

На правах рукописи

УДК 621.039.517

Фомичев Дмитрий Вадимович

**ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС
В ПУЧКАХ СТЕРЖНЕВЫХ
САМОДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХСЯ ТВЭЛОВ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ БРЕСТ-ОД-300**

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

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук



Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана» (ФГБОУ ВПО 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:

Исаев Сергей Александрович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО СПбГУ гражданской
авиации.

Шишов Андрей Владимирович,
главный специалист отдела трехмерного
теплогидравлического моделирования
АЭС, ОАО «ВНИИАЭС».

Ведущая организация:

АО Государственный научный центр
Российской Федерации – Физико-
энергетический институт им. А.И.
Лейпунского (АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»).

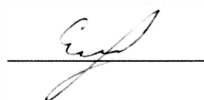
Защита диссертации состоится «17» февраля 2016 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.08 в Московском Государственном Техническом Университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская набережная, д. 1, ф-т «Энергомашиностроение», ауд. 202э.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э. Баумана и на интернет-сайте www.bmstu.ru.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.08.

Автореферат разослан « » 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат технических наук,
доцент

 К.С. Егоров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В рамках Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года» выполняются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию опытно-демонстрационного реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем и нитридным уран-плутониевым топливом БРЕСТ-ОД-300, призванного показать возможность эксплуатации энергоблока нового уровня безопасности в замкнутом ядерном топливном цикле.

Особенности активной зоны реакторной установки (РУ) БРЕСТ-ОД-300, заключающиеся в использовании оребренных твэлов различного диаметра в рабочих тепловыделяющих сборках (ТВС) (в зависимости от рассматриваемой подзоны активной зоны реактора), расположенных с постоянным шагом, и наличии значительной доли свинцового теплоносителя в объеме активной зоны, привели к реализации геометрии трактов течения теплоносителя, недостаточно исследованной ранее.

В настоящей диссертационной работе рассматривается «чехловой» вариант исполнения рабочих ТВС центральной (ЦЗ) и периферийной (ПЗ) подзон активной зоны РУ БРЕСТ-ОД-300. Дистанционирование твэлов осуществляется двухзаходным оребрением трапецевидного поперечного сечения по типу «ребро по ребру».

Среди имеющихся результатов гидродинамических исследований такого типа пучков твэлов недостаточно данных о влиянии числа и формы дистанционирующих ребер, фактически отсутствуют данные о влиянии условий подвода и отвода потока теплоносителя из пучков твэлов на гидродинамические и тепломассопереносные процессы.

Для получения данных о гидродинамических и тепломассопереносных процессах, необходимых для обоснования теплотехнической надежности как отдельной ТВС, так и всей активной зоны РУ в целом, требуется разработка новой расчетной гидродинамической модели, базирующейся на современном CFD-коде. Такая модель, при успешной валидации на экспериментальных данных, позволит получить полную информацию о гидравлических характеристиках пучка твэлов ТВС и об осредненных и турбулентных характеристиках течения теплоносителя по трактам как пучках твэлов, так и в областях перед и за пучком, в которых течение теплоносителя определяется конструктивными особенностями хвостовика и головки ТВС. На основании такой расчетной модели может быть получена детальная информация о механизмах тепломассопереноса в пучке оребренных твэлов.

Актуальность диссертационной работы определяется необходимостью разработки и обоснованием расчетной модели течения теплоносителя в пучках стержней, дистанционированных по типу «ребро по ребру», и получением новых экспериментальных данных о гидродинамике и тепломассопереносе в пучках твэлов, геометрически подобных принятым для «чехлового» варианта рабочих ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300.

Целью диссертационной работы является разработка на основе CFD-кода расчетных гидродинамических моделей малостержневых макетов рабочих ТВС ЦЗ и ПЗ РУ БРЕСТ-ОД-300 и их валидация с использованием новых экспериментальных данных о гидравлических и тепломассопереносных характеристиках пучков оребренных стержней, геометрически подобных штатным рабочим ТВС ЦЗ и ПЗ РУ БРЕСТ-ОД-300.

Объектами исследований являются малостержневые макеты рабочих ТВС ЦЗ и ПЗ РУ БРЕСТ-ОД-300.

Предметами исследований являются гидродинамические и тепломассопереносные процессы, протекающие в макетах ТВС ЦЗ и ПЗ РУ БРЕСТ-ОД-300.

Задачами исследований являются:

1. Анализ геометрических особенностей «чехловых» ТВС ЦЗ и ПЗ и гидродинамических режимов течения в них;

2. Обоснование условий моделирования, конструктивных решений макетов ТВС ЦЗ и ПЗ. Разработка программы экспериментальных исследований;

3. Проведение экспериментальных исследований распределений статического давления $p_{ст.}$, продольной компоненты скорости w_z и температуры T при течении изотермического и слабо неизотермического потока теплоносителя (воздуха) в макетах ТВС. Получение гидравлических и тепломассопереносных характеристик макетов ТВС. Определение зависимостей для расчетов коэффициентов гидравлического сопротивления λ пучков стержней макетов ТВС;

4. Обоснование выбора CFD-кода, базирующегося на нелокальных моделях турбулентности. Разработка расчетных моделей макетов ТВС: разработка трехмерных геометрических моделей, построение расчетных конечно-объемных сеток проточной области макетов ТВС, определение граничных условий, выбор моделей турбулентности;

5. Проведение численного моделирования течения как изотермического, так и слабо неизотермического потока теплоносителя, сформированного входным устройством моделей ТВС с применением различных моделей турбулентности. Обобщение полученных результатов и их сравнение с экспериментальными данными;

6. Определение по результатам численного моделирования коэффициентов межканального обмена массой $\mu_{i \rightarrow j}^{масс}$ и теплотой $\mu_{i \rightarrow j}^{тепл}$ в условиях течения слабо неизотермического потока теплоносителя, сформированного как методом «теплового следа», так и методом «зонного нагрева». Сравнение полученных значений коэффициентов обмена с известными эмпирическими зависимостями;

7. Формулирование рекомендаций по использованию экспериментальных и расчетных результатов моделирования для обоснования теплотехнической надежности полномасштабных 169-ти стержневых рабочих ТВС ЦЗ и ПЗ РУ БРЕСТ-ОД-300.

Научная новизна работы определяется:

1. Получением новых экспериментальных и расчетных данных о распределениях статического давления $p_{ст.}$, продольной компоненты скорости w_z

и температуры T потока теплоносителя в объемах пучков стержней макетов ТВС ЦЗ и ПЗ;

2. Обоснованием применения стандартной $k-\varepsilon$ (модель Спаларта-Лаундера) и SST $k-\omega$ (модель Ментора, 1993) моделей турбулентности для расчетов гидродинамических и тепломассопереносных характеристик пучков оребренных стержней, удовлетворительно согласующихся с экспериментальными данными;

3. Получением новых зависимостей для определения коэффициентов гидравлического сопротивления λ пучков оребренных стержней макетов ТВС;

4. Получением распределений коэффициентов межканального обмена массой $\mu_{i \rightarrow j}^{масс}$ и теплотой $\mu_{i \rightarrow j}^{тепл}$ по высоте пучков стержней с геометрическими характеристиками, подобными рабочим ТВС ЦЗ и ПЗ РУ БРЕСТ-ОД-300.

Практическая значимость работы заключается в:

1. Использовании экспериментальных и расчетных результатов моделирования гидравлических и тепломассопереносных характеристик макетов ТВС ЦЗ и ПЗ при верификации CFD-кодов: «ANSYS Fluent» (США), «ЛОГОС» (Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), и других;

2. Использовании расчетных высотных распределений коэффициентов межканального обмена массой $\mu_{i \rightarrow j}^{масс}$ и теплотой $\mu_{i \rightarrow j}^{тепл}$ при валидации расчетных моделей ТВС, базирующихся на одномерных кодах (таких как «ПУЧОК-ЖМТ»);

3. Рекомендациях по применению полученных экспериментальных и расчетных данных для обоснования теплотехнической надежности штатных ТВС ЦЗ и ПЗ РУ БРЕСТ-ОД-300.

Достоверность результатов. Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечивается качеством реализации макетов ТВС ЦЗ и ПЗ, и устройств подвода теплоносителя аэродинамического стенда кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ имени Н.Э. Баумана, а также использованием апробированной методики выполнения экспериментальной работы.

Результаты численного моделирования – достоверны, поскольку основаны на применении апробированных замыкающих нелокальных моделей турбулентности и методе численного решения, подтверждаются сеточной сходимостью полученных решений. Результаты удовлетворительно согласуются с полученными экспериментальными данными и существующими эмпирическими зависимостями.

Экспериментальные и расчетные данные согласуются с современными представлениями о структуре турбулентного течения и механизмах межканального обмена массой и теплотой в пучках оребренных стержней.

Основные положения, выносимые на защиту диссертационной работы:

1. Результаты анализа геометрических особенностей рабочих ТВС ЦЗ и ПЗ РУ БРЕСТ-ОД-300 и режимов течения теплоносителя в них;

2. Обоснование геометрического масштаба моделирования экспериментальных макетов ТВС ЦЗ и ПЗ. Конструкционные особенности экспериментального аэродинамического стенда и макетов ТВС. Программа экспериментальных исследований;

3. Результаты экспериментальных исследований гидродинамических характеристик пучков стержней макетов ТВС ЦЗ и ПЗ как при течении изотермического, так и слабо неизотермического потока теплоносителя (воздуха). Зависимость по определению коэффициентов гидравлического сопротивления λ пучков оребренных стержней макетов ТВС ЦЗ и ПЗ, ее область применимости и соответствие известным эмпирическим зависимостям;

4. Расчетные модели макетов ТВС ЦЗ и ПЗ, базирующиеся на CFD-коде, реализованные в двух исполнениях: с учетом подводящего участка и зоной истечения теплоносителя и без них;

5. Результаты численного моделирования течения изотермического и слабо неизотермического потоков теплоносителя (метод «теплового следа»). Анализ соответствия расчетных и экспериментальных данных. Рекомендации по применению замыкающих моделей турбулентности;

6. Результаты численного моделирования течения потока теплоносителя при нагреве центрального стержня постоянным тепловым потоком (метод «зонного нагрева»). Результаты определения коэффициентов межканального обмена массой $\mu_{i \rightarrow j}^{mass}$ и теплотой $\mu_{i \rightarrow j}^{heat}$ в пучках оребренных стержней макетов ТВС ЦЗ и ПЗ;

7. Рекомендации применения полученных экспериментальных и расчетных данных к описанию гидравлических и тепломассопереносных характеристик полномасштабных 169-ти твэльных рабочих ТВС ЦЗ и ПЗ РУ БРЕСТ-ОД-300.

Апробация работы. Основные положения, результаты и выводы работы были представлены на следующих научно-технических конференциях и семинарах: Научно-технический семинар «Использование пакетов программ “ЛОГОС” для решения задач атомной энергетики. Вопросы адаптации и верификации, ключевые направления развития» (Саров, 2013); Научно-технический семинар «Верификация ПК “ANSYS Fluent” по результатам теплогидравлических экспериментов на макетах ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300», (Москва, 2013); Международная конференция «ICNEST-2014: International Conference on Nuclear Energy Science and Technology» (Швейцария, Цюрих, 2014); Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» (Москва, 2014); Международная конференция «ICCFD-2014: International Conference on Computational Fluid Dynamics» (Великобритания, Лондон, 2014); Научно-технический семинар «Результаты экспериментального и расчетного определения гидродинамических и теплопереносных характеристик пучка стержней с дистанционированием “ребро по ребру”» (Москва, 2015); XVI Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН «Безопасность и риски в энергетике» (Москва, 2015); Международная конференция молодых ученых «5th International Youth Conference on Energy» (Италия, Пиза, 2015); Международная конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики» (Алушта, 2015); Международная конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Казань, 2015).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 6 статьях, в том числе в 2 статьях в научных изданиях, входящих в перечень рецензируемых изданий ВАК Минобрнауки России, общим объемом 2,0 п.л.

Личный вклад автора. Диссертационная работа выполнена на кафедре «Ядерные реакторы и установки» МГТУ имени Н. Э. Баумана. Постановка цели и задач исследования осуществлена совместно с научным руководителем автора и главным конструктором РУ БРЕСТ. Автором выполнена разработка технической документации экспериментальных макетов рабочих ТВС ЦЗ и ПЗ. Автор в составе научно-исследовательского коллектива кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ имени Н.Э. Баумана принял участие в проведении экспериментальных исследований: получении, обработке и анализе экспериментальных данных. Разработка геометрических и расчетных моделей макетов ТВС ЦЗ и ПЗ, выполнение задач численного моделирования течения теплоносителя, получение, обработка и анализ результатов моделирования выполнены автором самостоятельно с использованием программных и вычислительных ресурсов АО «НИКИЭТ» (Москва).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка используемой литературы. Работа изложена на 195 страницах, включая 88 рисунков, 20 таблиц и списка используемых источников литературы из 78 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности выполнения диссертационной работы, описание научной новизны и практической значимости результатов работы. Обосновывается достоверность полученных результатов. Кратко излагается личный вклад автора. Приводится перечень научно-технических конференций и семинаров, на которых были представлены основные результаты работы. Формулируются основные положения, выносимые на защиту диссертационной работы.

В первой главе приводится краткое описание технических характеристик РУ БРЕСТ-ОД-300, ее активной зоны и рабочих ТВС ЦЗ и ПЗ.

Проектные характеристики рабочих ТВС ЦЗ и ПЗ РУ БРЕСТ-ОД-300 (Рисунок. 1) как гидродинамической и тепломассообменной системы характеризуются значительными относительными шагами расположения твэлов ($S/d=1,33$ (ЦЗ) и $1,23$ (ПЗ)), использованием двухзаходного оребрения трапецевидного поперечного сечения (относительные шаги наливки $T/d=20,6$ (ЦЗ) и $19,0$ (ПЗ)), малым изменением плотности свинцового теплоносителя вдоль трактов ТВС, и значениями чисел Рейнольдса Re в диапазоне $(6-7) \cdot 10^4$.

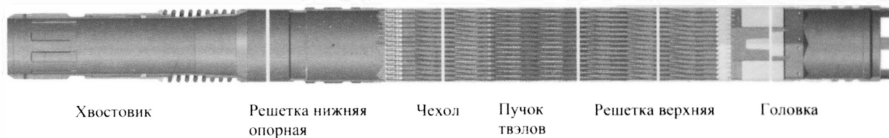


Рисунок. 1. Рабочая ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300

Приводится обобщение существующих данных о коэффициентах гидравлического сопротивления λ пучков твэлов, дистанционированных проволоочной навивкой, которое показало, что значения коэффициента λ зависят от относительного шага расположения стержней S/d , относительного шага навивки T/d , числа твэлов (или стержней-имитаторов) в пучке N , отношения величин гидравлических диаметров пучка $d_{\text{гп}}/d_{\text{с}}$, рассчитанных без учета ($d_{\text{с}}$) и с учетом ($d_{\text{гп}}$) чехла ТВС, а также от числа Рейнольдса Re :

$$\lambda = \lambda(S/d, T/d, N, d_{\text{гп}}/d_{\text{с}}, Re).$$

Рассмотрены методы определения коэффициентов межканального обмена: «теплового следа» и «зонного нагрева», а также электромагнитный метод, разработанный в ФЭИ им. А.И. Лейпунского (Обнинск).

Анализ существующих данных показал ограниченность диапазона ранее исследованных геометрических параметров пучков оребранных твэлов: S/d и T/d , их несоответствие геометрическим параметрам пучков твэлов ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300, ограниченность диапазона чисел Re , существенный разброс и неполноту представления экспериментальных данных и обобщающих эмпирических зависимостей, также как и значительное различие самих обобщающих зависимостей, что делает актуальным проведение расчетно-экспериментального исследования гидравлических и тепломассопереносных характеристик пучков стержней, дистанционированных оребранием, применительно к РУ БРЕСТ-ОД-300.

Во второй главе приводится описание используемых методов исследования гидродинамики и тепломассопереноса в пучках оребранных стержней макетов рабочих ТВС ЦЗ и ПЗ РУ БРЕСТ-ОД-300.

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны 37-ми стержневые макеты ТВС ЦЗ и ПЗ, что обеспечило достаточное число гидравлических каналов для прохода потока теплоносителя (вокруг 19 стержней, расположенных в центре пучка), на течение в которых влияние чехла мало, и позволило обосновано переносить результаты экспериментов на последующий анализ гидравлических и тепломассопереносных характеристик штатных рабочих ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300.

Масштаб моделирования макетов в поперечном сечении равнялся ~2:1, что обеспечило достаточные зазоры между рядами стержней-имитаторов твэлов для ввода в пучок измерительных зондов.

Экспериментальные исследования были проведены на аэродинамическом стенде кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, представляющем собой открытый контур подачи теплоносителя (воздуха), и обеспечивающем подвод как изотермического, так и слабо неизотермического потока теплоносителя к исследуемому макету ТВС (Рисунок. 2).

Программа экспериментальных исследований включала определение гидравлических и тепломассопереносных характеристик пучков стержней макетов ТВС в диапазонах чисел Рейнольдса $Re = (3,6 - 6,6) \cdot 10^4$ – для макета ТВС ЦЗ (при $S/d = 1,33$, $T/d = 20,6$) и $Re = (3,6 - 6,4) \cdot 10^4$ – для макета ТВС ПЗ (при $S/d = 1,23$, $T/d = 19,0$), соответствующих режимам течения свинцового теплоносителя в штатных рабочих ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300.

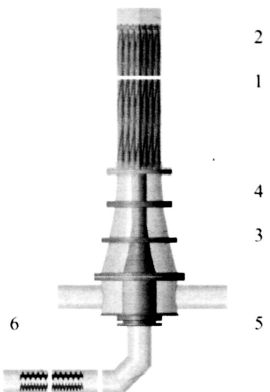


Рисунок. 2. Общий вид макета ТВС: 1 – стержни-имитаторы твэлов; 2 – чехол; 3 – центральный тракт подвода теплоносителя; 4 – периферийный тракт подвода теплоносителя; 6 – нагреватель

Расчетные модели макетов ТВС разработаны в двух исполнениях: с учетом подводящего участка и зоной истечения теплоносителя (Рисунок. 3) и без них, что позволило выполнить анализ влияния нижней опорной и выходной решеток на распределение параметров течения теплоносителя.

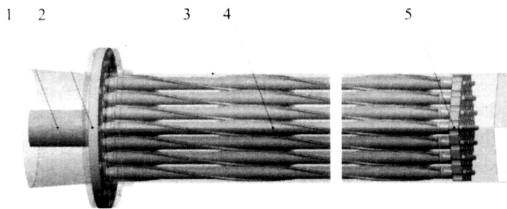


Рисунок. 3. Расчетная модель макета ТВС с подводящим устройством и зоной истечения: 1 – устройство подвода теплоносителя; 2 – нижняя опорная решетка; 3 – чехол; 4 – пучок стержней-имитаторов твэлов; 5 – верхняя решетка

Полиэдральный тип неструктурированной сетки был выбран в качестве базового при разработке расчетных моделей макетов ТВС ЦЗ и ПЗ. Размер ячеек в пристенной области соответствовал безразмерному расстоянию $y^+ \approx 1$, что, в свою очередь, позволило использовать замыкающие низкорейнольдсовы модели турбулентности без применения пристеночных функций. Общее количество элементов расчетной сетки макетов ТВС составило $\sim 10^8$.

Обоснован выбор расчетного CFD-кода – «ANSYS Fluent».

Граничные условия, использованные при описании расчетных моделей, соответствуют характеристикам течения теплоносителя при проведении экспериментальных исследований.

В заключение главы приводится математическое описание течения теплоносителя в макетах ТВС, основанное на применении уравнений неразрывности, Навье-Стокса, энергии и уравнений замыкающих моделей турбулентности.

В третьей главе приводятся результаты экспериментального и расчетного моделирования гидродинамических процессов, протекающих в пучках стержней макетов ТВС ЦЗ и ПЗ.

Экспериментальные значения коэффициентов гидравлического сопротивления λ макетов ТВС ЦЗ и ПЗ для области стабилизированного течения теплоносителя с числами Рейнольдса $Re=(3,6-6,5) \cdot 10^4$, обобщены с предельным отклонением 9,5 % следующей зависимостью

$$\lambda=0,185 \cdot (1+41,8 \cdot Fr^{-0,8}) \cdot Re^{-0,2},$$

в которой числа Рейнольдса Re и Фруда Fr определяются как

$$Re=(\rho \cdot \bar{w} \cdot d_{\infty})/\mu \text{ и } Fr=T^2/S \cdot d_{\infty},$$

где ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; $\bar{w}$ – среднее значение скорости потока теплоносителя, м/с; d_{∞} – гидравлический диаметр пучка стержней, рассчитанный по геометрическим параметрам регулярной ячейки (без учета смоченного периметра чехла), м; S – шаг расположения стержней, м; T – шаг навивки, м; μ – коэффициент динамической вязкости теплоносителя, Па·с.

Анализ соответствия результатов численного моделирования и экспериментальных данных, проведенный по величине абсолютного значения градиента статического давления $|dp_{cm}/dz|$, показал, что для расчетной модели макета ТВС ЦЗ (без учета подводящего устройства и зоны истечения) наилучший результат показали RNG $k-\epsilon$ (с отклонением от экспериментальных значений 2,3 %), стандартная $k-\epsilon$ (6,2 %) и SST $k-\omega$ (6,3 %) модели турбулентности. Для расчетной модели макета ТВС ПЗ наилучшие результаты показали стандартная $k-\epsilon$, стандартная и SST $k-\omega$ модели, а также SA модель турбулентности. Отклонения расчетного значения $|dp_{cm}/dz|$ от экспериментально не превысило 4 %. Подобные результаты были получены при рассмотрении расчетных моделей макетов ТВС с учетом подводящего устройства и зоны истечения.

Для численного моделирования течения в макетах и полномасштабных ТВС ЦЗ и ПЗ РУ БРЕСТ-ОД-300 рекомендованы стандартная $k-\epsilon$ и SST $k-\omega$ модели турбулентности.

На Рисунках 4 – 12 приводятся результаты численного моделирования параметров течения при использовании расчетной модели макетов ТВС, учитывающей устройство подвода теплоносителя и зону истечения.

Особенностью распределения статического давления p_{cm} в макетах ТВС ЦЗ и ПЗ является наличие зоны восстановления давления за нижней опорной решеткой ($z < 210$ мм, Рисунок. 4) и периодической составляющей, с периодом 1/6 шага навивки T и амплитудой ~ 5 % от среднего значения.

Течение теплоносителя в окрестности решеток макетов ТВС (Рисунок. 5) ускоряется перед нижней опорной решеткой (Рисунок. 5, а), и затем затормаживается перед верхней решеткой (Рисунок. 5, б). Замедление потока связано с эффектом сжимаемости и его торможением ввиду перестроения потока перед верхней решеткой-кондуктором.

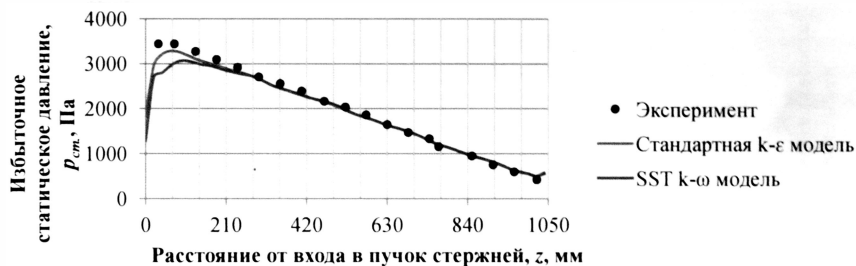
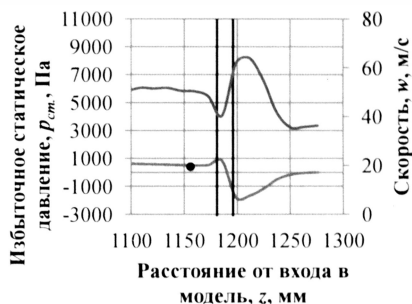
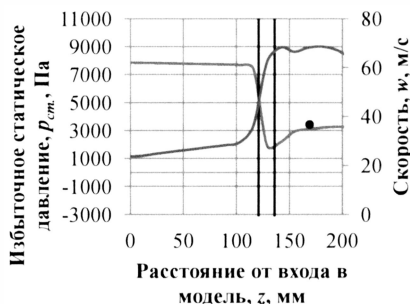


Рисунок. 4. Распределение избыточного статического давления в макете ТВС ЦЗ

Пройдя верхнюю решетку макета ТВС, поток восстанавливается, при этом длина области восстановления несколько меньше, чем область восстановления потока за нижней опорной решеткой.



- Эксперимент (изб. стат. давление)
- Линия В-В (изб. стат. давление)
- Линия В-В (средняя скорость)

а)

- Эксперимент (изб. стат. давление)
- Линия В-В (изб. стат. давление)
- Линия В-В (средняя скорость)

б)

Рисунок. 5. Распределение избыточного статического давления $p_{ст}$ и скорости потока теплоносителя в окрестностях нижней опорной (а) и верхней (б) решеток макета ТВС ЦЗ (измерения выполнены в причехловой области макета–линия В-В)

Изменение распространения скорости w_z вверх по течению теплоносителя (Рисунок. 6) характеризуется ее амплитудой, которая изменяется от 20–25 м/с на участке стабилизации течения до ~ 10 м/с в сечениях, близких к выходному – для макета ТВС ЦЗ, и от ~ 20 м/с до ~ 10–15 м/с – для макета ТВС ПЗ.

Отмечено, что скорость в причехловой области ниже, чем скорость в центральной области течения за счет причехловой циркуляции потока.

Погрешность определения экспериментальных значений скорости w_z составляет около 5%. Различие в локальных значениях экспериментальной и расчетной скоростей составляет ~15 %, при этом SST $k-\omega$ модель турбулентности лучшим образом описывает течение в регулярных (центральных) каналах пучков стержней ТВС.

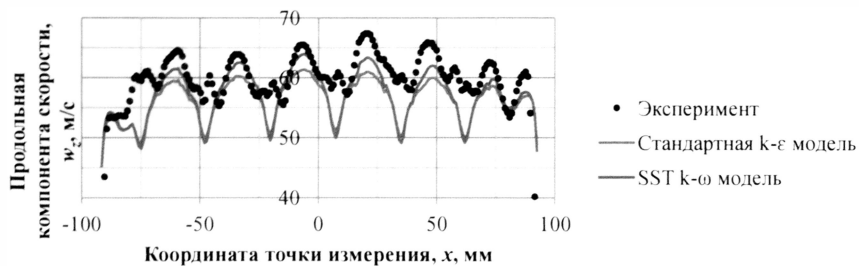


Рисунок. 6. Распределение скорости потока w_z в зазоре между центральным и смежным к нему рядами стержней в поперечном сечении, расположенном на расстоянии 906 мм от входа в макет ТВС ЦЗ

Влияние ребер навивки на поток проявляется в генерации вторичного течения (Рисунок. 7), имеющего общее направление вдоль ребер, что обеспечивает переток теплоносителя из одного канала в соседние с ним.

Показано, что в областях, ограниченных смежными ребрами и поверхностью соседних стержней, имеет место вторичное вихревое течение (Рисунок. 7, а), которое перемещается вслед за положением дистанционирующих ребер. В областях, где смежные ребра перекрывают переток теплоносителя между соседними ячейками, тангенциальная скорость обращается в ноль. Основной обмен потоков в соседних ячейках осуществляется в областях между поверхностями стержней, при максимальном удалении дистанционирующих ребер друг относительно друга.

В периферийных ячейках (Рисунок. 7, б) поле скорости определяется закруткой потока дистанционирующими ребрами и трением теплоносителя о стенки чехла.

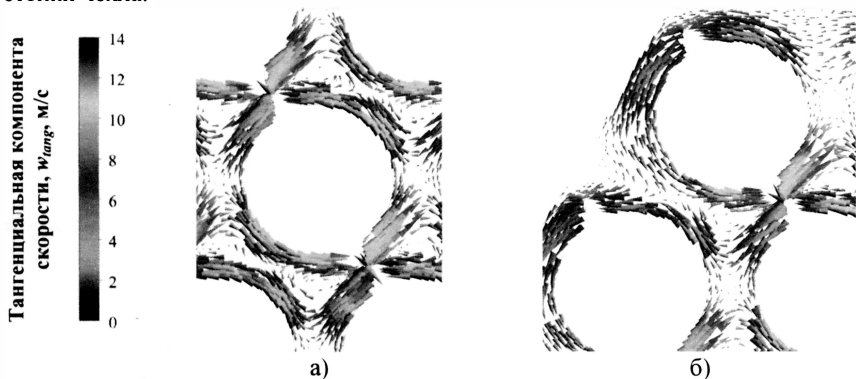


Рисунок. 7. Векторное поле поперечных скоростей потока в области регулярных ячеек (а) и в области причехловых ячеек (б) в сечении, расположенном на расстоянии 521 мм от входа в пучок стержней макета ТВС ЦЗ

Расчет турбулентных характеристик течения (Рисунок. 8) в объемах макетов ТВС показал, что в пределах длины макетов не наблюдается полной стабилизации характеристик турбулентности (k и ε). Протяженность участка с интенсивным снижением уровня турбулентных пульсаций скорости и уменьшением масштаба турбулентности составляет 1–1,5 шага T дистанционирующей навивки.

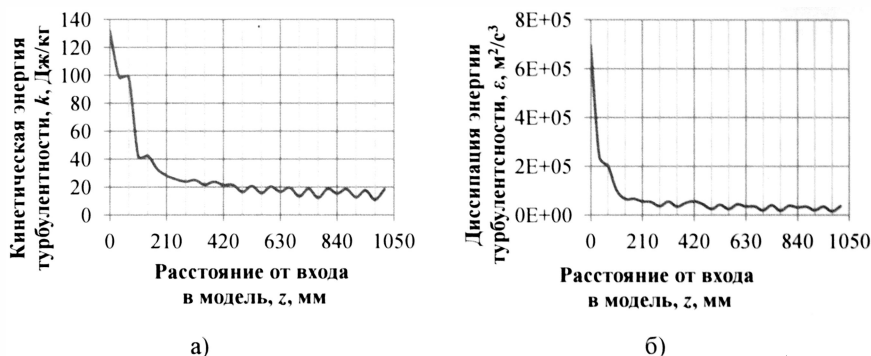


Рисунок. 8. Кинетическая энергия турбулентности и диссипация энергии турбулентности в области регулярных ячеек макета ТВС ЦЗ (точка 3)

В четвертой главе приводятся результаты численного моделирования межканального тепломассопереноса в пучках стержней макетов ТВС ЦЗ и ПЗ.

Рассмотрение механизма распространения температурной неоднородности в макетах ТВС ЦЗ и ПЗ, созданной методом «теплового следа», показало, что генерация вторичного течения ребрами навивки приводит к ступенчатому изменению температуры теплоносителя (Рисунок. 9).

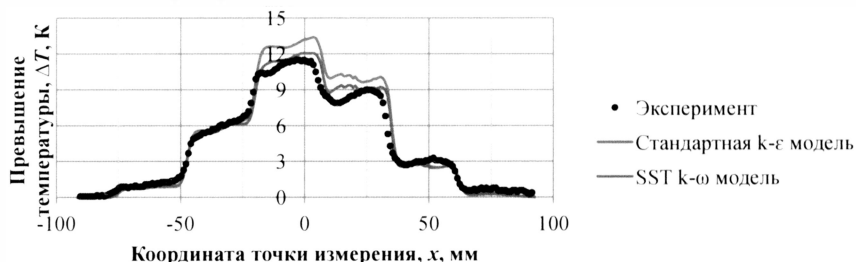


Рисунок. 9. Распределение превышения температуры ΔT теплоносителя на расстоянии 906 мм от входа в макет ТВС ЦЗ

Валидация модели расчета тепломассопереноса на экспериментальных данных о распределении температурной неоднородности показала, что стандартная k - ε модель турбулентности, качественно правильно описывает механизмы формирования изменения температуры: возникновение локальных максимумов, их смещение в соответствии с направлением навивки ребер, наличие областей с различными поперечными градиентами температуры, связанные с взаимодействием конвективного и диффузионного механизмов переноса в пучках

стержней. Количественное различие локальных значений температуры достигает в отдельных зонах начального участка теплообмена 100 % и уменьшается до 30 % на втором шаге навивки ребер.

По результатам численного моделирования тепломассопереноса в пучках стержней для двух условий создания температурной неоднородности в поле течения (на входе в пучок (метод «теплового следа») и за счет нагрева центрального стержня (метод «зонного нагрева»)) были определены коэффициенты межканального обмена массой $\mu_{i \rightarrow j}^{масс}$ и теплотой $\mu_{i \rightarrow j}^{тепл}$ для области регулярной решетки стержней с использованием одномерных уравнений для осредненных характеристик течения и теплообмена.

Для определения значений коэффициента обмена массой $\mu_{i \rightarrow j}^{масс}$ применялась следующая зависимость

$$\mu_{i \rightarrow j}^{масс} = G_{i \rightarrow j} / G_i,$$

где $G_{i \rightarrow j}$ – массовый расход теплоносителя из i -го в j -й канал, отнесенный к единичный высоте проходного сечения, кг/(с·м); G_i – массовый расход теплоносителя в i -м канале, кг/с.

Показано, что на величину продольного расхода G_i теплоносителя в центральных каналах пучков стержней (обозначены как $i=«1»$ и $«7»$) практически отсутствует влияние как величины подогрева центрального потока теплоносителя ΔT (метод «теплового следа»), так и мощности источника N_i (метод «зонного нагрева»). Расход G_i остается постоянным (отклонение от среднего значения менее 1 %) на участке стабилизированного течения. Поэтому можно утверждать, что вне зависимости от применяемого метода исследования, значения коэффициентов обмена массой $\mu_{i \rightarrow j}^{масс}$ (Рисунок. 10) в пучках стержней макетов ТВС ЦЗ или ПЗ одинаковы.

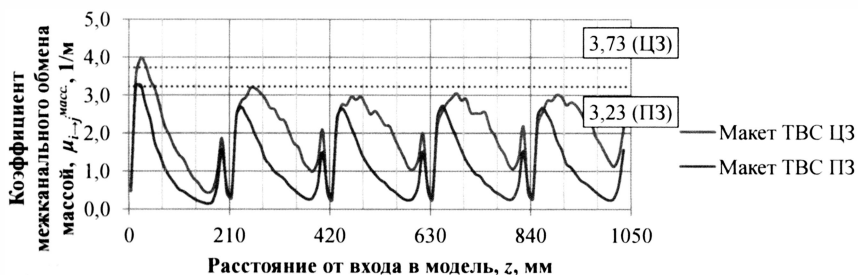


Рисунок. 10. Распределения коэффициентов межканального обмена массой между каналами «1» и «7» макетов ТВС ЦЗ и ПЗ (метод «теплового следа»)

Распределения коэффициентов межканального обмена теплотой $\mu_{i \rightarrow j}^{тепл}$ в пучках стержней макетов ТВС ЦЗ и ПЗ получены из рассмотрения системы балансовых уравнений:

$$\begin{cases} G_1 \frac{d\bar{T}_1}{dz} + \mu_{1 \rightarrow 7}^{менл} \frac{G_1 + G_7}{2} (T_1 - T_7) = \tilde{N}_1, \\ G_7 c_p \frac{d\bar{T}_7}{dz} + \mu_{1 \rightarrow 7}^{менл} c_p \frac{G_1 + G_7}{2} (T_7 - T_1) = 0. \end{cases}$$

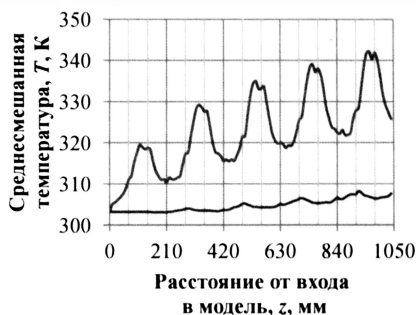
Для метода «теплового следа», когда в макет ТВС подводится центральный, более подогретый поток теплоносителя по отношению к периферийному потоку, величина $\tilde{N}_1 = 0$. Для метода «зонного нагрева», в случае обогрева центрального стержня постоянным источником теплоты, величина $\tilde{N}_1 = N_1$ ($6c_p \cdot L$), причем c_p – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К); N_1 – тепловая мощность источника, Вт; L – высота пучка стержней, м.

Показано, при одинаковости значений расходов в рассматриваемых каналах «1» и «7», значения межканального обмена теплотой $\mu_{1 \rightarrow j}^{менл}$ определяются распределениями температур теплоносителя в соответствующих каналах для рассматриваемых методов исследования (Рисунок. 11).



— Т1 — Т7

а)



— Т1 — Т7

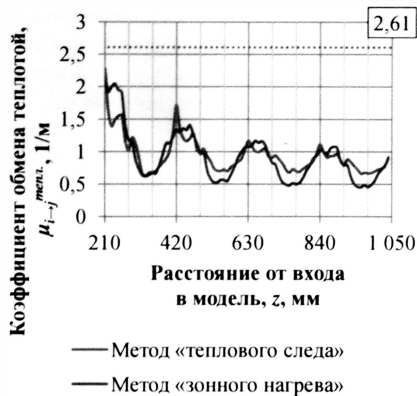
б)

Рисунок. 11. Распределение средней температуры теплоносителя в каналах «1» и «7» макетов ТВС ЦЗ и ПЗ: а – метод «теплового следа»; б – метод «зонного нагрева»

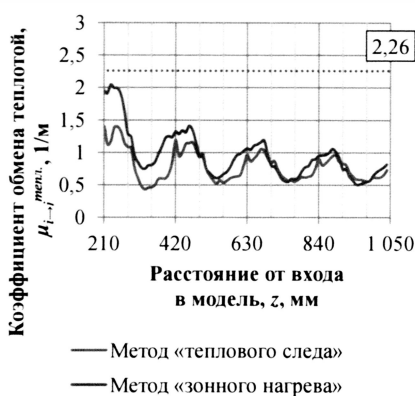
В результате решения системы балансовых уравнений, получены распределения коэффициентов межканального обмена теплотой $\mu_{i \rightarrow j}^{менл}$ (Рисунок. 12).

Коэффициенты обмена массой $\mu_{i \rightarrow j}^{масс}$ и теплотой $\mu_{i \rightarrow j}^{менл}$ являются периодическими функциями продольной координаты с амплитудами, соизмеримыми с их средними значениями, с периодом, равным половине шага навивки ребер.

Средние по длине канала на втором шаге оребрения значения коэффициентов обмена массой для макета ТВС ЦЗ равняются $\sim 0,8$, для макета ТВС ПЗ $\sim 0,7$.



а)



б)

Рисунок.12. Коэффициент межканального обмена теплотой между гидравлическими каналами «1» и «7» макетов ТВС ЦЗ (а) и ТВС ПЗ (б)

Средние значения коэффициентов переноса массы и теплоты для условий расчета потока в трактах номинальной геометрии оказываются существенно меньшими, чем рекомендуемые нормативные значения, показанные на Рисунке 12 пунктирными линиями.

Анализ результатов валидации привел к заключению, что количественное расхождение результатов экспериментов и расчетов связано с неполным соответствием граничных распределений температуры в экспериментах и расчетах, геометрическими отклонениями пучков и занижением моделью расчета процессов диффузионного переноса в области течения теплоносителя, что связано с неполным учетом турбулентных характеристик, формируемых подводящим устройством (макетом хвостовика).

В заключении приводятся основные выводы и результаты работы. Делается заключение о возможности применения полученных экспериментальных и расчетных данных к анализу гидродинамических и тепломассопереносных характеристик полномасштабных 169-ти твэльных рабочих ТВС ЦЗ и ПЗ РУ БРЕСТ-ОД-300.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Созданы малостержневые макеты рабочих ТВС ЦЗ и ПЗ активной зоны РУ БРЕСТ-ОД-300. Разработана методика выполнения измерений характеристик потока при моделировании гидродинамических и тепломассопереносных процессов в макетах ТВС.

2. Обосновано применение CFD-кодов, базирующихся на нелокальных моделях турбулентности, для описания гидродинамических и тепломассопереносных процессов, протекающих в экспериментальной установке и макетах ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300.

3. Показано, что экспериментальные значения коэффициентов гидравлического сопротивления λ для области стабилизированного течения в макетах ТВС ЦЗ и ПЗ с предельным отклонением 9,5 % обобщаются зависимостью

$$\lambda = 0,185 \cdot (1 + 41,8 \cdot Fr^{-0,8}) \cdot Re^{-0,2},$$

справедливой в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = (3,6 - 6,4) \cdot 10^4$, для относительного шага расположения стержней S/d , равного (1,33–1,23), и относительного шага трапецевидной навивки T/d , равного (19–20,6).

4. Экспериментальные значения коэффициентов гидравлического сопротивления λ находятся в удовлетворительном соответствии со значениями, полученными с использованием шести различных нелокальных моделей турбулентности. Для расчетов макетов и штатных рабочих ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300 рекомендованы стандартная $k-\varepsilon$ и SST $k-\omega$ модели турбулентности, прогнозирующие превышение по сравнению с экспериментами коэффициентов λ на (2,6–2,9) % - для макетов ТВС ЦЗ и (10,8–11,7) % - для макетов ТВС ПЗ.

5. Валидация стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности с использованием экспериментальных данных о распределениях продольной компоненты скорости w_z турбулентного потока и созданной температурной неоднородности ΔT в объемах пучков стержней показала удовлетворительное соответствие результатов экспериментов и расчетов: идентичные качественные изменения распределений скорости w_z и температуры T в поперечных сечениях пучков на длине макетов ТВС при количественном соответствии локальных значений скорости потока в экспериментах и расчетах в пределах 8–10 %, локальных значений температур – в пределах 30 % на втором шаге оребрения, поперечных размеров температурных неоднородностей в пределах 15 %.

Сделан вывод о том, что стандартная $k-\varepsilon$ модель турбулентности занижает процессы рассеяния температурной неоднородности в поле течения, особенно на начальном участке пучков стержней, что связано с неполным учетом турбулентных характеристик течения, формируемых в стенде перед макетами ТВС. Для повышения надежности расчетных характеристик потока в ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300 область расчета должна включать течение в напорной камере и хвостовике ТВС.

6. Показано, что коэффициенты обмена массой $\mu_{i \rightarrow j}^{масс}$ и теплотой $\mu_{i \rightarrow j}^{тепл}$ в области регулярных ячеек макетов ТВС, использованные для описания поперечного обмена в одномерных моделях расчета теплогидравлических процессов в ТВС, являются периодическими функциями продольной координаты с амплитудами, соизмеримыми со средними значениями, и с периодом, равным половине шага навивки, а их средние значения оказываются существенно меньшими, чем рекомендуемые для геометрий пучков твэлов ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300.

7. Локальные значения статического давления $p_{ст.}$, компоненты скорости w_i , температуры T , характеристик турбулентности (k и ε) содержат периодическую компоненту, которая за пределами начального участка течения не зависит от

продольной координаты, имеет амплитуду 5 % для гидравлического сопротивления λ пучка стержней ТВС, 10–15 % - для продольной скорости w_z и температуры T . Величины поперечных скоростей составляют 0,04–0,2 от продольной компоненты w_z , амплитуда их изменения равна 0,02–0,05. Изменение скорости потока в пучках твэлов ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300 следует учитывать при оценках коррозии и эрозии оболочек твэлов.

Выполненные в работе анализы и полученные результаты являются основанием рекомендовать CFD-коды, например, «ANSYS Fluent», с нелокальными стандартной $k-\varepsilon$ и SST $k-\omega$ моделями турбулентности, для расчета гидродинамических и тепломассопереносных процессов в трактах подвода теплоносителя и рабочих ТВС ЦЗ и ПЗ активной зоны РУ БРЕСТ-ОД-300.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1 Фомичев Д.В. Исследование гидравлических характеристик ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300 // Годовой отчет ОАО НИКИЭТ-2014: Сб. статей / Под ред. Е.О. Адамова. М.: АО НИКИЭТ, 2014. С. 157-158. (0,125 п.л.).

2 Фомичев Д.В., Солонин В.И. Гидравлические характеристики пучков стержней тепловыделяющих сборов реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2015. N 2(101). С. 4-17. (0,875 п.л./ 0,625 п.л.).

3 Фомичев Д.В., Солонин В.И. Структура турбулентного потока в пучках стержней тепловыделяющих сборов реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2015. N 3(102). С. 4-16. (0,812 п.л. / 0,575 п.л.).

4 Fomichev D.V., Solonin V.I. A CFD Analysis of Hydraulic Characteristics of the Rod Bundles in the BREST-OD-300 Wire-Spaced Fuel Assemblies // Proceedings of the International Conference on Nuclear Energy Science and Technology (ICNEST 2014). Switzerland (Zurich) 28-31 July, 2014. P. 1514-1519. (0,375 п.л. / 0,25 п.л.).

5 Fomichev D.V., Solonin V.I. Structure of the turbulent flow in the BREST-OD-300 Wire-Spaced Fuel Assemblies // Proceedings of the 5th International Youth Conference on Energy (IYCE 2015). Italy (Pisa) 27-30 May, 2015. P. 1-6. doi: 10.1109/IYCE.2015.7180754. (0,375 п.л. / 0,275 п.л.).

6 Фомичев Д.В., Солонин В.И. Результаты экспериментального и расчетного определения гидродинамических и теплопереносных характеристик пучка стержней с дистанционированием «ребро по ребру» // XVI научная школа молодых ученых ИБРАЭ РАН: Сб. тр. Препринт ИБРАЭ N IBRAE-2015-01. 2015. С. 155-158. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).