

На правах рукописи
УДК 621.039.534

Сатин Александр Анатольевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО КОНТУРА
ГАЗООХЛАЖДАЕМОЙ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

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

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук



Москва - 2018

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,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Габараев Борис Арсентьевич**
доктор технических наук, старший
научный сотрудник, главный
научный сотрудник АО «НИКИЭТ
им. Н.А. Доллежала»

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»
(НИЦ «Курчатовский институт»)**

Защита диссертации состоится 16 мая 2018 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 набережная, д.1, ф-т «Энергомашиностроение», ауд. 202э.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

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

Автореферат разослан «___» февраля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



К.С. Егоров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Создание способной к саморегулированию системы обеспечения региональной энергетической безопасности, которая учитывает оптимизацию территориальной структуры производства и потребление топливно-энергетических ресурсов - основная цель региональной Энергетической стратегии России на период до 2030 года. С этой целью в последние несколько лет активно исследуются перспективы использования атомных станций в отдаленных и изолированных регионах страны, что нашло отражение в государственной программе Российской Федерации «Социально-экономическое развитие арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года».

Станции с малыми реакторами (до 300 МВт (эл.) по классификации МАГАТЭ) предпочтительны для работы в районах с неразвитыми электросетями, при отсутствии мощных потребителей энергии. Они могут работать в автономном режиме, решая социально важные задачи отопления жилых районов, обессоливания воды, получения водорода, ожижения угля и др. Такие атомные станции незаменимы для снабжения энергией удалённых районов Севера, в труднодоступных местах, на разбросанных и удалённых островах, в горах, где очень сложно и дорого использовать минеральное топливо. Малые реакторы, способные работать около 10 лет без перегрузки топлива, дают определённую независимость от поставщика топлива. Такие реакторы дают простую и безопасную возможность странам, не имеющим собственной ядерной индустрии, сделать скачок в развитии собственной энергетики. В настоящее время в России и мире разрабатывается почти пятьдесят вариантов реакторов для АСММ.

Анализ вариантов реакторных установок для АСММ показывает перспективность использования высокотемпературного газоохлаждаемого реактора на быстрых нейтронах, использующего цикл Брайтона, потому что данный вариант обеспечивает решение важных задач энергоснабжения: высокий КПД электрогенерирования, хорошие маневренные характеристики, длительный ресурс работы между перезагрузками.

При разработке проекта газоохлаждаемой реакторной установки важен вопрос теплового режима реактора и его элементов, в том числе выполнение газодинамического контура, удовлетворяющего требованиям обеспечения надежного теплоотвода от активной зоны при низком гидравлическом сопротивлении, обеспечивающем повышение КПД цикла Брайтона, за счет снижения потерь энергии на прокачку рабочей среды.

Важной частью задачи разработки контура охлаждения реакторной установки является изучение режимов течения потока теплоносителя в трактах контура, включая тракты активной зоны, коллекторы, патрубки и соединительные элементы с целью обеспечить оптимальное с позиций теплоотвода от топлива, безпульсационное течение теплоносителя в трактах при минимизации гидравлического сопротивления реакторной установки.

Исследования вариантов исполнения контура выполнялись на кафедре ядерных реакторов и установок МГТУ им. Н.Э. Баумана в период 2010-2014 гг. в поддержку выполняемых предприятиями ГК «Росатом» предварительных разработок проектов высокотемпературного газоохлаждаемого реактора на быстрых нейтронах с гелиево-ксеноновым теплоносителем для атомных станций малой мощности. Эти исследования являются основой выполненной работы.

Объектом исследования представленной работы являются турбулентные течения модельного теплоносителя – воздуха в трактах, коллекторах, имитаторах активной зоны модели газоохлаждаемого реактора.

Предметом исследования являются методы гидродинамического воздействия на турбулентные течения в коллекторах, обеспечивающие эффективное распределение теплоносителя по трактам охлаждения активной зоны без использования традиционного гидравлического профилирования на входе потока в активную зону при отсутствии в потоке крупномасштабных вихревых структур, способствующих возбуждению вибраций.

Цель научного исследования:

1. Разработать конструктивные решения моделей, отражающих особенности трактов для теплоносителя, и обосновать методики получения экспериментальных данных о характеристиках турбулентного течения.

2. Изучить особенности турбулентного течения модельного теплоносителя – воздуха в элементах моделей газодинамического контура газоохлаждаемого реактора.

3. Провести валидацию CFD кода с использованием полученных экспериментальных данных, выполнить численное моделирование течения в моделях.

Научная новизна работы определяется:

1. Впервые проведено комплексное моделирование турбулентного течения в газодинамическом контуре газоохлаждаемого реактора с различной геометрией трактов подвода теплоносителя от турбокомпрессорных агрегатов установки, получен массив экспериментальных данных о характеристике течения в трактах.

2. Показана определяющая роль вихревого течения в раздаточном коллекторе, образованном эллиптическим днищем корпуса и конструктивными элементами активной зоны, на равномерность распределения расхода по трактам охлаждения активной зоны и их гидравлическое сопротивление.

3. Показано, что изменением геометрии днища раздающего коллектора можно исключить образование вихревого течения и обеспечить равномерное распределение расхода теплоносителя по сечению активной зоны при кратном снижении гидравлического сопротивления коллектора.

4. Показано, что локальная k-ε моделью турбулентности трехмерного CFD кода описывает массив экспериментальных данных с погрешностью менее 15 %, что демонстрирует возможность его использования в проектных работах.

Практическая значимость работы заключается в:

1. Данные о характеристиках течения в вариантах контура теплоносителя используются для валидации методик расчета газоохлаждаемых реакторных установок.
2. Предложена новая геометрия раздаточного коллектора, которая принята к рассмотрению в вариантных разработках трактов теплоносителя газоохлаждаемых реакторных установок.
3. Экспериментальные и расчетные данные о характеристиках турбулентного течения в вариантах трактов РУ способствуют повышению качества проектных работ и могут быть использованы в проектах других реакторных установок.

Достоверность результатов. Достоверность результатов проведенных исследований определяется обоснованностью моделирования, отработкой методик измерений, использованием современной автоматизированной системы обработки результатов экспериментов, анализом погрешностей, хорошим согласием результатов численного моделирования с экспериментом, а экспериментальных данных с известными результатами в сравнимых условиях.

Личный вклад автора. Автор участвовал в качестве исполнителя на всех стадиях разработки конструкции моделей, их изготовления, монтажа, ввода в эксплуатацию. Лично автором проведены все экспериментальные исследования на всех вариантах моделей трактов. Лично автором реализована методика численного моделирования течения в моделях. Автору принадлежит идея геометрии дефлектора раздаточного коллектора, исключающего образование вихревого течения на входе в активную зону. Автор самостоятельно провел обобщение и анализ результатов исследования.

На защиту выносятся:

1. Результаты комплексного моделирования турбулентного течения в трактах охлаждения газоохлаждаемого реактора.
2. Определяющая роль течения в раздаточном коллекторе на распределение расхода теплоносителя в трактах охлаждения активной зоны, геометрия раздаточного коллектора, обеспечивающего равномерность расхода в трактах охлаждения при низком гидравлическом сопротивлении.
3. Результаты валидации численного моделирования течения в моделях и анализ характеристик потока на базе результатов численного моделирования.

Апробация работы. Результаты работы обсуждались на научно-технических семинарах, проводимых на кафедре ядерных реакторов и установок МГТУ им. Н.Э. Баумана, на научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2015)» (Обнинск, 2015), на конференции молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» (Москва, 2015), на 18-ой международной научно-технической конференции молодых специалистов по ядерным реакторным установкам «Конференция молодых специалистов» (Подольск, 2016), на российской конференции молодых учёных, специалистов, аспирантов, студентов

«Атомные электростанции сверхмалой мощности для прикладных и учебных целей» (Обнинск, 2016), на втором научно – практическом семинаре «Проблемы верификации и применения CFD (calculation fluent dynamic) кодов в атомной энергетике» (Нижний Новгород, 2016).

Результаты диссертационной работы рекомендуются к внедрению в отраслевых организациях, занимающихся разработкой реакторных установок с боковым подводом и центральным отводом теплоносителя, а также газоохлаждаемыми реакторами: ОАО «НИКИЭТ», ОАО ОКБ «Гидропресс», ОАО «ОКБМ Африкантов».

Публикации. По теме диссертационной работы имеются 3 публикации в рецензируемых ВАК журналах «Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение» и «Наука и образование. Электронное научно-техническое издание».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и выводов, 146 страниц текста, 91 иллюстрации и списка литературы из 93 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность задачи моделирования трактов теплоносителя, имеющая целью получение необходимого по условиям теплоотвода распределения расхода по трактам активной зоны, исключения пульсационного течения, связанного с наличием крупных вихрей, снижением гидравлического сопротивления. Сформулированы цели работы, научная новизна, практическая значимость, представлены выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена анализу известных литературных источников по проблеме организации трактов теплоносителя газоохлаждаемых реакторов различного назначения (высокотемпературных газоохлаждаемых, транспортных, для атомных станций малой мощности), по результатам которого в газодинамическом контуре (Рисунок 1) выделены области течения теплоносителя:

1. от компрессора (насоса) до раздаточного коллектора реактора;
2. в раздаточном коллекторе реактора;
3. в объеме активной зоны;
4. в сборном коллекторе реактора;
5. от сборного коллектора до газовой теплообменной аппаратуры (турбины);
6. в теплообменном аппарате (газовой турбине)

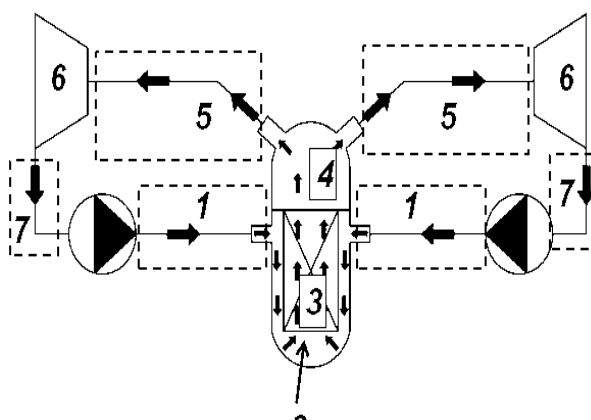


Рисунок 1.
Схема газодинамического контура
газоохлаждаемой реакторной
установки

7. от теплообменного аппарата (газовой турбины) до компрессора (насоса).

При этом к контуру теплоносителя предъявляются следующие требования:

- ограничение гидравлических потерь в контуре величиной $\sim 1\%$ от давления за компрессором;
- обеспечение плотности расхода теплоносителя по сечению активной зоны в соответствии с энерговыделением.

В диссертации анализируются тракты течения теплоносителя от входных патрубков до выхода из активной зоны, которые определяют особенности теплосъема в активной зоне и гидравлические потери реакторной установки с газоохлаждаемым реактором.

В исследуемой коллекторной системе теплоноситель поступает в кольцевой канал, образованный корпусом и разделительной обечайкой через расположенные до активной зоны патрубки подвода, количество которых определяется технологическими, компоновочными решениями. Далее он движется по кольцевому каналу вокруг активной зоны, поступает в раздаточный коллектор, образованный днищем корпуса и входной решеткой активной зоны, которая может содержать распределительные устройства. В раздаточном коллекторе поток теплоносителя разворачивается относительно первоначального направления на 180° , проходит через активную зону и собирается в сборном коллекторе, откуда отводится через выходные патрубки реактора, количество которых также может быть различным. На основании требований, предъявляемым к газоохлаждаемым контурам, выбирается масштаб моделей контура, а также модельный теплоноситель – воздух.

Вторая глава посвящена описанию характеристик разработанных моделей трактов контура газоохлаждаемой реакторной установки.

Для проведения исследований были разработаны три модели, в которых варьировались:

- число подводящих и отводящих патрубков;
- площадь поперечного сечения кольцевого тракта;
- условия входа потока в имитатор активной зоны;
- условия течения в сборном коллекторе;

Масштаб моделирования во всех случаях был выбран 1:2 для основных трактов подвода и отвода от активной зоны. Гидравлическое сопротивление модели активной зоны было выбрано меньшим ожидаемого в реакторе значения в силу немоделирования энерговыделения и использования имитаторов ТВЭЛ большего, чем натурные диаметра.

Тракты подвода модели №1 коллекторных системы (Рисунок 2) состоят из патрубков подвода (1), расположенных нормально к оси модели, кольцевого тракта (2), коллектора раздаточного (3), образованного полуэллиптическим днищем (4) и входной решеткой имитатора активной зоны (5), и патрубков отвода (6). Сопротивление активной зоны моделируется двумя решетками с отверстиями 18 мм. Имитатор активной

зоны содержит 13 имитаторов стержней управления и защиты (СУЗ) диаметром 24 мм, а также 6 имитаторов СУЗ диаметром 12 мм. Входная решетка содержит 19 отверстий диаметром 33 мм. Пористость входной решетки по отношению к активной зоне составляет 0,37. Кроме натуральных экспериментов, были проведены численные с использованием ПК ANSYS CFX v 14 для модели №1 с входными решетками пористостью 0,1; 0,25 и 0,5.

Для изучения влияние сопротивления активной зоны на перераспределение

расхода перед входной решеткой была разработана модель №2 коллекторной системы (Рисунок 3). В ней установлены имитаторы твэлов в виде 55 стержней диаметром 25 мм с шагом 27,4 мм (относительный шаг равен 1,086), гидравлический диаметр имитации активной зоны 8,58 мм.

Тракты теплоносителя модели №3 коллекторной системы (Рисунок 4) включают: патрубки подвода (1) (нормальные к оси модели 16 штук); кольцевой тракт (2); коллектор раздаточный (3) (образован полусферическим днищем (4) и входной решеткой); имитатор активной зоны (5) (моделируется 55 гладкими цилиндрическими стержнями Ø20 мм, которые располагаются в правильной треугольной решетке с шагом 21,7 мм); патрубки отвода (6) (нормальные к оси модели 16 штук).

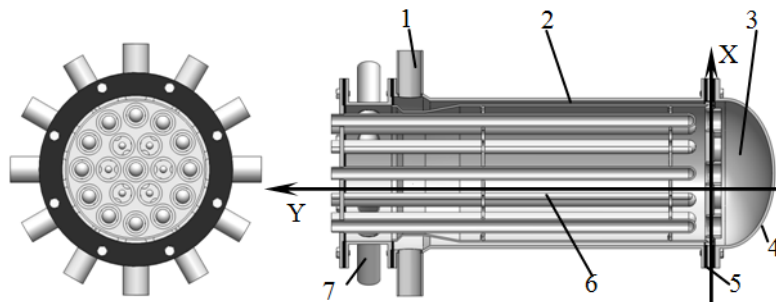


Рисунок 2.

Схема модели №1 коллекторной системы:
1 – патрубки подвода; 2 – кольцевой тракт;
3 – коллектор раздаточный; 4 – днище полуэллиптическое; 5 – входная решетка; 6 – имитатор активной зоны; 7 – патрубки отвода

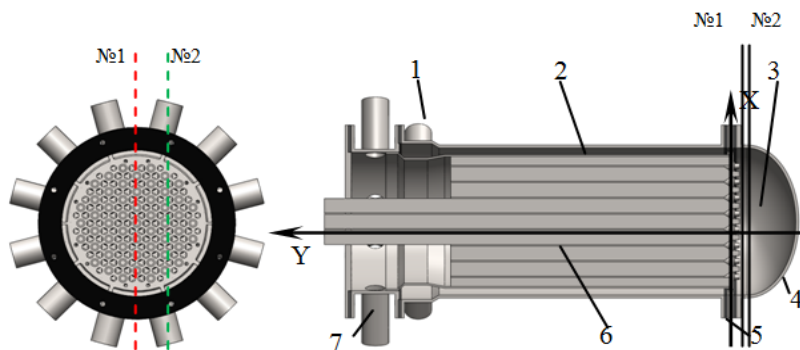


Рисунок 3.

Схема модели №2 коллекторной системы и размещения измерительного зонда: 1 – патрубки подвода; 2 – кольцевой тракт; 3 – коллектор раздаточный; 4 – днище полуэллиптическое; 5 – входная решетка; 6 – имитатор активной зоны; 7 – патрубки отвода

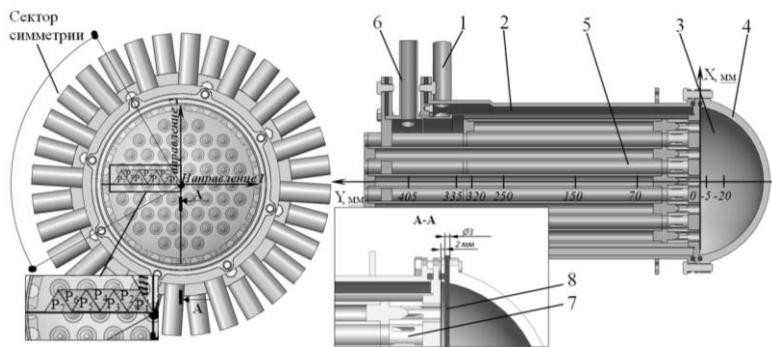


Рисунок 4. Схема модели №3 коллекторной системы и размещения измерительных зондов: 1 – патрубки подвода; 2 – кольцевой тракт; 3 – коллектор раздаточный; 4 – днище; 5 – имитаторы твэлов стержней СУЗ (активная зона); 6 – патрубки отвода; 7 – хвостовики имитаторов твэлов; 8 – зонд измерительный; Направления 1 и 2 – направления движения зонда измерительного; P_1, \dots, P_7 – каналы (ячейки периодичности) течения теплоносителя

патрубков в модели №3 коллекторных систем от предыдущих вариантов объясняется только проблемами в технологии изготовления прототипа.

Для перераспределения расхода в раздаточном коллекторе использовались дефлекторы (Рисунок 5). Для моделей №1 и №2 разработан

дефлектор Д1, эллиптической формы с 37

трубчатыми отверстиями. Дефлектор имеет форму внешней

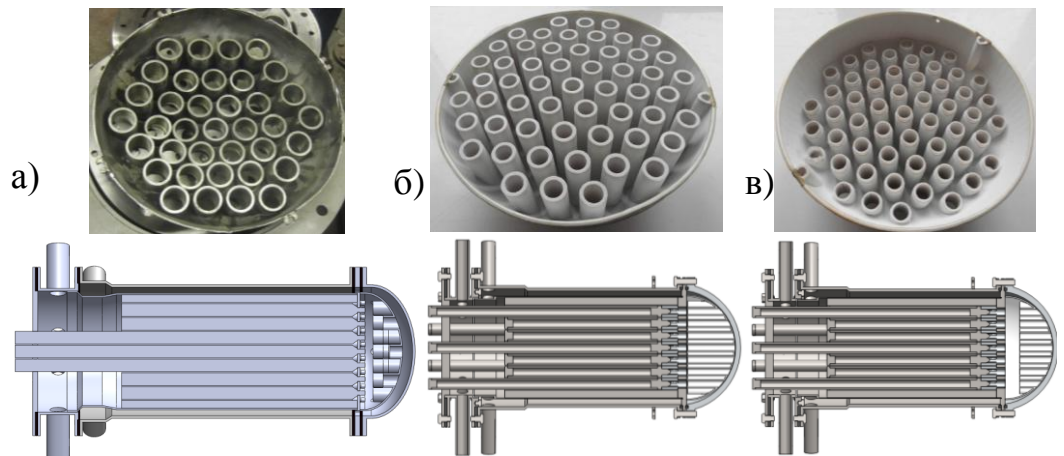


Рисунок 5. Общий вид дефлекторов Д (а), Д1 (б), Д2 (в) и места их установки в модели коллекторных систем

поверхности, которая создавала тракт подвода с увеличивающейся высотой. Отверстия имеют диаметр 22 мм, осевую протяженность от 25 мм в центре до 33 мм на периферии. Общий вид этого дефлектора, именуемого далее Д, приведен на рисунке 5а. Для модели №3 разработаны дефлекторы Д1 и Д2 (рисунок 5б и 5в). Диаметр дефлекторов ($\varnothing 189$ мм) равен наружному диаметру входной решетки модели. Поток из кольцевого тракта движется между корпусом дефлектора и крышкой модели в зазоре, высота которого равномерно вдоль образующих уменьшается от 10 мм на входе потока в

Направляющие каналы СУЗ моделируются 13 стержнями большей длины, чем остальные имитаторы, и предназначены для получения данных об их влиянии на течение в сборном коллекторе. По периферии имитатора активной зоны располагаются 18 вытеснителей для исключения протечек между периферийным рядом имитаторов твэл и внутренней обечайкой. Отличие в количестве

зазор до 2 мм в центре дефлектора. На поверхности дефлектора размещено (по правильной треугольной решетке) 55 цилиндрических отверстий, расположенных соосно отверстиям концевиков, подводящих поток в проточную часть пучка стержней – имитаторов твэлов монозоны. Входящий в отверстия дефлектора поток формируется цилиндрическими каналами диаметром $\varnothing 11.2$ мм. Длины каналов различны, а их выходные торцы размещены в одной плоскости. В варианте дефлектора Д1 выходные торцы заглублены на 2 мм относительно входного торца дефлектора. В варианте дефлектора Д2 выходные торцы заглублены на 27 мм относительно входного торца дефлектора. Толщина конструктивных элементов дефлектора равна 2 мм. Для крепления дефлектора к входной решетке используются два отверстия. Зазор между торцом дефлектора и входной решеткой герметизировался прокладкой.

В третьей главе описаны применяемые методы и методики проведения физического и численного эксперимента.

В работе исследовалось распределение статического давления по длине кольцевого тракта, перед входной решеткой и в имитаторе активной зоны; средней скорости и турбулентных характеристик потока на выходе из кольцевого тракта и перед входом в активную зону.

Для измерений использованы измерительные преобразователи давления Honeywell (26PC01SMT и 26PC05SMT), прибор измерения атмосферного давления фирмы Fischer KG 9362, термометр переносной WT389, двуниточные датчики термоанемометра системы StreamLine Pro. На выходе из кольцевого канала измерения осуществлялись с помощью трубки полного напора (Пито), которая перемещалась по периметру щели, в ее центральной части. Плотная упаковка имитаторов твэлов не позволяет провести с достаточной достоверностью измерения в объеме имитатора активной зоны моделей. Поэтому измерения средней скорости в имитаторах активных зон моделей были выполнены на входе во входную решетку с использованием цилиндрического зонда $\varnothing 3$ мм с одним радиально расположенным импульсным отверстием $\varnothing 0,4$ мм. Суммарная погрешность измерения статического давления не превышает 6,3%. Суммарная погрешность определения скорости с помощью цилиндрического зонда не превышает 11,4 %. Суммарная погрешность термоанемометрической системы не превышает 5,5 %. Диапазон чисел Рейнольдса в экспериментах составлял от 10^3 до 10^6 .

Для реализации анализов нескольких расчетных моделей использованы неструктурированные сетки, на которых выполнены анализ сеточной сходимости (от 3477 до 998006 контрольных элементов) и модели турбулентности ($k - \varepsilon$, $k - \omega$, $k - \omega$ SST). Выбрана 1/4 часть исходной модели с числом конечных элементов в моделях порядка $10 \cdot 10^6$. В расчетах граничные условия: на входе средняя скорость равномерна и нормальна к сечению патрубка подвода; на выходе в сечении патрубка отвода - давление окружающей среды. Течение в приграничных слоях описывалось с

использованием пристеночных функций. Расчеты выполнены с использованием стандартной линейной $k - \varepsilon$ модели турбулентности.

Использованы следующие уравнения движения и неразрывности:

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \sum_j \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (1)$$

$$\sum_j \frac{\partial V_j}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

Компоненты скоростей деформаций и тензора напряжений:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right), \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = 2 \cdot \mu \cdot S_{ij} - \rho \cdot \overline{V_i' \cdot V_j'}, \quad (4)$$

Согласно гипотезе Буссинеска:

$$-\rho \cdot \overline{V_i' \cdot V_j'} = T_{ij} = 2 \cdot \mu_T \cdot S_{ij}. \quad (5)$$

Отсюда турбулентная вязкость, записанная через скорость диссипации турбулентной энергии ε и кинетическую энергию турбулентности k :

$$\mu_T = \frac{C_\mu \cdot \rho \cdot k^2}{\varepsilon}. \quad (6)$$

Уравнения для $k - \varepsilon$ модели:

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_T \cdot P - \rho \cdot \varepsilon, \quad (7)$$

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} \cdot \mu_T \cdot P - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho \cdot \varepsilon), \quad (8)$$

$$P = \frac{1}{\mu_T} \cdot \sum_i \sum_j T_{ij} \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j}. \quad (9)$$

В уравнениях (1)-(9) где x_i – оси декартовой системы координат ($i=1, 2, 3$); V_i – проекция вектора скорости \vec{V} на ось x_i ; P – статическое давление; t – время; μ – динамическая вязкость; μ_T – турбулентная вязкость; ρ – плотность; коэффициенты стандартной линейной $k - \varepsilon$: $C_\mu = 0,09$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

Отклонения локальных распределений скоростей достигают 15 %, отклонения интегральных характеристик (КГС, перепады давлений на моделях) не более 7 %. Сравнение проводилось с данными, полученными в физических экспериментах, при этом интегральные характеристики сравнивались с результатами аппроксимации на бесконечность величин перепадов давлений, определенных при варьировании числом конечных элементов и моделей турбулентности.

В четвертой главе излагаются результаты исследований течения на входе и в раздаточном коллекторе и приведены результаты расчетно-конструкторских проработок нового вида дефлектора, позволяющего снизить

потери и получить равномерное распределение скорости на входе в активную зону.

Функциональным требованием к характеристикам течения в трактах теплоносителя является получение равномерного по периметру кольцевого тракта распределения расхода теплоносителя на выходе из кольцевого канала, что должно обеспечить равномерность распределения потока на входе в раздаточный коллектор. В моделях поток в кольцевом тракте формируется струями, истекающими из входных патрубков. Струи взаимодействуют с поверхностью тракта и растекаются по поверхности, что приводит к формированию потока вдоль оси кольцевого тракта с неравномерным распределением скорости в направлении вдоль патрубков. При этом максимумы продольной скорости в сформировавшемся потоке (при подводе воздуха через четыре патрубка) расположены на осевых линиях между патрубками. Приемлемая равномерность распределения скорости по периметру кольцевого тракта достигается на расстояниях 80...90 высот тракта ближе к выходу из кольцевого канала и входе в раздаточный коллектор. При проведении исследований показано, что во всех моделях коллекторов при подаче теплоносителя через четыре, три или два патрубка неравномерность распределения расхода по периметру кольцевого тракта практически малосущественна, а распределение скорости в имитаторе активной зоны является практически независимым от числа патрубков подвода и автомодельно по числу Рейнольдса потока. Этот результат объясним большой относительной длиной кольцевого тракта, в пределах которого неравномерность расхода на входе в тракт успевает нивелироваться. Важным недостатком большой относительной длины кольцевого тракта является высокая скорость потока и большое гидравлическое сопротивление. При работе четыре и трех патрубков неравномерность практически отсутствует, при работе двух соседних патрубков неравномерность достигает 2 %, а при работе одного патрубка неравномерность соответствует 11 %. Из результатов измерений следует, что на входе в раздаточный коллектор имеет место близкое к равномерному распределение расхода воздуха по периметру кольцевого тракта. При исследовании течения от входных патрубков до выхода из кольцевой щели равномерность устанавливается не сразу и зависит от отношения диаметра щели к ее протяженности, геометрии щели, скорости течения воздуха (теплоносителя).

Поток, вытекающий из кольцевого коллектора, двигаясь по сферической или полуэллиптической поверхности раздаточного коллектора, инжектирует поток из прилежащей области, замедляется и формирует расположенный в центральной области коллектора осевой поток к входной решетке. Между потоком, истекающим из кольцевого коллектора, и осевым потоком возникает торообразный вихрь. По этой причине осевая скорость потока на входе в тракты имитаторов твэлов оказывается большей для центральной области имитаторов твэлов и меньшей для периферийной области. На Рисунке 6 представлены распределения средней скорости и

пульсаций скорости на входе в активную зону, полученные экспериментально (зонд и термоанемометр), и расчетным путем в модели №3 коллекторных систем. Замеры распределений средней скорости для модели №2 коллекторных систем был проведен в области тарировочных характеристик

цилиндрического зонда, поэтому наблюдается хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений скоростей в модели №3 коллекторных систем показывает, что в центральной области входа потока в модель (на площади проходных отверстий хвостовиков) максимальные

экспериментальные и расчетные значения средней скорости совпадают в пределах погрешностей экспериментов. Из-за нечувствительности измерений полного давления к ориентации потока экспериментальные значения для периферийных стержней выше расчетных на ~ 30 %. Полученные в расчете значения продольной средней скорости вблизи торца между проходными отверстиями входной решетки меньше измеренных зондом в 30 раз из-за несоответствия условий обтекания зонда в этих областях раздаточного коллектора тем условиям, при которых проходила тарировка. Распределения средней скорости на входе в активную зону с раздаточным коллектором, содержащем непрофилированный дефлектор Д, полученные экспериментально и расчетным путем, в двух сечениях модели №2 коллекторных систем показали, что отличие расхода в центральном отверстии и в периферийном составляет порядка 50 %, а уровень пульсаций в коллекторе не снизился. Следовательно, использование полуэллиптического раздаточного коллектора с непрофилированным дефлектором, не позволяет перераспределить расход теплоносителя. Экспериментальные результаты, полученные на моделях №1 и №2, подтвердили наличие большой неравномерности расхода на входе в имитатор активной зоны, а также наличие пульсаций до 30% от средней скорости. С целью устранения подобных явлений были исследовано внедрение перед имитатором активной зоны распределительных устройств – дефлекторов.

На экспериментальных данных в кольцевом канале и имитаторе активной зоны была проведена валидация расчетных моделей, которая показала совпадение результатов, характеризующее интегральную погрешность экспериментов и расчетов, до 5-10 %, что было признано удовлетворительным (Рисунок 7).

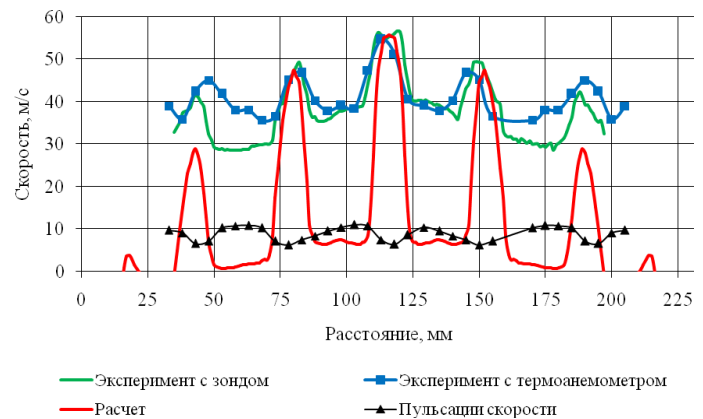


Рисунок 6. Распределение средней скорости и пульсаций средней скорости в модели №3

На Рисунке 8 представлены векторные картины распределения средней скорости потока в раздаточном коллекторе и на входе в имитатор активной зоны модели №3 коллекторных систем в направлении 1.

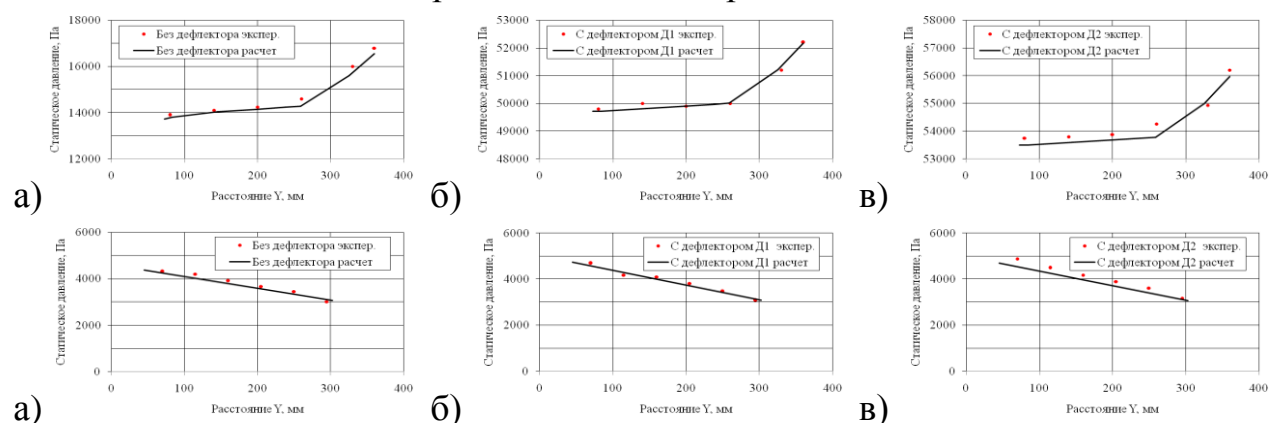


Рисунок 7.

Распределение статического давления в модели №3 коллекторных систем без дефлектора (а), с дефлектором Д1 (б) и Д2(в). Верхний ряд – в кольцевом канале, нижний ряд – в имитаторе активной зоны

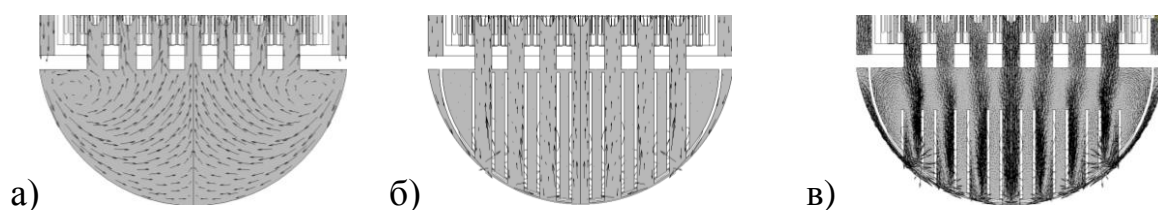


Рисунок 8. Поле скорости течения в раздаточных коллекторах без дефлектора (а), с дефлектором Д1 (б) и с дефлектором Д2(в)

Поток, выходя из кольцевого тракта попадает в свободное пространство раздаточного коллектора, где создает торообразный вихрь, в результате которого в периферийных каналах входа в имитатор активной зоны скорость потока снижается. Течение между внутренней поверхностью раздаточного коллектора и наружной поверхностью дефлектора происходит со скоростью, близкой к постоянной. На входе во все распределительные тракты (кроме центральных) дефлекторов Д1 и Д2 наблюдается неравномерность средней скорости потока, которая сохраняется в пределах всей длины трактов вплоть до выхода из них и входа в имитатор активной зоны. При этом в случае уменьшенной длины трактов дефлектора (дефлектор Д2), возникает вихревое течение из-за течения струйных потоков в свободном от основного потока объеме раздаточного коллектора перед входной решеткой.

Дефлекторы Д1 и Д2 перераспределяют расход потока в сечении имитатора активной зоны, позволяя увеличить скорость в периферийных рядах по сравнению с центральными, при этом уровень пульсации равен от 10 до 30 % средней скорости (Рисунок 9).

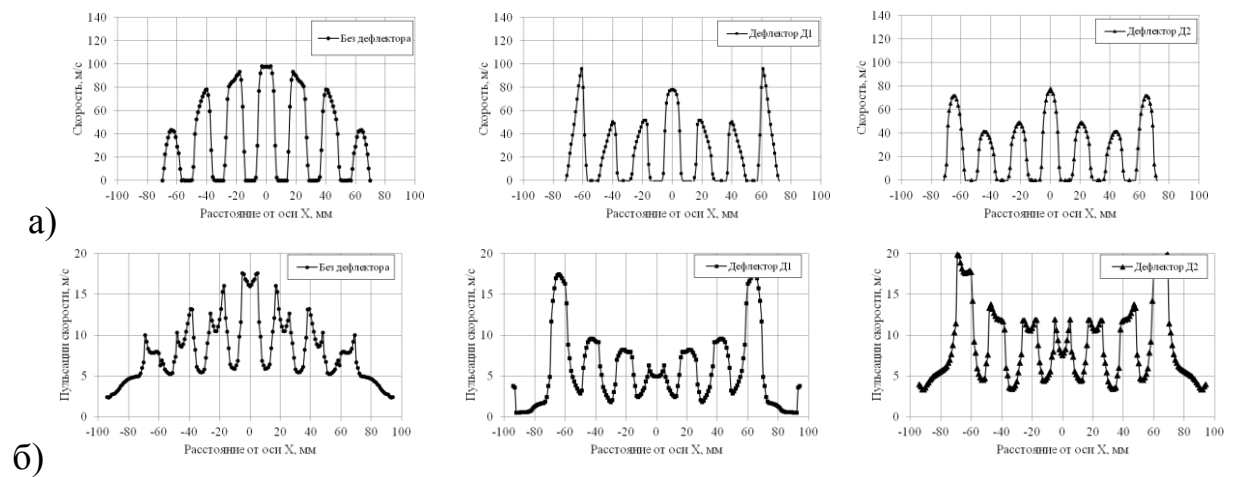


Рисунок 9.

Значения средней скорости (а) и турбулентных пульсаций скорости (б) перед входной решеткой (направление 1)

Анализируя результаты экспериментов и расчетов раздаточных коллекторов с дефлекторами Д1 и Д2 можно заключить, что за счет изменения геометрии дефлекторов можно добиться равномерного распределения потока теплоносителя на входе в активную зону, но это не приводит к уменьшению гидравлических потерь. Численное моделирование позволило определить участков трактов имитаторов твэл модели, в пределах которых статическое давление становится постоянным в сечении, что является свидетельством о стабилизации течения и завершении перераспределения расхода между трактами является выравнивание статического давления в сечении. Протяженность этого участка составляет от 45 до 50 гидравлических диаметров трактов. На участке входе в имитатор активной зоны (порядка 12 гидравлических диаметров) неравномерность статического давления для раздаточного коллектора без дефлектора и с дефлекторами Д1 и Д2 составляет 52, 36 и 31 % соответственно.

Для гидравлических потерь в моделях №1, №2 и №3 были использованы экспериментальные данные и результаты численного моделирования. Потери полного давления в раздаточном коллекторе определялись как изменение полного давления от сечения выхода потока из кольцевого подводящего тракта моделей до сечения входа потока во входную решетку соответствующего варианта монозоны. Потери полного давления относились к скоростному напору осредненного течения в кольцевом подводящем канале. КГС раздаточного коллектора модели №1 без дефлектора и с дефлектором Д равен 4,8 и 4,6 соответственно; КГС раздаточного коллектора модели №2 без дефлектора и с дефлектором Д равен 5,6 и 5,3 соответственно; КГС раздаточного коллектора модели №3 без дефлектора и с дефлекторами Д1 и Д2 равен 2,6, 28 и 31 соответственно. Установка дефлекторов Д, Д1 и Д2 хотя и позволяет лучше перераспределить поток теплоносителя на входе в активную зону, однако приводит к росту гидравлических потерь.

Для достижения равномерности расхода в сечении входа в активную зону необходимо исключить образование исходной неравномерности потока в полусферическом раздаточном коллекторе за счет использования иной геометрии раздаточного

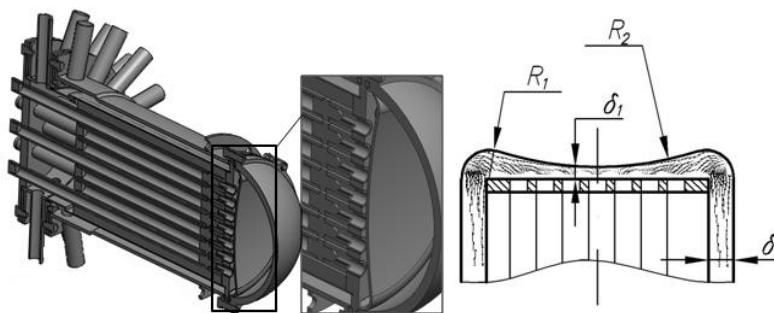


Рисунок 10. Общий вид безвихревого раздаточного профилированного коллектора модели №3 коллекторных систем

коллектора, названного профилированным коллектором (Рисунок 10). Этот коллектор направляет поток торообразной поверхностью с радиусом R_1 вдоль входной решетки и распределяет его равномерно по трактам решетки и имитаторов твэлов сферической поверхностью с радиусом R_2 . Вариантные расчеты течения в профилированном коллекторе показали, что вихревые зоны в таком коллекторе малы, если поворот кольцевого потока к входной решетке организован торообразной поверхностью с радиусом кривизны $R_1 = 14\delta$. Движение потока над входной решеткой организуется сферической поверхностью с радиусом кривизны $R_2 = 42\delta$ с уменьшающейся высотой до значения $\delta_1 = (0,5 \dots 0,8) \delta$ на оси коллектора. Равномерность распределения расхода по трактам активной зоны определяется преимущественно величиной зазора δ_1 . Показанная на рисунке 4в равномерность распределение расхода по трактам соответствует $\delta_1 = 0,5\delta$. При этом КГС коллектора оказывается близким к единице. Согласно расчетам уровень турбулентных пульсаций скорости на входе в тракты активной зоны при этом составляет $\sim 10\%$ от среднерасходной, тогда как за полусферическим коллектором он достигает 40% .

На Рисунке 11 представлен график распределения средней скорости и пульсаций средней скорости перед входной решеткой на расстоянии 2 мм при зазоре $\delta_1 = 5$ мм для модели №3 коллекторных систем. КГС при этом составил порядка 0,8. Представленные результаты позволяют наглядно судить о распределении скоростей в сложном объеме коллектора. Приведенные результаты дают широкие возможности для повышения качества распределения потоков теплоносителя, при минимальных потерях давления на них.

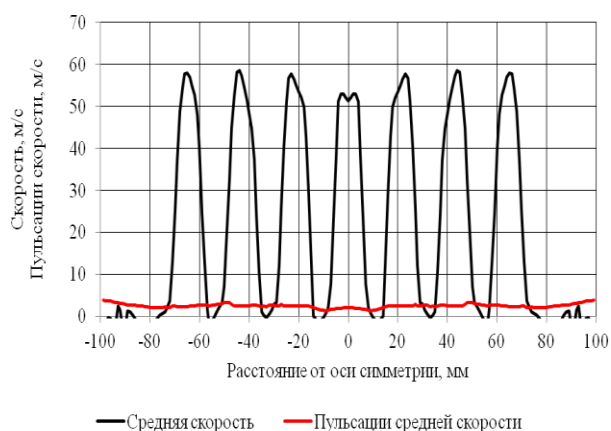


Рисунок 11. Значения средней скорости и турбулентных пульсаций скорости перед входной решеткой коллектора модели №3

В заключении приводятся основные выводы и результаты работы. Делается заключение о влиянии на распределение расхода кольцевого тракта, пористости входных решеток, конструкции дефлекторов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнено исследование, с использованием трех вариантов проектных решений газодинамического контура реакторной газоохлаждаемой установки, позволившие установить что:

- при длине кольцевого тракта от входных патрубков до раздаточного коллектора в пределах от 17 до 44 гидравлических диаметров кольцевого тракта и числе подводящих патрубков от 4 до 16 с диаметром, составляющим до 3,25 диаметра кольцевого тракта на входе в раздаточный коллектор распределение расхода теплоносителя равномерно по периметру кольцевого тракта;

- течение в раздаточном коллекторе полусферической или полуэллиптической формы характеризуется наличием торообразного вихря, форма которого зависит от гидравлического сопротивления имитатора активной зоны;

- течение в сборном коллекторе и выходных патрубках мало влияет на характеристики течения в имитаторе активной зоны.

2. Получены новые экспериментальные данные о гидравлических сопротивлениях, распределениях скоростей в характерных областях газодинамических трактов, образовавшие банк результатов для валидации кодов, используемых в проектных обоснованиях трактов теплоносителя.

3. Разработаны и обоснованы расчетные модели анализа характеристик течения в трактах теплоносителя с использованием $k - \epsilon$ модели турбулентности и ПК ANSYS CFX. Показано, что результат расчетов с использованием неструктурированных расчетных сеток соответствует результатам экспериментов с погрешностью в пределах 10-15 %, что сравнимо с погрешностью экспериментальных данных.

4. Получены экспериментальные значения КГС раздаточного коллектора, составляющие от 2,6 до 5,6 скоростного напора потока в кольцевом тракте подвода теплоносителя. Применение дефлекторов с трактами раздачи теплоносителя между корпусом коллектора и корпусом дефлектора увеличивает КГС раздаточного коллектора (до 31).

5. Предложено компактное распределительное устройство, препятствующее образованию торообразного вихря в раздаточном коллекторе и обеспечивающее распределение расхода по сечению активной зоны близкое к равномерному. КГС предложенного компактного распределительного устройства порядка единицы.

Основные публикации по теме диссертационной работы:

1. Использование индивидуальных дроссельных устройств для гидравлического профилирования расхода теплоносителя в модели реактора / Сатин А.А. и [др] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение, 2014, №4. С. 12-24 (1,0 п.л./0,9 п.л.).

2. Сатин А.А., Солонин В.И., Гетья С.И. Использование распределительных устройств для гидравлического профилирования расхода теплоносителя в активной зоне газоохлаждаемого реактора // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание, 2014, №9. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/726747.html> (дата обращения 01.12.2017) (0,875 п.л./ 0,775 п.л.).

3. Сатин А.А., Солонин В.И., Гетья С.И. Влияние геометрии коллектора на распределение расхода теплоносителя в активной зоне модели реактора // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание, 2015, №6. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/786377.html> (дата обращения 01.12.2017) (0,688 п.л./ 0,5 п.л.).

4. Опыт валидации CFD-кодов при создании моделей расчета гидродинамики и тепло-массообмена в ядерный реакторах/ Сатин А.А. и [др]// Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике: Тез. докл. Научно-технический семинар. Нижний Новгород. 2016. С. 82. (0,06 п.л./0,04 п.л.).

5. Сатин А.А., В.И. Солонин, П.В. Марков. Использование CFD-моделирования для прогнозирования и анализа результатов физических экспериментов // Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике: Тез. докл. Научно-технический семинар. Нижний Новгород. 2016.62. (0,06 п.л./0,03 п.л.).

6. Сатин А.А., Солонин В.И. Влияние сборного коллектора и распределительных устройств на профилирование расхода теплоносителя перед активной зоной // Конференция молодых специалистов АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»: Сб. докладов. Подольск. 2016, Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms-2016/documents/kms2016-037.pdf> (дата обращения 01.12.2017) (0,687 п.л./0,585 п.л.).

7. Сатин А.А., Солонин В.И. Использование распределительных устройств для гидравлического профилирования расхода теплоносителя в активной зоне// Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика-2015): Тез. докл. Обнинск. 2015. С.126-127. (0,127 п.л./0,1 п.л.).

8. Сатин А.А., Солонин В.И. Использование распределительных устройств для гидравлического профилирования расхода теплоносителя в активной зоне// Вопросы атомной науки и техники. Ядерно-реакторные константы, 2016, № 3. С. 156-165. (1,0 п.л./0,9 п.л.).

9. Сатин А.А., В.И. Солонин. Влияние геометрии входного коллектора на распределение расхода теплоносителя перед активной зоны модели газовой реакторной установки // Инновации в атомной энергетике: Сб. докл. конф.. М.: Изд.-во АО «НИКИЭТ», 2015, С. 273-280. (1,0 п.л./0,9 п.л.).

10. Сатин А.А. Моделирование газодинамического контура газоохлаждаемой реакторной установки для атомных станций малой мощности // Атомные электрические станции сверхмалой мощности для прикладных и учебных целей: Тез. докл. Российская конф. молодых ученых, специалистов, аспирантов, Обнинск, 21-23 июня 2016 г, С. 24-25. (0,125 п.л.).

Подписано к печать: 15.02.18
Объем 1,25 п.л.
Тираж 100 экз. Заказ №76
Отпечатано в типографии «Реглет»
г. Москва, Ул. Фридриха Энгельса
3-5с2
8 (499) 267-54-64