

На правах рукописи

ДУНАЙЦЕВ АЛЕКСЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА
АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА С СТЕРЖНЕВЫМИ
ТВЭЛАМИ ДИСТАНЦИОНИРОВАННЫМИ НАВИВКОЙ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» («МГТУ им Н.Э. Баумана»).

Научный руководитель: **Солонин Владимир Иванович**

Доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой «Ядерные реакторы и установки», ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н. Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Сорокин Александр Павлович**

доктор технических наук, главный научный сотрудник отделения ядерной энергетики, Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского

Харитонов Владимир Степанович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заместитель заведующего кафедрой «Теплофизики», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Ведущая организация: **Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»**

Защита состоится «11» декабря 2019 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.08 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д. 1, ф-т «Энергомашиностроение», ауд. 202э.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <http://www.bmstu.ru> и в библиотеке МГТУ им Н.Э. Бауман.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба присылать по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5 стр. 1, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.08.

Автореферат разослан « » 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, кандидат
технических наук, доцент



Егоров Кирилл
Сергеевич

Общая характеристика работы

Тема диссертации вытекает из задач, решаемых при проектировании атомных станций малой мощности, которые в первую очередь предназначены для электро- и теплоснабжения на территориях, где доставка углеводородного топлива связана с большими затратами, что делает их потенциально конкурентно способными.

Большой интерес представляют установки, не требующие поддержания фазового состояния теплоносителя, чем выгодно отличаются атомные станции малой мощности на основе газовых реакторов с уровнем температуры теплоносителя до 1500 К.

Проектируемые атомные станции малой мощности должны обладать такими качествами как низкая металлоемкость, возможность заводского изготовления и длительная кампания активной зоны (не менее 10 лет). Из чего следует что проектируемый газовый реактор, должен быть компактным и работать при быстром спектре нейтронов в активной зоне. Проектные проработки показывают, что для уровня мощности в единицы МВт активная зона такого реактора представляет собой монозону (единый пучок топливных стержней) с относительным шагом дистанционирования стержней $\sim 1,1$.

Отмеченное определяет актуальность разработки современной модели теплогидравлического расчета активной зоны высокотемпературного газового реактора с активной зоной, состоящей из пучка плотноупакованных стержней, базирующейся на трехмерном описании течения в объекте исследования и результатах экспериментального определения характеристик турбулентного потока в макете пучка стержней.

Цель работы. Создание на основе существующего программного CFD пакета для численного моделирования гидродинамики и теплообмена расчетной модели течения и теплообмена газового теплоносителя в плотноупакованном пучке стержней дистанционированных навивкой, ее валидация на физической модели пучка стержней обоснованной геометрии, выполнение расчета температур в варианте активной зоны установленной мощности.

Для достижения цели исследования решались следующие задачи:

1. Выделение необходимого и достаточного фрагмента активной зоны, в котором можно выполнить корректное численное и физическое моделирование гидродинамики и тепло-массообмена в пучке стержней.
2. Выбор геометрических, кинематических, тепло-массообменных параметров активной зоны реактора, реализуемых в экспериментальной модели; Определение объема экспериментальных данных, получаемых в процессе физического моделирования.
3. Разработка программы экспериментов на модели и их проведение.

4. Выбор CFD кода и проведение численных экспериментов в том числе с моделированием геометрии пучка, используемого в физическом эксперименте при граничных условиях, соответствующих условиям эксперимента.

5. Разработка методик определения гидравлических и структурных характеристик потока в пучке стержней, получение коэффициентов межканального обмена массой и теплотой из распределений локальных характеристик потока, полученных при численном моделировании.

6. Валидация CFD кода на экспериментальных данных, анализ соответствия результатов расчета и эксперимента.

7. Формулирование рекомендаций для CFD моделирования гидродинамики и тепло-массообмена в пучках ТВЭЛов активных зон газоохлаждаемых высокотемпературных реакторов, содержащих вытеснители и каналы для органов управления.

Научная новизна работы состоит в:

1. Получении новых экспериментальных данных о характеристиках осредненного течения и тепло-массообмена газовых теплоносителей в пучках стержней оребренных четырехзаходной проволоочной навивкой с относительным шагом дистанционирования $x=1,096$ и шагом навивки $T/d=28,6$.

2. Исследовании влияния формы поперечного сечения дистанционирующего ребра стержней на гидравлическое сопротивление и процессы межячеистого массообмена.

3. Получении соотношений для определения гидравлических потерь в треугольной плотноупакованной решетке стержней.

4. Получении распределений локальных коэффициентов межячеистого массообмена в пучке плотноупакованных оребренных стержней.

Практическая значимость работы состоит в:

1. Применении полученных экспериментальных данных для определения коэффициентов массопереноса, используемых в ячеистых кодах для расчетов активных зон реакторов.

2. Использование в расчетах программы построения преимущественно гексагональной сетки для пучка стержней с винтовыми ребрами, обеспечивающей экономию вычислительных ресурсов.

3. Формулировании рекомендаций по моделированию плотноупакованных пучков стержней с навивкой для обоснования теплотехнической надежности активных зон высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов с учетом тепломассопереноса в теплоносителе, элементах конструкции и лучистого теплообмена.

4. Разработке методики математического моделирования течения и теплообмена в пучках стержней с геометрией, используемой в проектных разработках активных зон высокотемпературных газовых реакторов.

5. Использовании преимущественно гексагональной сетки, позволяющей учитывать деформации осей стержней с винтовыми ребрами, для описания течения в активной зоне.

Достоверность результатов определяется:

1. Использованием апробированных методик моделирования и проведения эксперимента, положительно зарекомендовавших себя в исследованиях теплогидравлических процессов в макетах и натурных ТВС.

2. Качеством моделей экспериментальных участков, систем измерения, анализом неопределенности экспериментальных данных.

3. Обоснованием соответствия полученных результатов численного и физического эксперимента.

4. Анализом влияния геометрических отклонений трактов теплоносителя в пучках стержней от номинала на характеристики течения и массообмена.

Положения, выносимые на защиту:

1. Параметры и конструктивные решения модели пучка стержней в составе экспериментального стенда.

2. Результаты численного моделирования регулярного пучка стержней с ребрами различных поперечных сечений и использованием периодических граничных условий.

3. Результаты экспериментальных исследований характеристик течения (коэффициентов трения, распределения средних продольных составляющих скорости, подогревов потока в экспериментах с теплообменом) в пучке стержней с винтовыми ребрами и малым относительным шагом, в изотермических условиях, в условиях слабой неизотермичности, создаваемой тепловым следом или электронагревом части стержней.

4. Результаты численного моделирования с использованием CFD кода гидродинамики и тепло-массообмена в пучке стержней с винтовыми ребрами в случае изотермичного течения, слабонеизотермического течения в тепловом следе и при локальном нагреве части стержней. Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик, анализ случайных и систематических отклонений и причин их возникновения.

5. Подход к построению расчетной сетки для пучка с винтовыми ребрами с использованием преимущественно гексагональных элементов, анализ производительности расчетов и пути ее повышения.

6. Влияние отклонения положения стержней от номинала на гидродинамику и теплообмен в пучках стержней.

7. Рекомендации использования результатов экспериментов и численных моделей при проведении НИОКР по проектированию активных зон ядерных систем.

Апробация работы:

1. Доклад «Теплообмен в потоке гелий-ксеноновой смеси внутри канала треугольного поперечного сечения» Шестая российская национальная конференция по теплообмену РНКТ-6. (Москва, 2014)

2. Доклады на научных семинарах в МГТУ им. Н. Э. Баумана о результатах диссертационного исследования. (Москва, 2015, 2016 и 2017).

3. Участие в конкурсе «Инновационный лидер атомной отрасли-2017» с докладом «АСММ электрической мощностью до 1 МВт с газоохлаждаемым реактором». (Москва, 2017)

4. Участие в конкурсе молодых ученых 2017г АО «НИКИЭТ» с работой «Концепция гибридной АСММ электрической мощностью до 1 МВт с газоохлаждаемым реактором». (Москва, 2017)

5. Доклад на семинаре в ИБРАЭ РАН с докладом «Верификация кода для моделирования процессов образования, переноса и осаждения примесей в контурах со свинцовым теплоносителем». (Москва, 2018)

Личный вклад автора.

Автором в составе коллектива сотрудников кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н. Э. Баумана проведена разработка модельного пучка, программы и методики проведения экспериментов. Автор участвовал в проведении экспериментов, в анализе и обработке результатов. Автором самостоятельно выполнено построение расчетной сетки для пучков стержней с заданными геометрическими характеристиками. Проведен комплекс работ по численному моделированию на базе кода, Ansys CFX течений и теплопереноса в пучках стержней, дистанционированных проволоочной навивкой. Проведено обобщение и анализ результатов. Подготовлены публикации по результатам работы.

Структура и объем работы.

Текст диссертации состоит из введения и 6 глав, общего заключения и списка используемой литературы. Работа изложена на 135 страницах, включая

90 рисунков, 21 таблицу, список используемых источников в количестве 70 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведена общая характеристика технологии компактных газовых высокотемпературных реакторов, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

В **первой главе** описывается объект моделирования – активная зона компактного высокотемпературного газового реактора со стержневыми твэлами. Выполненный объем научно-исследовательских работ показывает возможность реализации активной зоны высокотемпературного газового реактора в виде плотноупакованного пучка стержней с числом стержней 500..800 шт. Относительный шаг топливных элементов в таком пучке $\sim 1,1$. Предполагается безкассетное исполнение конструкции, т.е. в виде моносорби. Течение теплоносителя в такой активной зоне характеризуется числами Рейнольдса $\sim 3 \cdot 10^4$. Твэлы дистанционированы однонаправленной четырехзаходной проволоочной навивкой, с типом дистанционирования «ребро по ребру».

Во **второй главе** приводится информация о существующих методиках расчетов активных зон ядерных реакторов и информация об имеющихся результатах исследований гидродинамики в пучках оребренных стержней.

На данный момент для расчетов активных зон ядерных реакторов широкое распространение получили поканальные методики. В основе данных методик лежит система балансных уравнений сохранения массы импульса и энергии. Для замыкания данной системы используются полуэмпирические зависимости, требующие уточнения для каждого конструктивного исполнения активной зоны. Результатом расчетов по данным методикам являются нелокальные распределения температур осредненных по ячейкам.

В **третьей главе** приводится описание экспериментального стенда, модельного участка, программы экспериментов и методика измерений.

Для проведения физического моделирования был выбран фрагмент активной зоны состоящий из 37 стержней. Диаметр стержней макета равнялся 25 мм, высота каждого стержня 1390 мм, шаг навивки 715 мм, шаг стержней 27,2 мм. Пучок располагался в шестигранном чехле с размером под ключ ~ 172 мм. Итоговый масштаб моделирования 1,7:1.

Модельный участок устанавливался на входном устройстве, которое спроектировано таким образом, чтобы обеспечить возможность подвода

разнотемпературных потоков теплоносителя к центральной и периферийной части пучка стержней.

В составе экспериментального стенда (Рис. 1) имеется участок разделения трубопровода на два тракта, один из которых имеет в своем составе электронагреватель. Теплоноситель из необогреваемого тракта стенда подается в периферийный кольцевой тракт подводящего устройства. Оба тракта имеют в своем составе регулирующую арматуру и расходомеры. Для исключения пульсаций давления потока в стенде между воздухоподувкой и разделительным тройником установлен ресивер.

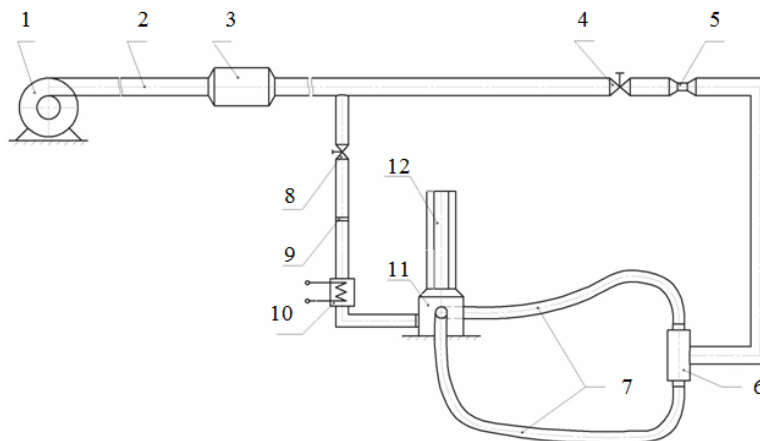


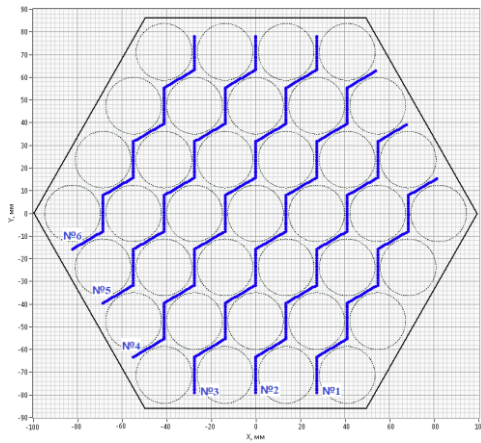
Рис. 1. Схема и состав оборудования аэродинамического стенда

1 – воздухоподувка; 2 – напорный трубопровод; 3 – бак-ресивер; 4 – шибер; 5 – сопло Вентури; 6 – раздаточное устройство; 7 – гибкие воздуховоды; 8 – вентиль; 9 – расходомерная шайба; 10 – электронагреватель; 11 – входное устройство; 12 – рабочий участок с моделью ТВС

Для исследования поперечного переноса в регулярных ячейках пучка (центральная зона) выбран метод теплового следа. В периферийных ячейках поперечный перенос исследовался методом зонного нагрева, при этом нагреватели располагались в четырех стержнях, расположенных вдоль одной из граней шестигранного кожуха, измерения так же проводились в выходном сечении.

Программа экспериментов так же включала проведение измерений в давления по высоте пучка, а так же распределений скорости потока.

В силу высокой плотности пучка, классические измерения щупами датчиков температуры и давления через сквозные «просветы» между рядами стержней, были невозможны. Измерения проводились в выходном сечении вдоль траекторий (маршрутов), показанных на Рис. 2.



№1..№6 – номер маршрута

Рис. 2. Измерительные маршруты

В четвертой главе приводятся результаты апробации численной модели исследования течения. В настоящей работе использован современный, коммерческий код Ansys CFX.

Математическая модель описывается системой, состоящей из балансных уравнений

сохранения массы, количества движения и энергии соответственно:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) + S_M, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho h_{tot}) - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j h_{tot}) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j h} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i ((\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}))) + S_E, \end{aligned} \quad (3)$$

где: U_i – осредненная по времени составляющая скорости;

τ_{ij} -тензор сдвиговых напряжений;

$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U_i^2 + \frac{1}{2} \overline{u_i^2}$ – полная энтальпия;

Решение уравнений проводилось RANS методом, для замыкания данной системы выбрана k-ε модель турбулентности.

При моделировании течения в регулярной решетке бесконечного пучка стержней использована геометрическая модель, описывающая область течения вблизи одного стержня, в которой применены периодические интерфейсы. Диаметр моделируемого стержня 25 мм, шаг стержней 27,4 мм, шаг навивки 715 мм. Течение воздуха моделировалось при числах Рейнольдса $3,75 \pm 0,15 \cdot 10^4$.

В результате моделирования были получены распределения коэффициентов обмена массой для разных форм сечения ребер, которые

являются периодической функцией (Рис. 3) продольной координаты течения с периодом $T/4$ для четырехзаходного оребрения стержней. В зоне установившегося течения влияние формы ребра на переток теплоносителя между ячейками находится в пределах 9 %.

Анализ картины течения показывает, что с подветренной стороны ребра наблюдается минимум поперечной составляющей скорости, с наветренной стороны наоборот – максимум, направленный в сторону завивки ребер. При движении вдоль потока в сечениях, где ребра сближаются в зазоре между стержнями, при этом происходит затеснение зазора и переток теплоносителя в нем снижается практически до нуля, а в ячейке наблюдается вихревая структура, в которой теплоноситель от поверхности одного стержня перетекает к поверхности другого (рассматриваются стержни, формирующие зазор). При расхождении ребер в зазоре наблюдается максимум перетока теплоносителя.

Отличия полученных из моделирования средних значений коэффициентов обмена массой от полученных из известных соотношений достигают 64 % в большую сторону.

В работе показано, что конвективный перенос теплоты превышает турбулентный в разы.

С целью снижения требований к расчетным ресурсам был разработан алгоритм построения преимущественно гексагональной сетки для данной модели.

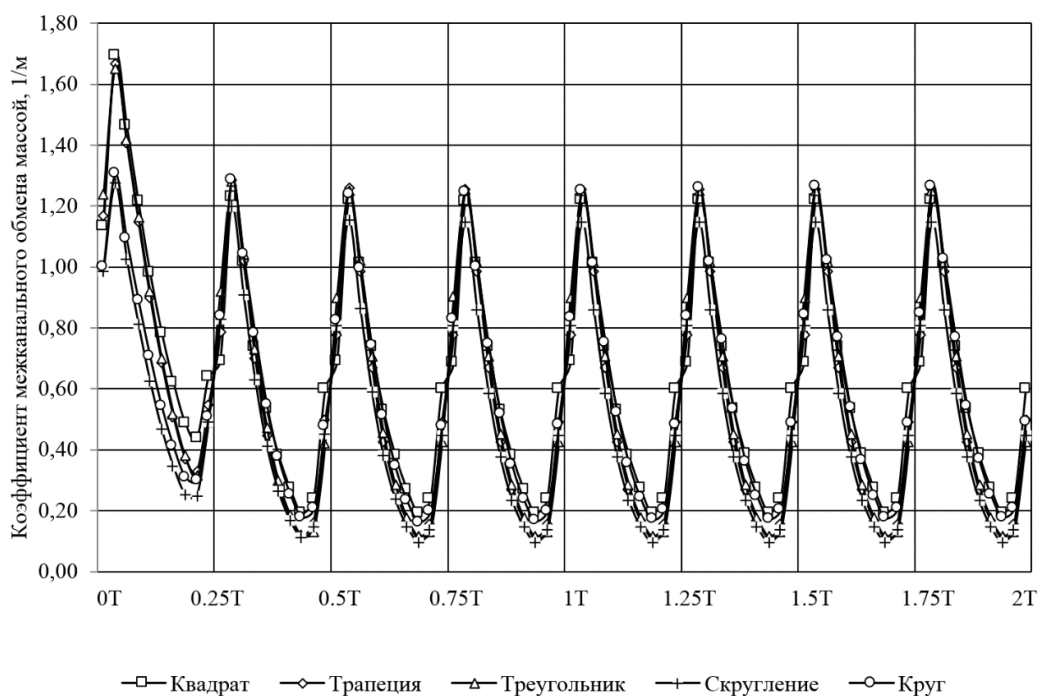


Рис. 3. Распределения коэффициента межканального обмена массой по длине канала для различных форм поперечного сечения ребра.

Для анализа сеточной сходимости на данной сетке было построено 3 сетки, сеточная сходимость оценивалась по стабилизации коэффициента гидравлического сопротивления (Таблица 1).

Таблица 1

Параметры сеток

№ Варианта	Число элементов	Перепад давления, Па	КГС	δКГС, %
1	44784	1861,72	0,025882	-
2	238176	1827,43	0,02511	3,07
3	1274416	1855,88	0,025512	1,58

В **пятой главе** приводятся результаты валидации расчетных методик на результатах эксперимента. На Рис. 4 представлены фрагменты расчетных сеток, построенных для номинальной (геометрия 1) и приближенной к реальной (геометрия 2) геометрии.

Результаты моделирования условий проведения экспериментов по измерению статического давления в пучке по его высоте, в сравнении с результатами измерения представлены на Рис. 5.

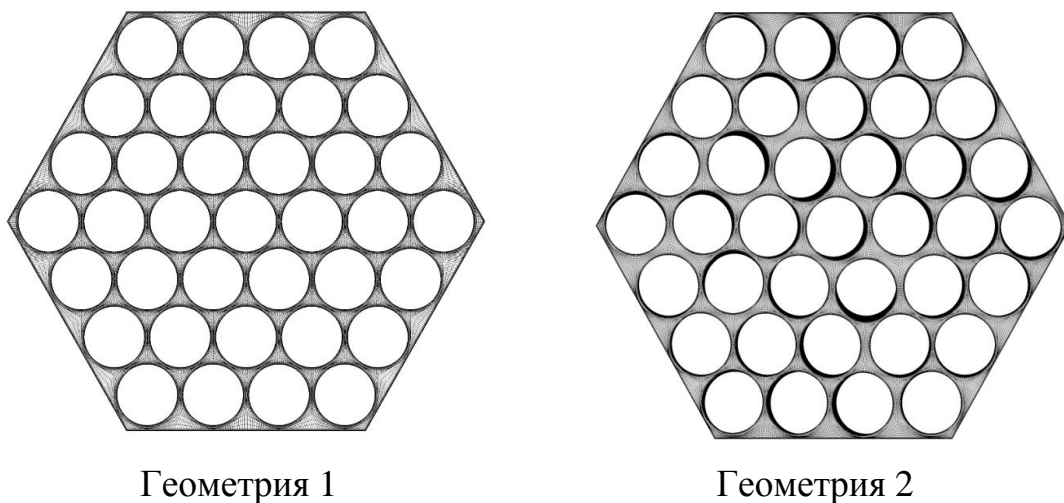


Рис. 4. Фрагменты расчетных сеток в области выходного сечения пучка

Экспериментальные данные в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = (1,4 - 3,5) \cdot 10^4$ с предельным отклонением 13,0 %, которое определяется предельным отклонением результатов экспериментов (12,9 %) и погрешностью аппроксимации (1,7 %), могут быть обобщены соотношением:

$$\zeta = 0,276 \cdot Re^{-0,25}, \quad (4)$$

Расчетные градиенты статического давления для геометрии 2 максимально превышают экспериментальные на 19 % для геометрии 1 на 16 %. Средние отклонения составляют 12 % и 8 % для геометрии 1 и 2 соответственно.

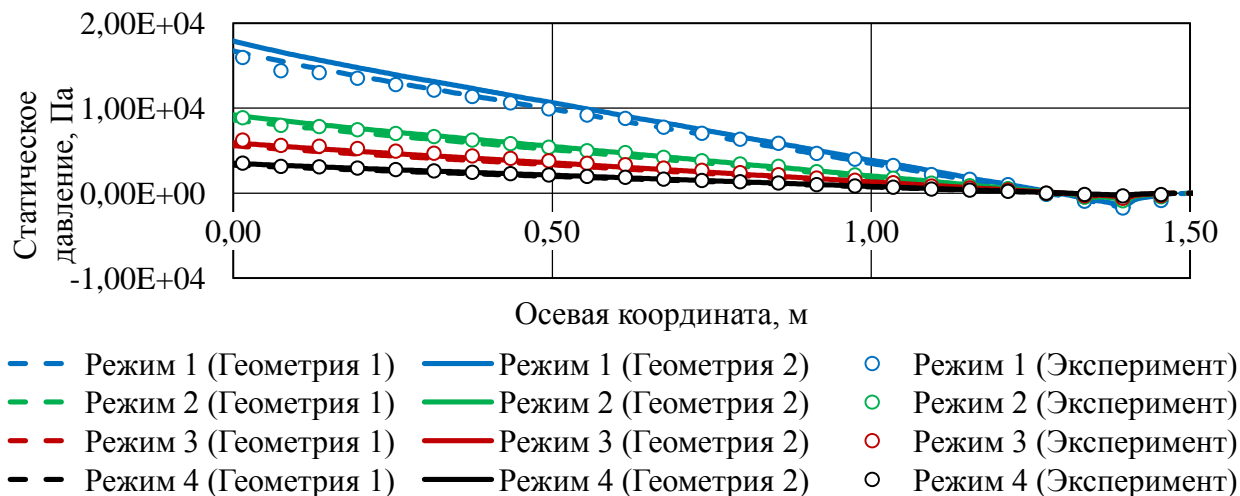


Рис. 5. Распределение статического давления по высоте пучка

На Рис. 6 приводятся результаты моделирования условий эксперимента по измерению скорости потока ($Re=2,38 \cdot 10^4$) в выходном сечении пучка в сравнении с экспериментальными данными.

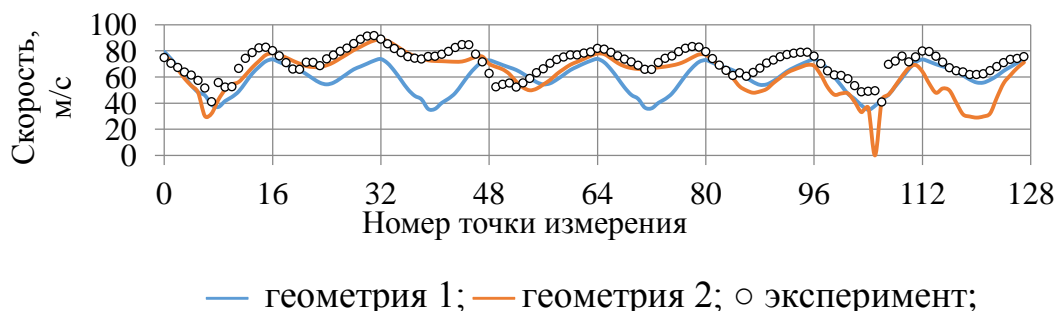


Рис. 6. Распределение скорости потока вдоль первого маршрута

Максимумы экспериментальных распределений скорости лежат в диапазоне значений 75..90 м/с. Максимумы распределений соответствуют крайним точкам прямолинейного участка траектории, которые при номинальной геометрии совпадают с центром регулярной ячейки пучка. Минимальные значения скоростей имеют больший разброс, и лежат в диапазоне 40..65 м/с и зафиксированы на середине прямолинейного участка, что соответствует области зазора между стержнями где сечение затеснено.

При моделировании экспериментов с неизотермичностью потока показано, что коэффициент поперечного переноса тепла за счет теплопроводности стержней ($\sim 0,52 \text{ м}^{-1}$) соизмерим с коэффициентом конвективного обмена ($\sim 0,4 \text{ м}^{-1}$).

При численном моделировании условий экспериментов с созданием тепловой метки на входе в пучок, в центральной зоне перед входной решеткой пучка, подводящим устройством формировалась область, где температура потока была выше на 40 °С чем в периферийной зоне. Анализ результатов моделирования и показал, что тепловая метка «размывается» на все выходное сечение (прирост температуры ~1 °С в периферийных ячейках), наибольшее изменение температуры в ячейках наблюдается в области двух центральных рядов стержней. На Рис. 7 представлены результаты моделирования в сравнении с результатами измерений в эксперименте, на маршрутах 2..5 где влияние тепловой метки наиболее выражено.

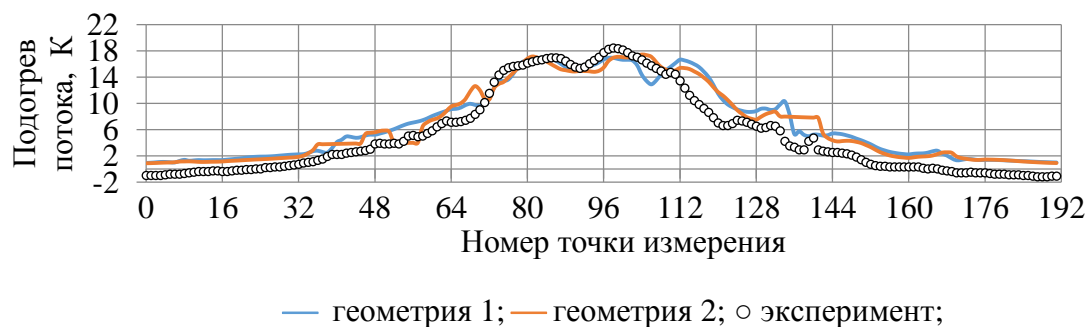


Рис. 7. Распределение подогрева потока вдоль третьего маршрута

Сравнение экспериментальных и расчетных распределений температурной разности (подогревов потока) вдоль маршрутов 1..6 показывает, что максимальные температуры в области оси подогреваемой струи составляют 13..18 К (маршрут 3) и 10..16 К (маршрут 4).

При моделировании условий эксперимента с электронагреваемыми стержнями, в четырех периферийных стержнях задавалось энерговыделение (~400 Вт). Высота нагреваемого участка стержней составила 900 мм, необогреваемая часть стержня составляла 247 мм и располагалась сразу за входной решеткой модели.

Электронагрев стержней приводит к подогреву потока в окрестности стержней на 13..27 К. На Рис. 8 показано сравнение результатов численного и физического моделирования на маршрутах где подогрев потока наиболее выражен (маршруты 3..6). Максимальные отклонения, зафиксированные на маршрутах 3, 4, 6 составляют 3..5 К.

В **шестой главе** приводится масштабирование расчетной методики на натурный фрагмент активной зоны. На Рис. 9,а Показана расчетная геометрия, представляющая собой сектор монозоны соответствующий углу $\pi/6$. Теплоносителем является гелий-ксеноновая смесь с расходом, соответствующим числу Рейнольдса $3,5 \cdot 10^4$.

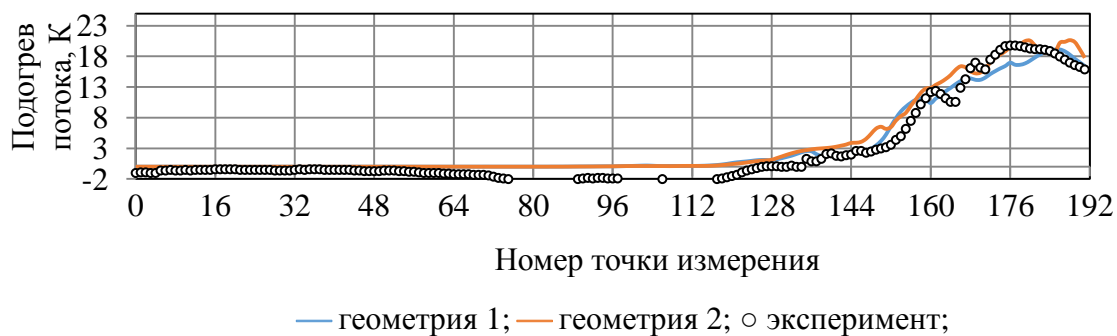


Рис. 8. Распределение подогрева потока вдоль четвертого маршрута

Объемное энерговыделение топливе составляло $\sim 1 \cdot 10^7$ Вт/м³. На периферии моделируемого фрагмента активной зоны и в каналах для стержней регулирования задавались стоки тепла. Неравномерность энерговыделения задавалась с помощью коэффициентов радиальной и высотной неравномерности и соответственно.

На Рис. 9, б приведено распределение температуры в поперечном сечении модели соответствующем верхнему срезу топливного столба.

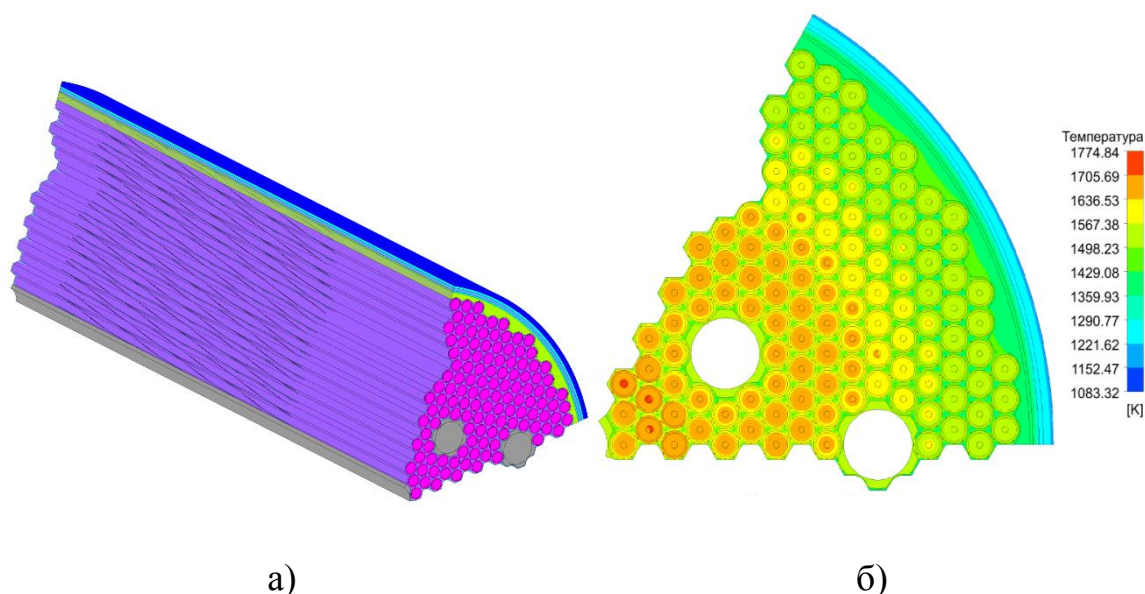


Рис. 9. Модельный фрагмент активной зоны (а) и поле температуры в сечении, соответствующем верхнему срезу топливного столба (б)

На Рис. 10 показано расчетное распределение средней температуры теплоносителя по высоте моделируемого фрагмента.

Неравномерность температуры теплоносителя на выходе из обогреваемого участка твэлов находится в диапазоне 1496 ± 50 К. Падение давления на длине всей активной зоны не превышает 1,5 %.

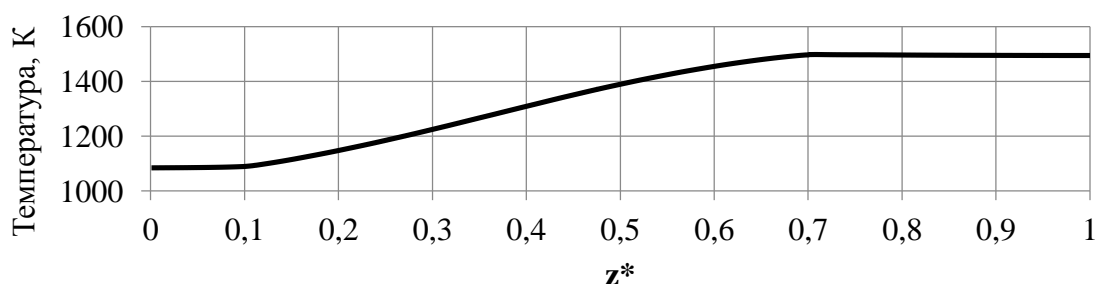


Рис. 10. Распределение температуры теплоносителя по высоте активной зоны

В области регулярных ячеек, тепловой поток излучения не превышает 4 % от общего теплового потока от ТВЭЛОВ, в свою очередь в области вытеснителей, где температуры соседних поверхностей имеют значительную температурную разность, тепловой поток за счет лучистого теплообмена превышает 25 % от общего теплового потока на поверхности ТВЭЛА.

Общие выводы к работе

1. Разработана методика расчета теплогидравлических процессов и температур конструкционных материалов активных зон газоохлаждаемых реакторов для атомных станций малой мощности, использующих плотные упаковки стержневых ТВЭЛОВ, дистанционированных винтовым оребрением с геометрией «ребро по ребру», охлаждаемых высокотемпературным газовым теплоносителем (диапазон значений температур 1300..1500 К) с низким числом Прандтля ($\sim 0,2$), базирующаяся на результатах экспериментального исследования и численных расчетах с использованием коммерческого CFD кода Ansys CFX и двухпараметрической модели турбулентности.

2. Показано, что основные особенности гидродинамики и массопереноса в активных зонах с плотными пучками стержней, дистанционированных винтовыми ребрами, можно получить на 37 стержневой модели, количество регулярных и периферийных (в окрестности шестигранного пучка модели) ячеек для теплоносителя в которой дает возможность исследовать особенности течения и переноса теплоты в них. Выбран геометрический масштаб модели (1,7:1) и рабочая среда воздух. Разработаны методики измерения гидравлического сопротивления пучка, скорости и температуры турбулентного потока в сечении выхода из пучка ТВЭЛОВ с применением автоматизированной системы фиксации, обработки и представления результатов экспериментов. Погрешности измерений давления, скорости и температуры составляют 1 %, 5 %, $\pm 0,5$ К соответственно.

3. Выполнен анализ геометрических отклонений трактов для теплоносителя изготовленной 37 стержневой модели от номинальных (диаметр стержней в модели составил 25 мм, шаг – 27,4 мм, шаг навивки – 715 мм,

высота пучка – 1390 мм) обусловленных различием в шагах четырехзаходной навивки дистанционирующих ребер (среднеквадратическое отклонение шагов навивки от номинала составило 24,8 мм), на основе которого создано две сеточных модели для верификации расчетных методик на результатах экспериментов: сеточная модель с номинальной геометрией трактов (модель 1) и сеточная модель с расположением осей стержней, соответствующей таковой для модели, но не учитывающая различия в шагах навивки, названная приближением к реальной геометрии (модель 2).

4. Для регулярных ячеек стержней с четырехзаходной навивкой выполнено численное моделирование течения, получены распределения поперечных скоростей в форме вторичных токов, инициированных ребрами, коэффициенты обмена массой между ячейками, гидравлическое сопротивление для четырех форм поперечного сечения ребер. Показано что форма ребра умеренно слабо влияет на исследованные характеристики течения (различия в пределах 9 %).

5. Результаты валидации расчетной методики на данных экспериментов показали что:

- в диапазоне чисел Рейнольдса $(1,4..3,46) \cdot 10^4$ гидравлические потери в модели описываются зависимостью $\zeta = 0,276 \cdot \text{Re}^{-0,25}$ (погрешность аппроксимации 1,7 %). Результаты моделирования превышают результаты измерения давления максимально на 19 % при числе Рейнольдса $3,46 \cdot 10^4$. Длина участка стабилизации в пучке стержней составляет не более 0,2 шага навивки;

- при числах Рейнольдса близких к натурному ($3 \cdot 10^4$) выполнено сравнение результатов экспериментов и расчетов по локальным величинам скорости и температур в выходном сечении. Показано что распределение расчетных и экспериментальных значений скорости турбулентного потока различаются в пределах 15 % в области ячеек и увеличиваются до значений 61 % в области зазоров между стержнями. Учет искажения геометрии области течения в расчете улучшает соответствие расчетных и экспериментальных данных;

- распределение температуры в выходном сечении модели в расчете и эксперименте с внесением в поток тепловой метки (подогреве потока) на входе в пучек стержней показывает важную роль конвективного поперечного переноса по сравнению с турбулентной диффузией. Влияние теплопроводности твердых тел в поперечном переносе соизмеримо с влиянием конвективного переноса. Соответствие температурных распределений в расчете и эксперименте в области ядра потока составляет 3..17 %, в периферийных

ячейках до 50 % (при разности температур 2..4 К) при начальной температурной неоднородности 40 К.

– распределение температуры в выходном сечении модели в расчете и эксперименте с подогревом потока четырьмя стержнями, расположенными у чехла модели подтверждает роль направленного конвективного переноса вдоль чехла, индуцируемого однонаправленной ориентацией дистанционирующих ребер, на формирование температурного распределения в окрестности стержней. Соответствие температурных распределений в расчете и эксперименте составляет 3..5 К.

В целом погрешность численного моделирования экспериментальных данных оценивается величиной 15..62 %. Максимальные погрешности в измерениях связаны с погрешностями позиционирования зонда в модели. Максимальные погрешности в расчете связаны с неучетом реальной геометрии дистанционирующих проволок стержней.

6. Выполнен численный анализ влияния теплопроводности стержней модели на поперечный теплоперенос, влияние лучистого теплообмена на поперечный теплообмен и температуры конструкции. Сформированы рекомендации по учету этих процессов в теплогидравлических расчетах высокотемпературных активных зон.

7. Для дистанционирующих ребер с квадратной формой поперечного сечения ребра разработан алгоритм построения преимущественно гексагональной сетки для пучков стержней, который программно реализован на языке программирования java и позволяет по геометрическим параметрам модели, таким как диаметр и шаг стержней, шаг проволоочной навивки и высота стержня строить сетки для пучков различной размерности. Показана сеточная сходимость результатов.

Результаты проведенных работ опубликованы в следующих статьях:

1. Дунайцев А.А., Солонин В.И. Процессы массообмена в пучках оребренных стержней // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. №1. С. 115–134.

2. Дунайцев А.А., Солонин В.И. Структура осредненного течения и массообмена в плотном пучке оребренных тепловыделяющих элементов газоохлаждаемого реактора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. «Машиностроение». 2017. №2. С. 84–98.

3. Дунайцев А.А., Солонин В.И. Влияние вторичных течений на процессы тепло-массообмена в пучках оребренных стержней газоохлаждаемого реактора // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. №3. С. 65-77.

4. Автономные атомные энергоисточники для энергообеспечения объектов Министерства обороны РФ. А.А. Дунайцев [и др.]// Национальная оборона. 2017. №9. С. 42-43.

5. Гидродинамические характеристики трактов теплоносителя высокотемпературного газоохлаждаемого ядерного реактора А.А. Дунайцев [и др.] // Атомная энергия. 2018. Т. 124. № 5. С. 255-260.

6. Hydrodynamic Characteristics of Coolant Tracts in High-Temperature Gas-Cooled Nuclear Reactor A.A. Dunaitsev [et al.] // Atomic Energy. 2018. Vol. 124(5). P. 255–261.

7. Концепция передвижной электростанции малой мощности с быстрым газоохлаждаемым реактором А.А. Дунайцев [и др.] // Атомная энергия. 2019. Т. 126. № 1. С. 3-7.