в бесчехловых ТВС за счет турбулентно-конвективного теплообмена периферии ТВС с «холодным» межкассетным зазором.

- Использование чехла при зазоре между твэлами и чехлом 1 мм повышает гидравлическое сопротивление ТВС, так что при том же расходе теплоносителя (через кассету и межкассетный зазор) перепад давления на высоте ТВС повышается с 250 до 300 кПа. С другой стороны, изоляция за счет чехла периферийных твэлов от межкассетного зазора позволяет снизить неравномерности температур оболочек до 115 °C,

- Уменьшение этого зазора до 0,5 мм снижают азимутальные разверки еще на 20 °C (до 95 °C).

- Небольшое увеличение шага твэльной решетки (с s/d от 1,16 до 1,19) при малом зазоре между твэлами и чехлом (0,5 мм) позволяют снизить неравномерности подогревов в ТВС до 20 °C и, в основном, выровнять температуры теплоносителя и оболочек твэлов в кассете. При этом проблемным местом остается только угловая ячейка ТВС, в которой подогрев на 100 °C выше, чем в среднем по кассете. Эта проблема может быть эффективно решена за счет формирования

(выдавливания или проточки) канавки в углу чехла, увеличивающей проходную площадь угловой ячейки. Такая канавка шириной 7 мм и глубиной 0,35 мм полностью нивелирует неравномерность подогревов вокруг углового твэла, что приводит к снижению азимутальных неравномерностей температуры оболочки этого твэла до 20 °С. При этом, на остальных твэлах ТВС неравномерности не превышают 25 °С.

Следует отметить, что применение дистанционирующих решеток в плотноупакованных ТВС с твэлами увеличенного диаметра вполне осуществимо на основе хорошо освоенной технологии фигурной лазерной резки из цельной металлической пластины толщиной 20 мм. Однако, при плотной упаковке дистанционирующие решетки имеют довольно большой коэффициент местного сопротивления (1...1,2), что приводит к существенному вкладу в общее гидравлическое сопротивление ТВС. По сути, такой способ дистанционирования в плотных пучках не дает преимущества над проволочным дистанционированием по потерям давления, и уступает с точки зрения возможностей выравнивания температур теплоносителя в ТВС за счет закрутки потока от проволоки.

Далее было приведено исследование особенностей гидродинамики и теплообмена в чехловых и бесчехловых ТВС быстрого натриевого реактора с широкой решеткой твэлов.

В качестве первоначального варианта была рассмотрена конструкция ТВС, состоящая из твэлов уменьшенного диаметра (6,1 мм) в широкой твэльной решетке с $s/d = 1,34$. Для дистанционирования твэлов предполагалось использовать проволочные навивки типа «ребро-по-ребру». Расчеты проводились с помощью программного комплекса ANSYS и поясничного кода COBRA-IV-I.

Второй вариант ТВС был представлен в виде кассеты с такими же твэлами, но с еще более раздвинутой твэльной решеткой до $s/d = 1,4$. В этой ТВС предполагается использование дистанционирующих решеток.

Конструктивные параметры трех вариантов конструкции исследуемых ТВС представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Конструктивные параметры исследуемых ТВС с широкими твэльными решетками.

Варианты размещения и дистанционирования твэла в ТВС	ТВС с $s/d=1,34$ и проволочной навивкой «ребро-по-ребру»	ТВС с $s/d=1,4$ и дистанционирующими решетками	
Размер «под ключ», мм	153	189	187
Межкассетный зазор, мм	2	2	2
Наличие чехла ТВС	с чехлом	с чехлом	без чехла
Толщина чехла, мм	2	2	-
Высота твэла, мм	2500	2500	2500
Диаметр твэла, мм	6,1	6,1	6,1
Расстояние между твэлами и	1	1	-
Шаг между твэлами, мм	8,15	8,51	8,51
Количество твэлов в ТВС, шт.	331	469	469

Проведенные исследования теплогидравлических характеристик вариантов ТВС быстрого реактора-бридера с широкими (s/d от 1,34 до 1,4) твэльными решетками показало следующее:

1) Для варианта конструкции чехловой ТВС с 331 твэлами малого диаметра (6,1 мм), расположенными с шагом $s/d = 1,34$ и дистанционируемыми проволочными навивками типа ребро-по-ребру характерным является хорошая выровненность подогревов теплоносителя по ячейкам ТВС. Это качество позволяет снизить скорость потока в ТВС ниже 4 м/с. Так, при скорости 3,7 м/с подогревы в ТВС различаются не более чем на 15 °С. При среднем подогреве в максимально напряженной ТВС 234 °С максимальные температуры оболочек твэлов в кассете не превышают (без учета факторов неопределенности) 550 °С, а максимальные азимутальные неравномерности температур для центрального, периферийного и углового твэлов в варианте не превышают 2 °С, 5,5 °С и 6 °С, соответственно. Перепад давления на такой ТВС имеет довольно умеренное значение – 250 кПа, благодаря невысокой скорости теплоносителя и широкой решетке твэлов. Таким образом, данная конструкция ТВС при умеренной скорости теплоносителя обеспечивает надежное охлаждение при очень больших тепловых потоках с поверхности твэлов, достигающих 2,5 МВт/м². На рисунке 6 приведены распределения температур теплоносителя, полученные в результате CFD-расчета (ANSYS) в сечении их максимальных неравномерностей для двух вариантов расчета: без закручивающего момента импульса и с закручивающим моментом, имитирующем проволочную навивку.

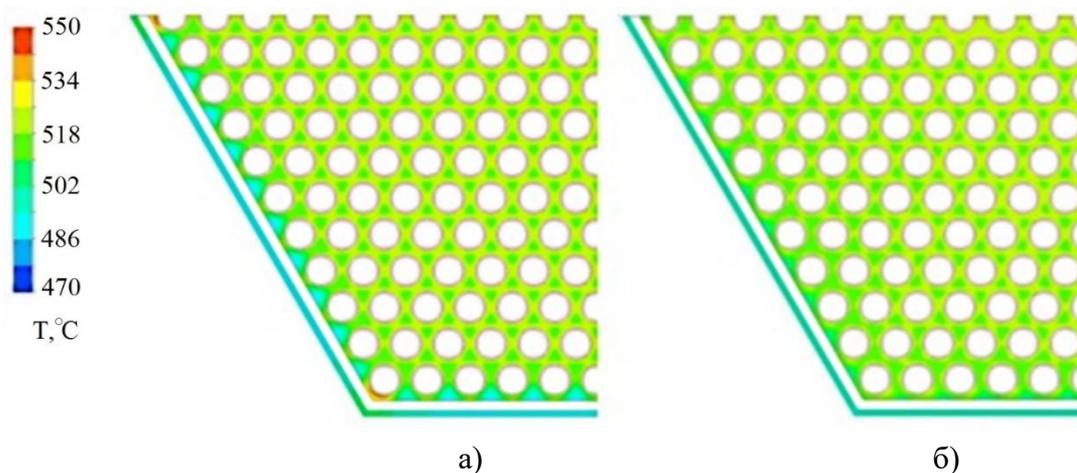


Рисунок 6 – Распределение температур теплоносителя в ТВС в сечении их максимальных неравномерностей: а) в модели ТВС без учета закрутки потока; б) в модели ТВС с учетом закрутки потока теплоносителя

2) В чехловой ТВС с широким шагом ($s/d=1,4$) расположения 469 твэлов, дистанционируемых решетками, можно добиться довольно хорошей выровненности температур теплоносителя и оболочек, за исключением угловых твэлов. Для снижения азимутальных неравномерностей температур оболочек угловых твэлов был применен способ, описанный в п. 4.4, а именно, предложено увеличение площади угловой ячейки ТВС за счет либо выдавливания канавки в углу чехла, либо проточки в углу чехла, шириной 7 мм и глубиной не более 0,4 мм. В таком оптимизированном варианте конструкции ТВС максимальные температуры наружной поверхности оболочек углового, периферийного и центрального твэла оказываются довольно близкими и составляют 591 °С, 587 °С и 586 °С соответственно. При этом азимутальная неравномерность температуры оболочки углового твэла не превышает 5-10 °С, периферийных твэлов 10 °С и центральных твэлов 1,5 °С. Перепад давления на ТВС не превышает 190 кПа, а средний подогрев (с учетом межкассетного зазора) составляет 227 °С. На рисунке 7 приведено сравнение азимутальных распределений температур для вариантов без канавки в углу чехла и с ней.

Таким образом, данный вариант конструкции ТВС также позволяет обеспечить надежный теплоотвод от твэлов при больших тепловых потоках ($2,5 \text{ МВт/м}^2$). Кроме того, данный вариант конструкции ТВС имеет увеличенный размер «под ключ» при небольшой толщине чехла (2 мм). Поскольку в данной конструкции вместо проволок используются дистанционирующие решетки, а также тонкий чехол, то такая конструкция ТВС позволяет иметь низкую долю стали в активной зоне (18 %), что улучшает нейтронный баланс и снижает положительный пустотный эффект реактивности.

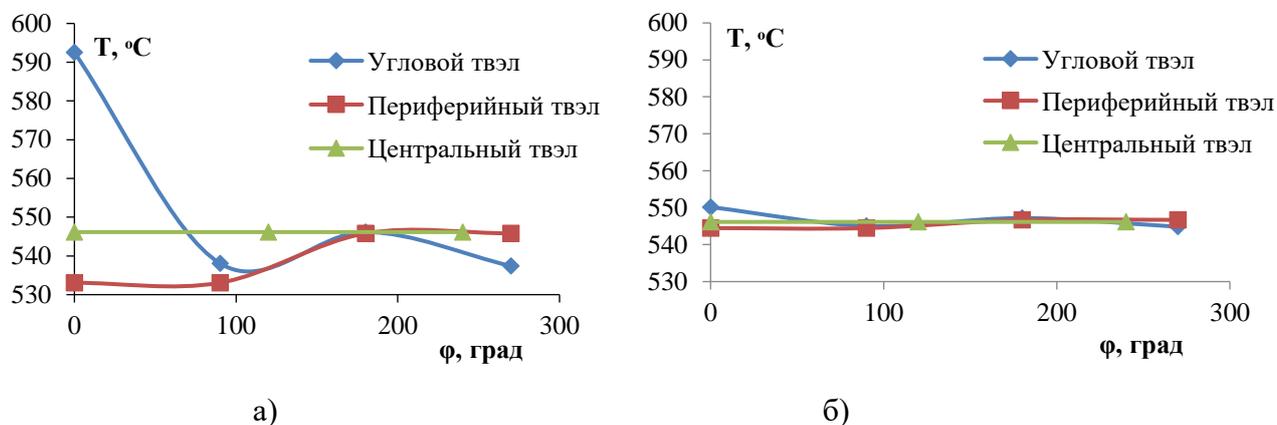
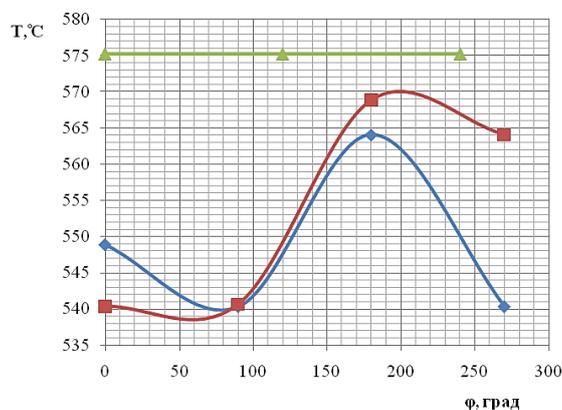


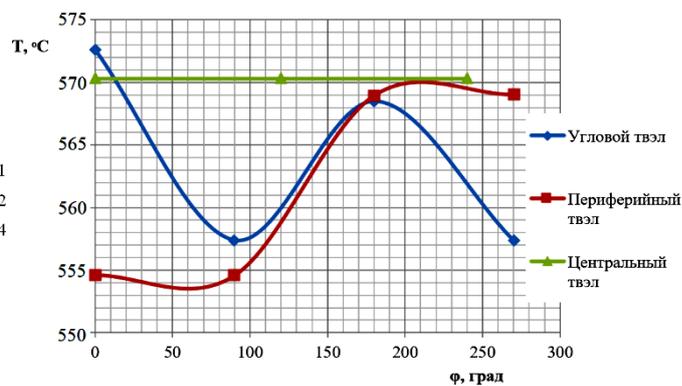
Рисунок 7 – Азимутальные распределения температур оболочек твэлов для углового, периферийного и центрального твэлов: а) без канавки в углу чехла; б) с канавкой в углу чехла.

3) Широкий шаг расположения твэлов в ТВС ($s/d = 1,4$) позволяет применить бесчехловую конструкцию кассеты. Однако, для снижения неравномерностей температур в ТВС требуется существенно увеличить скорость потока теплоносителя (до 5,6 м/с). При этом возрастает перепад давления на ТВС до 300 кПа, а средний подогрев снижается до 150 $^{\circ}\text{C}$. Для получения требуемых температур на выходе реактора при этом необходимо повысить входную температуру теплоносителя в реакторе до 400 $^{\circ}\text{C}$. Поскольку периферия бесчехловой ТВС не экранируется от межкассетного зазора чехлом, то неравномерности температур вокруг периферийного ряда твэлов в такой ТВС заметно выше, чем в чехловом варианте этой кассеты, тем не менее масштаб неравномерностей температур оболочек твэлов периферийного ряда можно считать приемлемым. Так, в случае двухмиллиметрового межкассетного зазора неравномерности температур оболочек углового и периферийного твэлов достигали 24 и 28 $^{\circ}\text{C}$ соответственно, а в случае, если межкассетный зазор равен 1 мм, они понизились до 13 и 14 $^{\circ}\text{C}$, соответственно. При этом возможное изменение межкассетного зазора в диапазоне от 1 до 2 мм не существенно влияет на изменение максимальных температур в ТВС и неравномерностей температур оболочек твэлов.

Азимутальные неравномерности температур поверхностей оболочек для углового периферийного и центрального твэла показаны на рисунке 8а для случая с межкассетным зазором 2 мм и на рисунке 8б для случая с межкассетным зазором 1 мм.



а)



б)

Рисунок 8 – Азимутальные распределения температур поверхностей оболочек углового (№1), периферийного (№2) и центрального (№64) ТВЭЛОВ.

4) Исследование влияния конструкции дистанционирующей решетки на величину ее гидравлического сопротивления выявило существенную зависимость коэффициента гидравлического сопротивления решетки от формы ее входной и выходной кромок. Так, заострение кромок на угол входа и выхода 45° приводит к снижению сопротивления на 30 %, а заострение кромок на угол 30° снижает сопротивление на 40 %. Несомненным преимуществом обладает дистанционирующая решетка с закругленной формой входа и выхода, т.к. расчет показал снижение сопротивления более чем на 40 %. Кроме того, решетку с такой формой легче изготовить, чем с заточенным острым углом входа 30° и она более технологична при сборке и менее подвержена эрозийному износу при эксплуатации ТВС.

В пятой главе приведено исследование влияния факторов неопределенности на максимальное отклонение температуры поверхности оболочки на высоте горячего пятна.

Наиболее распространенными методиками расчета статистических факторов неопределенности температур ТВЭЛОВ являются метод линеаризации и метод Монте-Карло. Метод Монте-Карло более универсален. Однако, при разумных упрощениях метод линеаризации значительно проще, а, главное, нагляден при выявлении факторов, наиболее сильно влияющих на соотношение температур ТВЭЛОВ, и может быть использован как начальная оценка влияния статистических факторов.

В данной работе для расчета факторов неопределенности использовался метод линеаризации. Были рассчитаны факторы неопределенности площадей проходных сечений ячеек ТВС, входной температуры и энтальпийного перепада в центральной ячейке активной зоны.

Было проведено исследование влияния факторов неопределенностей на статистическое отклонение максимальных температур оболочек ТВЭЛОВ для четырех вариантов ТВС: чехловая ТВС с шагом решетки 1,16 и диаметром ТВЭЛА 8,1 мм; чехловая ТВС с шагом решетки 1,19 и диаметром ТВЭЛА 8,1 мм; чехловая ТВС с шагом решетки 1,34 и диаметром ТВЭЛА 6,1 мм; чехловая и бесчехловая ТВС с шагом 1,4 и диаметром ТВЭЛА 6,1 мм.

В таблице 4 приведены номинальные значения и среднеквадратичные отклонения температуры входа в активную зону, подогрева теплоносителя в максимально напряженной ТВС до высоты горячего пятна, температурного напора стенка-теплоноситель на уровне горячего пятна, температуры горячего пятна оболочки ТВЭЛА, а также максимально возможное значение с заданной

доверительной вероятностью $P_{дог}=0,9987$ для различных вариантов конструкции ТВС быстрых реакторов-бридеров малой и большой мощности.

Все варианты ТВС быстрого реактора с плотной решеткой ($s/d = 1,16$) и диаметром твэлов 8,1 мм имеют довольно высокий уровень максимальных температур оболочек твэлов с учетом факторов неопределенности (от 673 до 712 °С). При таком уровне температур работоспособны только аустенитные нержавеющие стали.

Усовершенствованная конструкция чехловой ТВС с несколько увеличенным шагом ($s/d = 1,19$) позволила снизить подогрев и неравномерности температур теплоносителя и оболочек твэлов, что одновременно уменьшило и влияние факторов неопределенностей. Максимально возможная температура оболочек в таких ТВС уменьшилась до 627 °С. При таком уровне температур уже уместно рассматривать в качестве оболочечных материалов стали ферритно-мартенситного класса, содержащие значительно меньше нейтронных поглотителей, чем стали аустенитного класса.

Во всех вариантах конструкции ТВС быстрого реактора с широкими (s/d от 1,34 до 1,4) твэльными решетками максимально возможные (с доверительной вероятностью $P_{дог} = 0,9987$) температуры оболочек твэлов не превышают 626 °С. Широкая топливная решетка ($s/d = 1,4$) в бесчехловой ТВС позволяет снизить подогрев теплоносителя и уменьшить максимально возможные температуры оболочек до 605 °С. Таким образом, в конструкциях ТВС с широкими топливными решетками (s/d от 1,34 до 1,4) возможно применение в качестве оболочечных материалов хромистых сталей ферритно-мартенситного класса.

Таблица 4 – Среднеквадратичные отклонения $\sigma(\Delta T_{z.n.})$, $\sigma(\theta_{z.n.})$ и $\sigma(T_{z.n.})$, а также величины максимально возможных температур горячего пятна на оболочке твэла с заданной доверительной вероятностью $P_{доп} = 0,9987$ для различных вариантов конструкции ТВС

Номинальные характеристики и их статистические отклонения	Диаметр твэлов 8,1 мм			Диаметр твэлов 6,1 мм			
	Шаг твэльной решетки в ТВС, s/d						
	1,16		1,19	1,34	1,4		
	Наличие чехла						
	без чехла	чехол, зазор между твэлами и чехлом 1 мм	чехол, зазор между твэлами и чехлом 0,5 мм	чехол зазор 0,5 мм	чехол зазор 0,5 мм	чехол зазор 0,5 мм	без чехла
Номинальная температура входа теплоносителя в активную зону, °С	350	350	350	400	350	350	400
Подогрев теплоносителя до высоты горячего пятна, °С	305	275	270	190	235	235	155
Номинальная температура оболочки в горячем пятне, °С	660	630	630	590	590	590	575
СКО температуры оболочки твэлов в месте горячего пятна, $\sigma(t_{z.n.})$, °С	17,5	15,5	14,5	12,5	12	12	10
Максимально возможная температура оболочки в горячем пятне, $t_{z.n.}^{max} = t_{z.n.}^{ном} + 3\sigma(t_{z.n.})$, °С	712	676	673	627	626	626	605

Продолжение таблицы 4

Номинальные характеристики и их статистические отклонения	Диаметр твэлов 8,1 мм				Диаметр твэлов 6,1 мм		
	Шаг твэльной решетки в ТВС, s/d						
	1,16		1,19		1,34	1,4	
	Наличие чехла						
	без чехла	чехол, зазор 1 мм	чехол, зазор 0,5 мм	чехол зазор 0,5 мм	чехол зазор 0,5 мм	чехол зазор 0,5 мм	без чехла
Температурный напор стенка-теплоноситель на высоте горячего пятна, °С	5	5	5	5	7	7	7
СКО температурного напора стенка- теплоноситель на высоте горячего пятна, °С	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5
Номинальная температура оболочки в горячем пятне, °С	660	630	630	590	590	590	575
СКО температуры оболочки твэла в месте горячего пятна, °С	17,5	15,5	14,5	12,5	12	12	10
Максимально возможная температура оболочки в горячем пятне, $t_{2.n.}^{макс} = t_{2.n.}^{ном} + 3\sigma(t_{2.n.})$, °С	712	676	673	627	626	626	605

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты работы

Научно-квалификационная работа посвящена изучению особенностей гидродинамики и теплообмена в топливных кассетах активной зоны быстрых реакторов-бридеров с плотным смешанным уран-плутоний-циркониевым металлическим топливом при плотных и разреженных гексагональных упаковках твэлов в чехловых и бесчехловых ТВС, с разным типом дистанционирования твэлов (решетками и проволочными навивками), а также возможных способов улучшения конструкции этих ТВС для обеспечения надлежащего уровня теплотехнической надежности. В ходе работы получены следующие результаты:

1) Проведенная верификация моделей турбулентности CFD-кода ANSYS показала хорошее соответствие экспериментальных данных с расчетными профилями скорости в трубе, щели и ячейках пучков стержней. Простые модели турбулентности на основе ТКЕ-диссипативной функции ($k-\omega$) и ($k-\varepsilon$) могут использоваться для расчетов полей скорости вдали от стенки, и таких интегральных характеристик, как коэффициент трения и средняя скорость потока в каналах с неизменной формой по длине. Более сложная модель транспорта Рейнольдсовых напряжений с семью дополнительными уравнениями предпочтительна для наиболее точного определения характеристик потока в непосредственной близости к стенке чехла ТВС, а также в тех случаях, когда необходим учет анизотропии турбулентных обменов.

2) Проведенные исследования гидродинамики и теплообмена для ТВС с плотной упаковкой твэлов ($s/d=1,16$; $d=8,1$ мм) показали:

– Максимальный уровень (750 °С) и наибольшие неравномерности температур (190 °С) на поверхности оболочки достигаются в варианте конструкции ТВС без чехла;

– Использование чехла существенно снижает максимумы (на 100 °С) и неравномерности температур теплоносителя и оболочек твэла, однако, при этом увеличивается перепад давления на ТВС (от 260 до 450 кПа).

– Совершенствование конструкции ТВС с плотной упаковкой твэлов за счет использования тонкого чехла (2 мм) с угловыми проточками $7 \times 0,35$ мм, небольшого увеличения шага упаковки твэлов до $s/d=1,19$, а также уменьшения расстояния от чехла до твэлов до $0,5$ мм позволило снизить неравномерности температур оболочек твэлов в ТВС до 28 °С и существенно снизить максимальные температуры оболочек твэлов (до 550 °С). Полученный вариант ТВС с плотной упаковкой твэлов позволяет улучшить характеристики теплотехнической надежности.

3) Проведенные исследования чехловой ТВС с широкой решеткой и дистанционированием проволочной навивкой типа «ребро-по-ребру» ($s/d=1,34$; $d=6,1$ мм) показали:

– Перепад давления на ТВС не превышает 270 кПа;

– Уровень максимальных температур оболочек твэлов в ТВС не превышает 550 °С;

– Дистанционирование проволочными навивками типа «ребро-по-ребру» обеспечивает эффективное перемешивание теплоносителя в кассете; при этом максимальные неравномерности температур на оболочках твэлов не превышают 30 °С.

4) Проведенные исследования ТВС с большим относительным шагом ($s/d=1,4$) расположения тонких твэлов ($d=6,1$ мм) с дистанционированием решетками показали:

– Перепад давления на активной зоне с чехловыми ТВС не превышает 300 кПа;

– Дистанционирующие решетки имеют достаточно большое гидросопротивление за счет существенного локального затеснения потока. Форма входной кромки существенно влияет на

КГС решетки (при входном угле 30° КГС снижается на примерно 40 %, а при закруглении кромок на 40,5 %);

– В усовершенствованном варианте чехловой ТВС уровень максимальных температур оболочек твэлов не превышает 565°C , неравномерности температур оболочек твэл в центре ТВС составляют менее 5°C , на периферии ТВС не превышают 8°C ;

– При отсутствии чехла в ТВС уровень максимальных температур оболочек твэлов составил 560°C . Максимальные азимутальные неравномерности температур оболочек реализовались на периферийных твэлах кассеты и достигали 28°C . Таким образом, расчеты показали, что увеличение шага топливной решетки до $s/d=1,4$ позволяют использовать бесчехловую конструкцию ТВС активной зоны быстрого реактора, несмотря на высокую объемную энергонапряженность в металлическом топливе твэлов. Этот результат весьма важен с точки зрения улучшения нейтронного баланса в реакторе и повышения накопления вторичного ядерного топлива в реакторе. Кроме того, снижение доли конструкционных материалов в активной зоне за счет снятия чехлов ТВС способствует уменьшению положительного пустотного эффекта реактивности.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Публикации в сборниках тезисов и докладов:

1. Алексеев П.Н., Андрианова Е.А., Бландинский В.Ю., Лубина А.С., Седов А.А., Степанов А.С., Субботин С.А., Фомиченко П.А., Фролов А.А. Быстрый реактор с высокой избыточной наработкой делящихся нуклидов в двухкомпонентной системе ЯЭ с U-Pu и Th-U-Pu ЯТЦ. В книге: БЕЗОПАСНОСТЬ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ, РЕСУРС сборник тезисов докладов 13-й Международной научно-практической конференции по атомной энергетике. Севастопольский государственный университет; АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций»; Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН; Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»; Ядерное общество России. 2017. С. 54-56.

2. Лубина А.С. Особенности гидродинамики и теплообмена в ТВС активной зоны в быстром реакторе с высоким темпом наработки вторичного топлива. В сборнике: Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика - 2018) Сборник докладов научно-технической конференции. 2018. С. 104-112.

3. Бландинский В.Ю., Лубина А.С., Седов А.А. Разработка концепции перспективного быстрого реактора большой мощности с металлическим топливом для решения задач ресурсообеспеченности развивающейся перспективной атомной энергетике. В книге: Безопасность, эффективность, ресурс Сборник тезисов докладов 15-й Международной научно-практической конференции по атомной энергетике. 2019. С. 36-38.

4. Лубина А.С. Седов А.А. Верификация CFD-моделей ANSYS FLUENT для однофазных течений в каналах простой формы. Сборник трудов 10-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (16-19 мая 2017 г., Подольск, АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»). Научно-техническое электронное издание.

5. Андрианова Е.А., Бландинский В.Ю., Котов Я.А., Лубина А.С., Степанов А.С., Фролов А.А. Разработка ключевых технологических решений в концепции быстрого реактора для эффективного расширения ресурсной базы в системе развивающейся ядерной энергетике.

Инновации в атомной энергетике: сб. тезисов докладов конференции молодых специалистов (1-3 октября 2019 г., Москва). – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2019. –122 с.

6. Лубина А.С. Особенности теплогидравлики активных зон быстрых натриевых реакторов-наработчиков малой и большой мощности для системы замкнутого топливного цикла. В сборнике тезисов докладов: Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика - 2020) Сборник тезисов докладов научно-технической конференции. 2020. С. 73-74.

7. Бландинский В.Ю., Лубина А.С. Исследование особенностей теплогидравлики в ТВС быстрого натриевого реактора с широким относительным шагом решетки. В сборнике тезисов докладов: Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика - 2022) Сборник тезисов докладов научно-технической конференции. 2022. С. 64-66.

Публикации в научных журналах:

8. Лубина А.С., Субботин А.С., Седов А.А., Фролов А.А. Анализ особенностей гидродинамики и теплообмена в ТВС перспективного натриевого реактора с высоким коэффициентом воспроизводства в уран-плутониевом топливном цикле. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2015. № 1. С. 37-49.

9. Лубина А.С. Особенности теплогидравлики активных зон быстрых натриевых реакторов – наработчиков малой и большой мощности для системы замкнутого топливного цикла. Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, №4, 2021. С. 162-171.

10. Бландинский В.Ю., Лубина А.С. Исследование особенностей теплогидравлики в ТВС быстрого натриевого реактора с широким относительным шагом решетки. Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, №2, 2024. С. 293-307.

11. Prospects of subcritical molten salt reactor for minor actinides incineration in closed fuel cycle. Alekseev P.N., Balanin A.L., Blandinsky V. Yu., Dudnikov A.A., Fomichenko P.A., Nevinitza V.A., Frolov A.A., Lubina A.S., Sedov A.A., Subbotin A.S. Kerntechnik. 2015. Т. 80. № 4. С. 389-393.

12. Lubina A.S. et al. Analysis of features of hydrodynamics and heat transfer in the fuel assembly of prospective sodium reactor with a high rate of reproduction in the uranium-plutonium fuel cycle. Phys. At. Nucl. 2016. Vol. 79, № 8. P. 1315–1324.