

# **РАБОТЫ АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» ПО РЕАЛИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА НИОКР «ВНЕДРЕНИЕ CFD МЕТОДОВ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОБОСНОВАНИЯ ПРОЕКТОВ».**

## **ЗАДАЧИ, СОСТАВ И ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ**

**М.А. Быков, М.М. Курносов**

### **1. Введение**

С 2016 г. АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» ведет работы по инвестиционному проекту НИОКР «Внедрение CFD-методов для поддержки проектирования и обоснования проектов» (далее Проект). Проект рассчитан на период до 2020 г. включительно.

Работы Проекта относятся сразу к нескольким тематическим направлениям научно-технической конференции «Проблемы применения и верификации CFD кодов в атомной энергетике»:

- опыт постановки и проведения экспериментальных исследований с целью подготовки верификационной базы для CFD программ;
- опыт адаптации и верификации CFD программ для решения актуальных задач атомной энергетики;
- результаты применения CFD программ для решения прикладных задач.

Работы по расчетно-теоретическому сопровождению Проекта ведутся в тесном сотрудничестве с ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Кроме того, в Проекте участвуют (научно-техническая поддержка экспериментальных работ, изготовление моделей и оснастки) и другие организации атомной отрасли - АО «ОКБМ Африкантов», ИТ СО РАН. Данный Проект также связан с работами по теме создания системного расчетного кода нового поколения (основной исполнитель – ФГУП «НИТИ им. Александра»).

В ходе выполнения работ Проекта должны быть получены:

- экспериментальные данные для верификации расчетных моделей и наборы верифицированных расчетных моделей типовых элементов оборудования РУ с ВВЭР;
- методики и технологии применения расчетных моделей при обосновании проектов РУ.

Под расчетной моделью в данном случае понимается совокупность математической модели (общей системы математических соотношений, описывающих изучаемое явление) с программным средством, настраиваемыми параметрами математических соотношений, граничными и начальными условиями, расчетной схемой (сеткой) и другими факторами, позволяющими использовать общую математическую модель для изучения конкретного объекта (в данном случае – моделируемого узла РУ применительно к определенному расчетному режиму (группе режимов), характеризующемуся определенным диапазоном изменения режимных параметров). Расчетные модели типовых узлов РУ могут быть использованы с минимальными корректировками для различных проектов РУ с ВВЭР, с сохранением всех основных математических и методических подходов.

### **2. Состав работ Проекта**

В соответствии с утвержденными документами Проекта, работы параллельно ведутся по двум направлениям:

- экспериментальное обоснование (цель - получение данных для верификации и валидации расчетных моделей CFD);
- расчетно-теоретическое сопровождение:
  - 1) разработка расчетных моделей узлов (рабочих участков) экспериментальной установки;
  - 2) выполнение работ по отладке и верификации разработанных расчетных моделей узлов (рабочих участков) ЭУ на экспериментальных данных, полученных в ходе реализации Проекта;

3) разработка и верификация расчетных моделей натуральных узлов РУ типа ВВЭР с учетом данных, полученных на моделях узлов экспериментальной установки.

Работы по этапам 2 и 3 могут выполняться параллельно для сокращения суммарного времени выполнения.

Данные, полученные при выполнении верификации расчетных моделей узлов (рабочих участков) ЭУ, будут в дальнейшем использоваться для отработки расчетных моделей натуральных типовых узлов РУ типа ВВЭР. Вследствие этого, на моделях узлов ЭУ должны быть отработаны подходы к моделированию натуральных узлов РУ ВВЭР, включая расчетное и теоретическое обоснование модельности и влияние масштабного фактора.

Перечень рассматриваемых в Проекте задач экспериментального и расчетного моделирования включает в себя следующие актуальные с точки зрения обоснования проектов РУ с ВВЭР темы:

- перемешивание потоков теплоносителя с различной температурой в НКР при подаче воды САОЗ в ГЦТ и непосредственно в реактор (задача - обоснование сопротивления хрупкому разрушению (СХР) корпусов реакторов);

- межпетлевое перемешивание теплоносителя при работе полного и частичного числа ГЦНА (задача - поддержка системных теплогидравлических кодов, предназначенных для обоснования безопасности РУ);

- изучение течения теплоносителя в пучках стержней, в том числе в пучках ТВЭЛОВ, как с перемешивающими решетками, так и без них (задача – поддержка и кроссверификация специализированных ячеечных кодов, в отдельных случаях - расчеты локальных параметров в пучках стержней);

- моделирование температурных пульсаций в узлах РУ при смешении потоков теплоносителя с разной температурой, на примере тройниковых соединений трубопроводов (задача – моделирование температурного нагружения узлов, развитие инженерных методик определения граничных условий (ГУ) для обоснования циклической прочности и СХР, в отдельных случаях – прямые расчеты ГУ).

Подробное описание вышеуказанных задач приведено в разделе 6 (при описании расчетных моделей натуральных узлов РУ ВВЭР).

Разработка расчетных моделей выполняется с учетом рекомендаций Агентства по атомной энергии Организации экономического сотрудничества и развития по применению программ вычислительной гидродинамики для задач обоснования объектов использования атомной энергии, а также рекомендаций ASME.

Расчетные модели также должны разрабатываться, исходя из целей работы, класса и параметров рассматриваемой задачи, и целевых параметров расчетных моделей (приведены в таблицах 1 и 2).

Основным программным средством при выполнении расчетных работ Проекта является программный комплекс ЛОГОС (разработчик - ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»). В рамках Проекта был выполнен анализ применимости кода ЛОГОС для задач Проекта. Для выполнения кросс-верификационных расчетов используются альтернативные программные средства - коды STAR-CCM+ или ANSYS CFX. Это позволяет повысить достоверность результатов, облегчить отладку расчетных моделей и подготовить материалы для последующей аттестации кода ЛОГОС применительно к проектным расчетам РУ типа ВВЭР.

### **3. Выполненные работы Проекта**

По Проекту выполнены основные подготовительные работы:

- разработаны технические задания
  - на НИР в целом,
  - на универсальный гидравлический стенд,
  - на прозрачные модели,
  - на расчетные модели;
- разработана программа и методика испытаний (исследований);

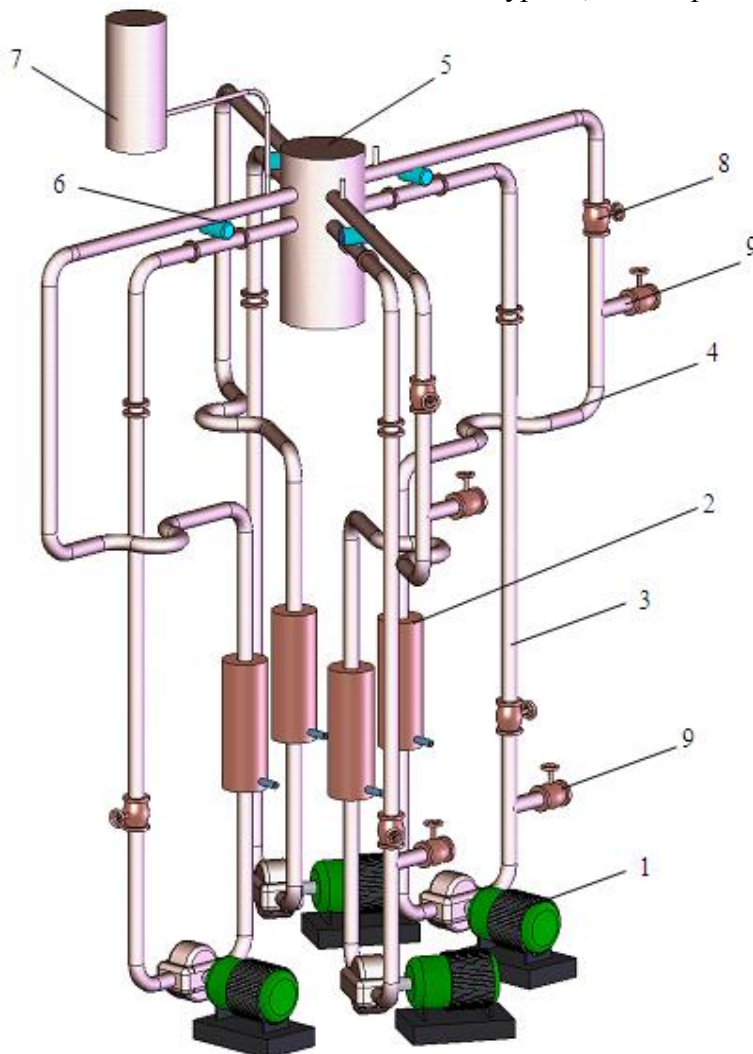
- разработана рабочая конструкторская документация на прозрачные модели и экспериментальную установку - универсальный гидравлический стенд (УГС), гидравлическая и электрогидравлическая схемы стенда.

Все вехи Проекта за 2016 и 2017 гг. были успешно выполнены.

#### 4. Экспериментальное оборудование

В настоящее время по экспериментальной части Проекта ведутся строительномонтажные работы по сооружению экспериментальной установки УГС. В первом полугодии 2019 года на стенде должны быть проведены пусконаладочные работы, включая настройку системы измерений. Экспериментальные работы по Проекту планируются на 2019 год.

Создаваемый универсальный стенд позволяет проводить исследования на моделях различного оборудования РУ и состоит из нескольких контуров (схема приведена на рисунке 1).



1 - циркуляционный насос; 2 - расширитель; 3 - напорная нитка петли; 4 - обратная нитка петли; 5 – прозрачная модель реактора; 6 - расходомерное устройство; 7 - компенсатор давления; 8 – дополнительная запорная арматура ГЦК; 9 – запорная арматура байпасного гидравлического контура

Рис. 1 – Схема четырёхпетлевого гидравлического контура

Четырёхпетлевой гидравлической контур универсального стенда предназначен для проведения исследований процессов перемешивания петлевых потоков теплоносителя на прозрачной модели реактора типа ВВЭР. Данная установка объединяет модель реактора

ВВЭР, выполненную в масштабе 1:5, главный циркуляционный контур, а также вспомогательные системы.

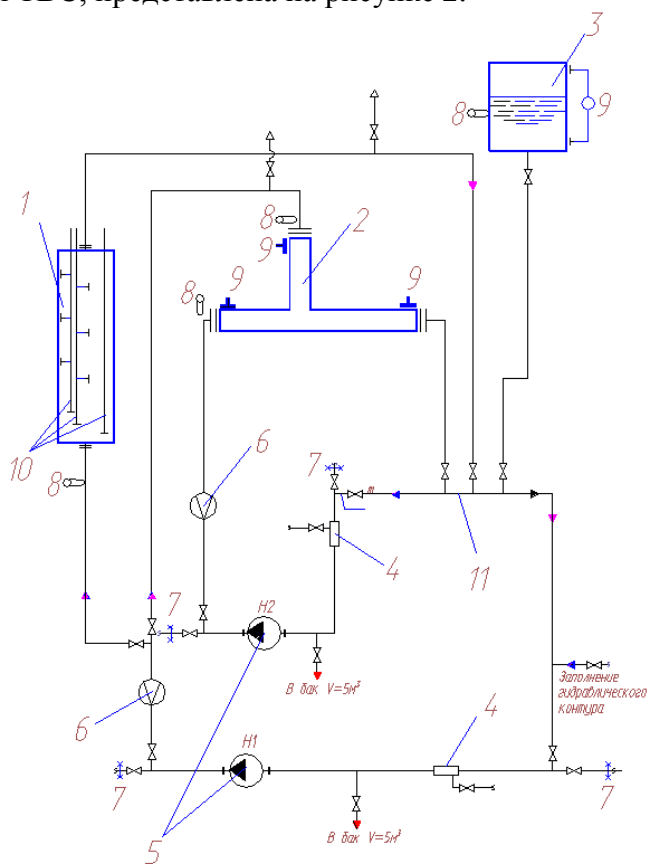
Основные параметры гидравлического контура ЭУ УГС:

- теплоноситель – вода;
- температура воды до 25 °С;
- давление в контуре до 0,5 МПа;
- расход по петлям модели РУ до 300 м<sup>3</sup>/ч;
- расход на участке с моделью ТВС до 300 м<sup>3</sup>/ч;
- расход на участке с моделью тройникового соединения трубопроводов (ТСТ):
- подача по основному трубопроводу до 94 м<sup>3</sup>/ч;
- подача по боковому трубопроводу до 156 м<sup>3</sup>/ч;
- суммарный расход на выходе из модели до 250 м<sup>3</sup>/ч.

На циркуляционных петлях № 3 и № 4 предусмотрены отводы для подключения трубопроводов гидравлического контура, входящего в состав универсального стенда, предназначенного для:

- изучения течения в модели тройникового соединения трубопроводов, 4 съемные модели ТСТ разных размеров;
- изучения течения в полномасштабной в поперечном сечении модели ТВС с натурными дистанционирующими решетками.

Принципиальная схема гидравлического контура, предназначенного для изучения течения в ТСТ и в модели ТВС, представлена на рисунке 2.



- 1 – колонка с моделью ТВС; 2 – модель ТСТ; 3 – резервный бак 1,5 м<sup>3</sup>; 4 – расширители;  
 5 – циркуляционные насосы; 6 – электромагнитный расходомер; 7 – границы ГЦК;  
 8 – термометр сопротивления; 9 – измерение перепадов давления;  
 10 – зонды отбора статического давления; 11 – коллектор

Рис. 2 – Принципиальная схема контура для изучения течения в моделях ТСТ и ТВС

Исследование течения теплоносителя в модели ТВС, изготовленной в увеличенном масштабе ( $M=7,14:1$ ), проводятся на большом контуре аэродинамического стенда. Цель - получение детальных полей продольных и поперечных скоростей в межтвэльном пространстве с выделением вторичных течений в поперечном сечении пучка.

Аэродинамический стенд имеет следующие рабочие параметры:

- рабочая среда – воздух, температура от 20 до 30 °С;
- напор на входе в модель не более 12,0 кПа;
- расход воздуха через модель до 15000 м<sup>3</sup>/ч.

Для выполнения исследований полей скоростей и полей концентраций, как на модели реактора, так и на моделях ТВС и ТСТ, будет использоваться специальная оптическая система. Измерения, выполняемые с помощью данной оптической системы, основаны на следующих методах:

– PIV (Particle Image Velocimetry) – оптический метод, основанный на регистрации и обработке нескольких изображений, на которых зафиксированы изображения частиц в два момента времени, в результате которой воспроизводятся (визуализируются) поля скоростей в выбранном сечении потока. PIV – метод позволяет измерять несколько компонент вектора скорости в выбранном сечении потока газа или жидкости;

– PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) – метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции, основан на свойстве флуоресцентных красителей переизлучать свет, спектральный состав которого отличается от спектрального состава возбуждающего излучения. PLIF-метод позволяет регистрировать мгновенные распределения температуры или концентрации трассера в жидкости.

## **5. Расчетные работы Проекта 2018 года**

По расчетной части Проекта в настоящее время ведется разработка расчетных моделей узлов (рабочих участков) экспериментальной установки и проводятся предтестовые расчеты.

Верификация расчетных моделей узлов экспериментальной установки будет проведена после получения и обработки экспериментальных данных.

Состав экспериментальных и расчетных моделей, задачи исследований и целевые параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Объекты и цели исследований, перечень моделей узлов (рабочих участков) экспериментальной установки и измеряемые параметры

№	Задачи исследований	Цель работы с точки зрения обоснования проектов РУ с ВВЭР	Модели (экспериментальные и расчетные), экспериментальные установки	Результаты исследований (целевые параметры для верификации расчетных моделей)
1	Перемешивание потоков теплоносителя с различной температурой в НКР при подаче воды САОЗ в ГЦТ и непосредственно в реактор	Обоснование СХР КР и трубопроводов РУ с ВВЭР: - развитие и кроссверификация программы ОКБМИКС (расчеты в обоснование СХР корпусов реакторов РУ с ВВЭР); - прямые расчеты параметров в НКР для режимов, не охватываемых ПС ОКБМИКС/ Переходные и аварийные режимы (ГЦНА отключены или на выбеге) Расходы в петлях на уровне ЕЦ (примерно 6 % от номинального) и ниже	1) Модель реактора ВВЭР-1500 в масштабе 1:5, доработанная для применения оптических систем измерений. Универсальный стенд. 2) Модель реактора ВВЭР-1000 в масштабе 1:5, 4-х петлевой стенд	Две или три составляющие вектора скорости в массиве точек проточного тракта НКР Концентрация трассера в НКР Концентрация трассера в баке запаса Расходы воды по каждой петле и от САОЗ Давление
2	Межпетлевое перемешивание теплоносителя при работе полного и частичного числа ГЦНА	Модернизация моделей перемешивания в программах контурной теплогидравлики. Модернизация существующих и разработка новых моделей перемешивания для кодов связанного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета с трехмерной и точечной нейтронной кинетикой (КОРСАР /ГП, ТРАП-КС).	Модель реактора ВВЭР-1500 в масштабе 1:5 с прозрачным корпусом (рабочая среда – вода). Универсальный стенд	Две или три составляющие вектора скорости в массиве точек проточного тракта в НКР Концентрация трассера в НКР Концентрация трассера в баке запаса Расходы воды по каждой петле и от САОЗ Давление
3	Изучение течения теплоносителя в пучках стержней, в том числе в пучках ТВЭЛОВ	Обоснование надежности охлаждения ТВС активных зон РУ с ВВЭР в стационарных режимах. Поддержка и развитие ячеечных и	1) Полномасштабный по сечению пучок ТВЭЛОВ в масштабе 1:1 (рабочая среда – вода) Универсальный стенд	Исследования распределения по сечению пучка средних скоростей теплоносителя в элементарных ячейках:

№	Задачи исследований	Цель работы с точки зрения обоснования проектов РУ с ВВЭР	Модели (экспериментальные и расчетные), экспериментальные установки	Результаты исследований (целевые параметры для верификации расчетных моделей)
		<p>общеконтурных теплогидравлических кодов (ТИГР-СП, КОР-САР/ТП и др.)</p>	<p>2) Пучок твэлов в увеличенном масштабе (рабочая среда – воздух). Аэродинамический стенд</p>	<p>- средняя по сечению элементарных ячеек скорость воды в верхней части пучка, в том числе и за блокировкой; - концентрация трассера; - расход на входе в модель; - температура на входе в модель; - перепад давления на модели пучка</p>
4	<p>Моделирование температурных пульсаций в узлах РУ при смещении потоков теплоносителя с разной температурой</p>	<p>Обоснование циклической прочности оборудования РУ Разработка методической базы для обоснования прочности оборудования РУ при нестационарных (в том числе периодических) воздействиях Учет температурного нагружения при турбулентных пульсациях температуры для различных узлов РУ Исследование переносимости результатов экспериментов и расчетов узлов экспериментальной установки на натурные узлы РУ</p>	<p>Рассматриваются тройниковые соединения трубопроводов (ТСТ) - прозрачные модели ТСТ 4-х размеров (рабочая среда – вода). Универсальный стенд Две пары моделей ТСТ в масштабе 1:2 по отношению друг к другу для исследования влияния масштабного фактора и соотношения диаметров на процессы перемешивания</p>	<p>Поля скоростей и концентраций трассера, полученные оптическими методиками: - две или три составляющие вектора скорости в массиве точек в проточном тракте ТСТ; - концентрация трассера и ее пульсации во времени в массиве точек в проточном тракте ТСТ; - расход воды на входе в основной и боковой трубопроводы; - давление на входе в основной трубопровод</p>

### 6. Планируемые работы 2019 года

По экспериментальной части Проекта в 2019 году предполагается проведение пусконаладочных работ и в дальнейшем проведение экспериментальных работ. К концу 2019 года основная часть экспериментальных работ Проекта должна быть завершена.

По расчетной части Проекта на 2019 год планируется выполнение работ по разработке расчетных моделей натуральных узлов РУ ВВЭР. Расчетные модели, требования по моделированию и целевые параметры приведены в таблице 2. Пояснения по задачам приведены далее по тексту и на рисунках 3 – 8.

Таблица 2 – Разрабатываемые расчетные модели натуральных узлов РУ ВВЭР и их целевые параметры

№	Разрабатываемая расчетная модель	Задача в обосновании проекта	Целевые параметры расчетных моделей Требования по моделированию
1	<p>Расчетная модель реактора ВВЭР-1200 (В-491) для исследований течения в напорной камере</p>	<p>1 а) Моделирование перемешивания в НКР при подаче воды от САОЗ в ГЦТ и непосредственно в реактор (определение граничных условий по теплоотдаче для задач обоснования прочности)</p> <p>1 б) Моделирование межпетлевого перемешивания при работе на полном и частичном числе ГЦН (для задач поддержки и кроссверификации системных кодов и специализированного программного обеспечения)</p>	<p>Задача 1 а (рисунок 3):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Геометрические параметры «языка» холодной воды в НКР (ширина, угол раскрытия);</li> <li>- Локальные скорости течения, прежде всего осевая скорость на оси «языка»;</li> <li>- Температура на оси «языка» и ее распределение по ширине «языка» (включая изменение по длине «языка»), а также температура фона (вне «языка» холодной воды).</li> </ul> <p>Задача 1 б:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Поля скоростей в НКР и на входе активную зону;</li> <li>- Поля температур в НКР и на входе активную зону;</li> <li>- Поля концентраций борной кислоты в НКР и на входе активную зону.</li> </ul> <p>Интересующей областью при моделировании является опускной канал и область нижнего днища (для моделей 1а и 1б), и вход в активную зону (только для модели 1б). В указанной области обеспечивается гидродинамическое подобие, воспроизведение проходных сечений, гидравлических сопротивлений и корректное распределение расходов на входе в активную зону.</p> <p>Модель 1а выполняется с детальной проработкой напорной камеры - опускного канала, входных патрубков реактора и патрубков САОЗ. Во входных патрубках реактора предусмотрена возможность моделирования «ручьев» холодной воды от САОЗ, подаваемой через трубопроводы, подсоединенные к холодным ниткам ГЦТ.</p> <p>Модель 1б выполняется с детальной проработкой напорной камеры - опускного канала и области эллиптического днища до входа в активную зону включительно, и входных патрубков реактора.</p> <p>Для модели 1а предусмотрена возможность моделирования режимов с образованием уровня в НКР, со следующими допущениями:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- межфазное взаимодействие между водой и паром не моделируется;</li> <li>- пар рассматривается как неконденсирующийся газ;</li> <li>- коэффициент теплоотдачи на поверхности раздела между водой и паром принимается постоянным.</li> </ul> <p>Предусмотрена возможность приближенного (с учетом консервативного подхода) моделирования закрутки потока вследствие работы ГЦНА и насосов САОЗ путем задания соответствующих граничных условий.</p> <p>Учитывается сопряженный теплообмен теплоноситель – стенка для выполнения расчета температурных полей в элементах корпуса реактора</p>



2	<p>Расчетная модель тепло-выделяющей сборки (ТВС-2М)</p>	<p>2 а) Расчеты температурных полей ТВС (в том числе температуры оболочки твэлов в стационарных и переходных режимах НУЭ и ННЭ) 2 б) Развитие и кроссверификация специализированного программного обеспечения (ячеечных кодов)</p>	<p>Модель должна воспроизводить следующие параметры объекта:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- перепад давления на модели в целом, а также на каждой ДР;</li> <li>- поле массовых скоростей в поперечном сечении моделей, в том числе среднюю скорость по ячейкам расчетной области (ячейки образуются между центрами трех стержней, периферийные учитывают условную или реальную границу чехла, рисунок 4);</li> <li>- распределения аксиальных и поперечных составляющих расхода (массовой скорости);</li> <li>- поле температур теплоносителя в поперечном сечении моделей.</li> </ul> <p>Также определяется температура стенки - средняя и максимальная для каждой ячейки, температура потока в ячейках, включая среднюю, максимальную и минимальную.</p> <p>Кроме того, воспроизводится:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- сопряженный теплообмен теплоноситель – стенка, для возможности расчета температурных полей в твэле (включая оболочку и топливо) и конструктивных элементах ТВС.</li> <li>- учитываются неравномерности тепловыделений в аксиальном и радиальном направлении (потвэльное энерговыделение).</li> </ul>
3	<p>Расчетные модели узлов тройниковых соединений трубопроводов (ТСТ) РУ типа ВВЭР. Рассматриваются узлы с наибольшей нагруженностью:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 3а) патрубков подпитки на ГЦТ (рисунки 5, 6);</li> <li>- 3 б) узел врезки соединительного трубопровода КД в ГЦТ (рисунки 7, 8)</li> </ul>	<p>Смешение потоков теплоносителя с разной температурой для определения граничных условий и температурных полей в критических узлах оборудования РУ (для задач обоснования прочности)</p>	<p>Для каждой расчетной модели рассмотрены режимы (соотношения расходов (скоростей) по основному и боковому трубопроводам), покрывающие область режимов работы данного узла РУ в различных режимах НУЭ и ННЭ. Каждый режим рассматривается как квазистационарное состояние с постоянным соотношением расходов. Расчетная модель предусматривает использование вихререзающих методов (LES, DES и аналоги), обеспечивающих получение мгновенных значений температуры и скорости.</p> <p>Для области расчетного узла, в которой в каком – либо из рассматриваемых режимов происходит смешение потоков (зона перемешивания), определяются:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- компоненты скорости (осредненные по времени и мгновенные значения);</li> <li>- поля температур жидкости (осредненные по времени и мгновенные значения) по сечениям ТСТ, в том числе в пристеночном слое;</li> <li>- температура стенки;</li> <li>- температурное поле в металле конструкции.</li> </ul> <p>Расчетные модели предусматривают возможность выполнения расчетов как с учетом теплообмена со стенкой (в том числе в сопряженной постановке), так и в адиабатическом приближении.</p>

Ниже приведены пояснения по расчетным моделям натуральных узлов РУ ВВЭР, к описанным в таблице 2 задачам 1а, 2 (а и б), 3а и 3б.

По задаче 1а, на рисунке 3 приведена качественная картина процессов перемешивания заливаемой воды САОЗ и теплоносителя в циркуляционных петлях и опускном канале реактора.

При подаче холодной воды от САОЗ существенный подогрев происходит в месте впрыска заливаемой воды САОЗ в циркуляционную петлю. Затем, до входа в реактор, существует (в определенном диапазоне расходов воды САОЗ) встречное течение заливаемой воды и более горячего теплоносителя. Подогрев на этом участке незначителен. Следующее место, где происходит существенное перемешивание, - это вход в опускной канал реактора. Здесь происходит растекание потока заливаемой воды по наружной поверхности шахты реактора и его поворот вниз - происходит формирование струи воды более холодной, чем окружающий теплоноситель. Причем, эти места характеризуются существенным подогревом заливаемой воды САОЗ как в случае заполненного реактора, так и при наличии уровня в нём, т.е. при заливке воды САОЗ в насыщенный пар. Экспериментальные исследования также показали, что в опускном канале реактора формируется плоская, стеснённая внутренней поверхностью корпуса реактора и наружной поверхностью шахты, струя воды более холодной, чем окружающий теплоноситель.

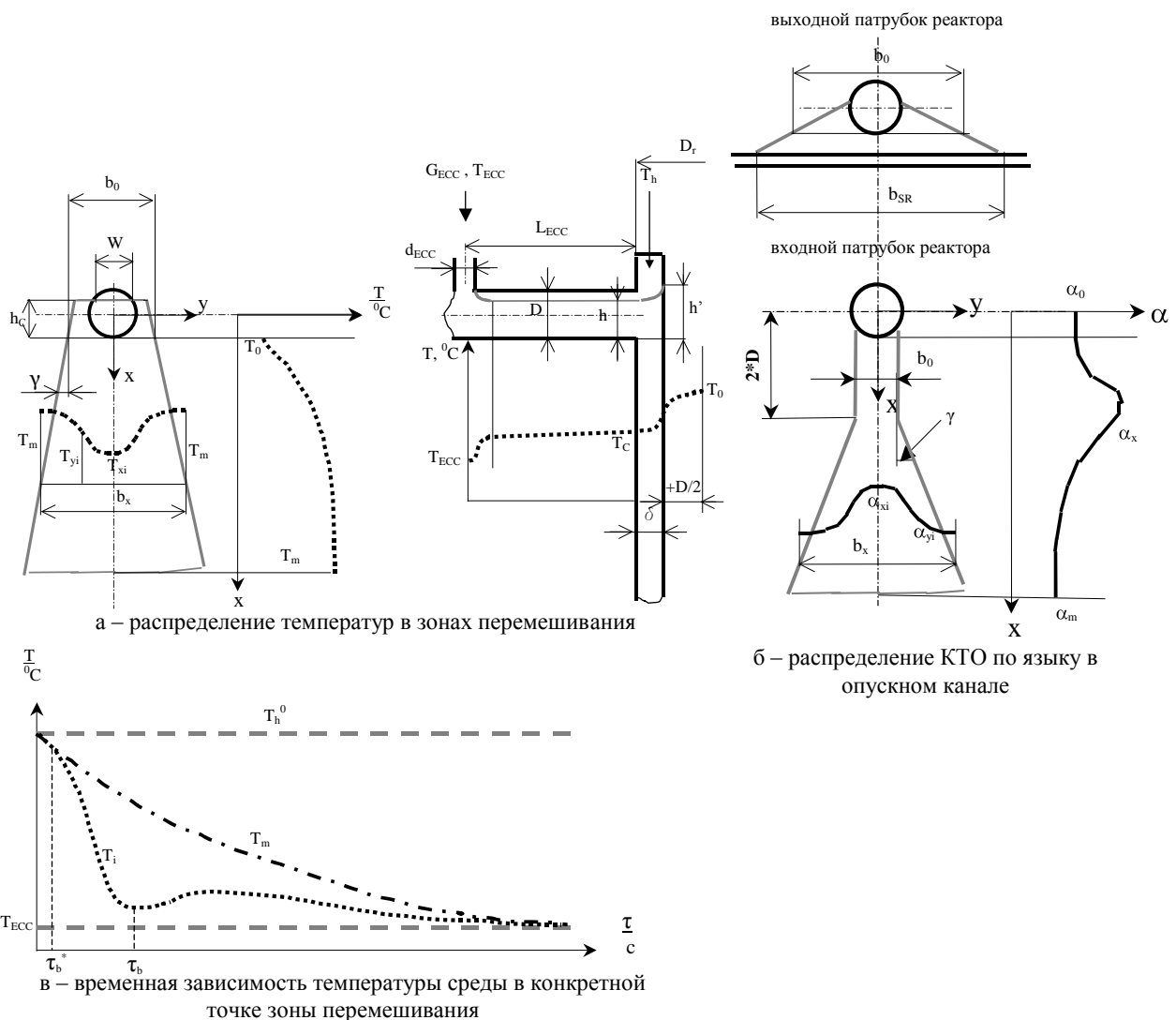


Рис. 3 - Процессы перемешивания заливаемой воды САОЗ и теплоносителя в циркуляционных петлях и опускном канале реактора

По задаче 2, на рисунке 4 на примере 19-ти стержневой сборки приведено распределение ячеек расчетной области ТВС, в которых должны быть определены параметры (массовая скорость, температура стенки и жидкости в ячейках, включая среднюю, максимальную и минимальную) для целей кроссверификации и поддержки специализированного программного обеспечения - ячейчных кодов.

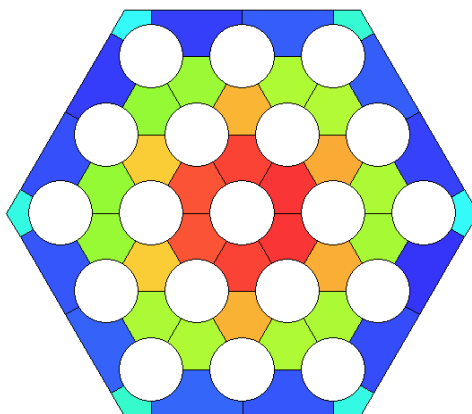


Рис. 4 - Распределение ячеек расчетной области ТВС

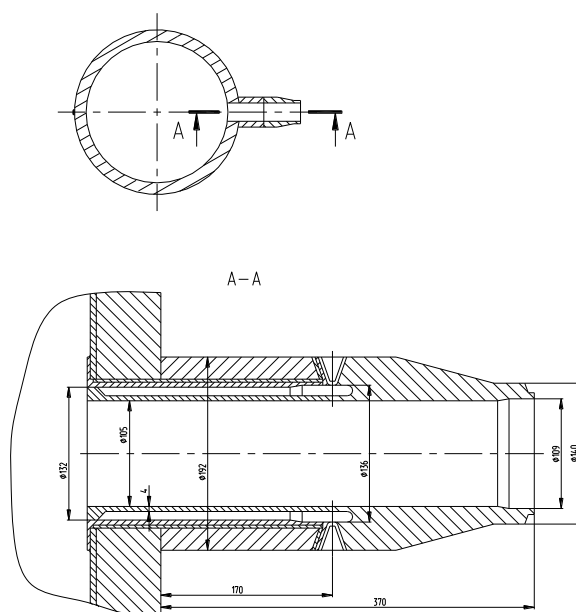


Рис. 5 - Узел врезки системы подпитки в ГЦТ

По задаче 3а, на рисунке 5 приведена конструкция узла врезки системы подпитки в ГЦТ РУ ВВЭР.

Характер течения и расположение зоны перемешивания в ТСТ определяет относительная скорость  $V_{отн} = V_{боковой} / V_{прямой}$ . На рисунке 6 показана ожидаемая картина течения (распределение безразмерной температуры

$$T^* = \frac{T - T_c}{T_h - T_c},$$

где  $T$  – значение температуры в данной точке, °С;

$T_c$  – температура холодной воды, °С;

$T_h$  – температура горячей воды, °С

в главной плоскости симметрии) в узле ТСТ при соотношении скоростей  $V_{отн}$  порядка единицы, которая может наблюдаться в узле врезки системы подпитки при больших расходах подпитки.

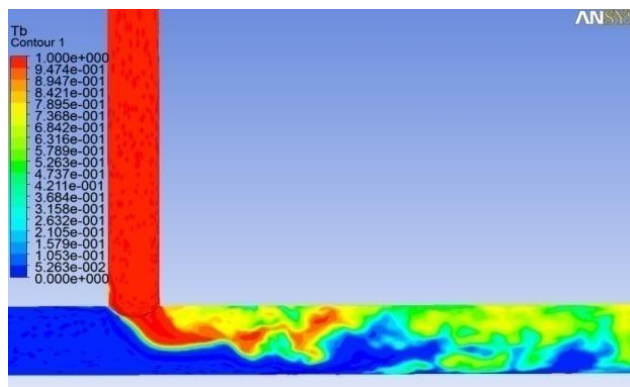


Рис. 6 - Распределение безразмерной температуры в ТСТ при соотношении скоростей в боковом и основном трубопроводах порядка единицы

По задаче 3б, на рисунке 7 приведены конструкция узла врезки соединительного трубопровода КД в ГЦТ РУ типа ВВЭР и компоновка соединительного трубопровода.

На рисунке 8а показана ожидаемая картина течения (распределение безразмерной температуры в главной плоскости симметрии) в узле ТСТ при соотношении скоростей в боковом и основном трубопроводах  $V_{отн}$ , близком к нулю (представлены результаты расчетов для значений 0,02 и 0,03), которая характерна для данного узла. Расчетные значения безразмерной температуры для некоторых точек, расположенных в пристеночной области, представлены на рисунке 8б. Необходимо отметить, что течение при таких значениях относительной скорости характеризуется нестабильностью и нестационарным отрывом потока. Фактором, дополнительно осложняющим моделирование данного узла, является наличие температурной стратификации в соединительном трубопроводе, которая накладывается на эффекты, вызванные турбулентным перемешиванием.

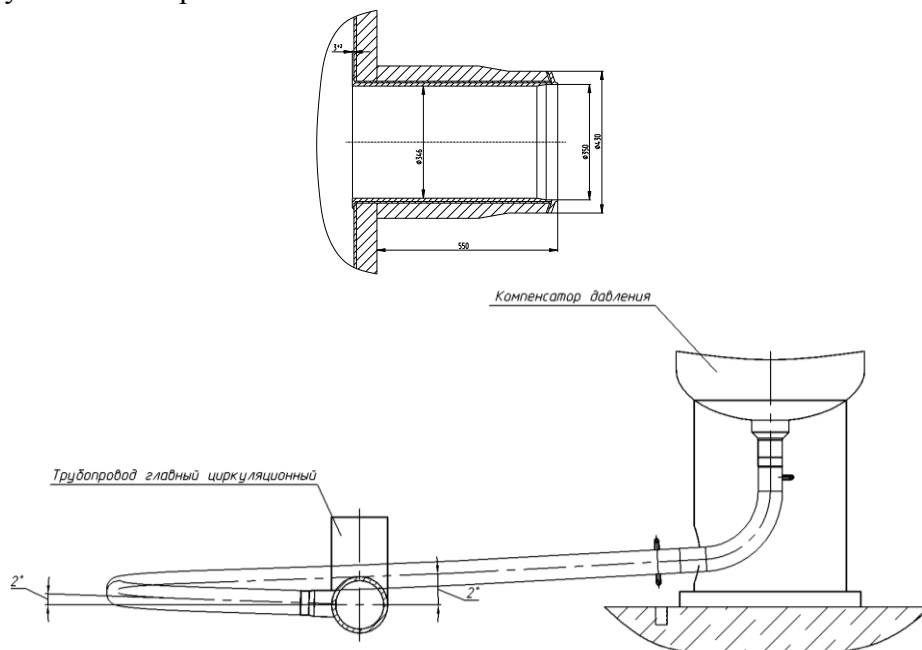
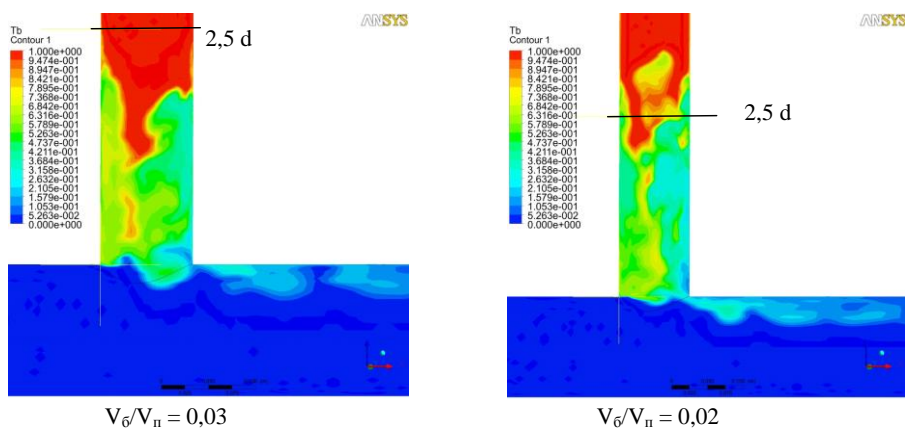
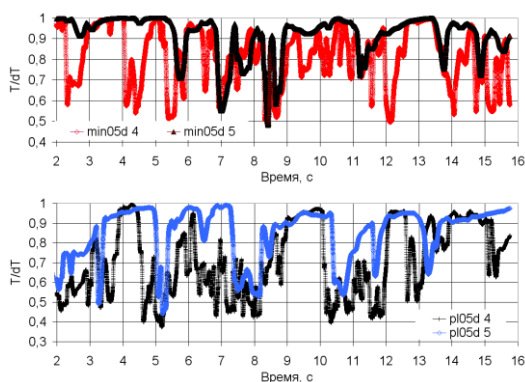


Рис. 7 - Конструкция узла врезки соединительного трубопровода КД в ГЦТ и компоновка соединительного трубопровода



а) распределение безразмерной температуры в главной плоскости симметрии



б) значения безразмерной температуры для точек в пристеночной области

Рис. 8 - Течение в ТСТ при соотношении скоростей в боковом и основном трубопроводах около нуля

## 7. Планируемые работы на дальнейший период реализации Проекта

Основными планируемыми на 2020 год и далее задачами проекта являются:

а) по экспериментальной части Проекта

- завершение экспериментальных работ;
- обработка полученных результатов;
- разработка итоговых отчетов о НИР.

б) по расчетной части Проекта:

- выполнение работ по отладке и верификации разработанных расчетных моделей узлов (рабочих участков) экспериментальной установки на экспериментальных данных, полученных в ходе реализации Проекта;
- доработка расчетных моделей натуральных узлов РУ типа ВВЭР с использованием подходов, верифицированных на моделях узлов ЭУ;
- разработка итоговых отчетов о НИР по численному моделированию.

в) создание и наполнение базы данных экспериментальных и расчетных работ Проекта;

г) постановка расчетных моделей и базы данных на баланс предприятия;

д) внедрение разработанных расчетных моделей в практику выполнения расчетного обоснования проектов РУ с ВВЭР.

## 8. Заключение

1. Приведено общее описание содержания выполненных и планируемых работ инвестиционного проекта «Внедрение CFD методов для поддержки проектирования и обоснования проектов».

2. Выполнен обзор работ Проекта, дана детализация решаемых в рамках Проекта задач в обосновании РУ с ВВЭР и текущее состояние дел по направлениям:

- экспериментальное обоснование верификации расчетных моделей на базе создаваемого экспериментального оборудования;

- расчетно-теоретическое сопровождение (разработка и верификация расчетных моделей узлов (рабочих участков) экспериментальной установки и натуральных узлов РУ типа ВВЭР).

3. Указаны наиболее проблемные и ответственные с точки зрения CFD моделирования узлы РУ типа ВВЭР и описана предполагаемая картина течения в них.

### **Принятые сокращения и обозначения**

ВВЭР	- водо-водяной энергетический реактор
ГУ	- граничное условие
ГЦТ	- главный циркуляционный трубопровод
ЕЦ	- естественная циркуляция
КД	- компенсатор давления
КТО	- коэффициент теплоотдачи
НИР	- научно-исследовательская работа
НКР	- напорная камера реактора
РУ	- реакторная установка
САОЗ	- система аварийного охлаждения зоны
СХР	- сопротивление хрупкому разрушению
ТВС	- тепловыделяющая сборка
ТСТ	- тройниковое соединение трубопроводов
ЭУ	- экспериментальная установка
CFD	- computational fluid dynamics
DES	- detached eddy simulation
LES	- large eddy simulation
RANS	- Reynolds averaged Navier-Stokes
T	- температура, °C
V	- осредненное значение скорости, м/с