

## ВЕРИФИКАЦИЯ CFD КОДОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Орехова Е.Е.<sup>1</sup>, Андреева О.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» Нижний Новгород, Россия (603950, Нижний Новгород, ГСП-41, ул. Минина, д. 24), e-mail: [katrin\\_orehova@rambler.ru](mailto:katrin_orehova@rambler.ru)

Один из самых перспективных в настоящее время источников энергии является энергия деления ядер. Но использование ядерной энергии и ядерного топлива требует обеспечения безопасности, что делает необходимым, в частности, достижение высоких показателей точности при проведении различных видов расчетов в процессе проектировании объектов ядерной энергетики. Одним из современных вычислительных методов, позволяющих сократить трудо- и временные затраты при проектировании является использование Computational Fluid Dynamics (CFD кодов) – методов вычислительной гидродинамики. CFD коды позволяют визуализировать процессы, протекающие в энергетической установке, выявить места, наиболее подверженные термическим и прочим нагрузкам. Это позволяет принять превентивные меры по выявлению и предотвращению недостатков на этапе проектирования, улучшить конструкцию или отдельный ее узел до их изготовления. Однако, в настоящее время используемые программные средства не адаптированы для решения многих задач. Необходимо разработать расчетные модели и методики расчетов различных процессов. В настоящей работе описываются попытки расчета процесса естественной циркуляции с использованием CFD кодов и сравнение полученных результатов с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: ядерная энергетика, естественная циркуляция, CFD коды, математическое моделирование

## THE CFD CODES VERIFICATION FOR THE NATURAL CIRCULATION CALCULATION

Orekhova E.E.<sup>1</sup>, Andreyeva O.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> "Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev" Nizhny Novgorod, Russia (603950, Nizhny Novgorod, street Minin, 24), e-mail: [katrin\\_orehova@rambler.ru](mailto:katrin_orehova@rambler.ru)

One current source of energy - the energy of the nuclei. The using of the nuclear energy and nuclear fuel requires specific safety rules and accuracy when performing various types of calculations, the design of nuclear power. One of the modern methods that reduce labor and time costs in the design - the use of Computational Fluid Dynamics (CFD codes) - methods of computational fluid dynamics. The CFD codes allow you to visualize the processes taking place in the volume of the power plant, to identify the places most susceptible to thermal and other stresses. This allows you to take prevention measures to improve the design or that of its host. The software is not adapted to solve many problems yet. It is necessary to develop computational models and methods of calculating of various processes. In this paper, we describe the attempts of the natural circulation calculation using CFD codes and the results of calculation are compared with experimental results.

Keywords: nuclear energy, natural circulation, CFD codes, mathematical modeling

На сегодняшний день одним из перспективных источников энергии является ядерная энергия. Теплотворная способность и энерговыделение ядерного топлива значительно выше аналогичных показателей у угля и любого другого органического топлива, используемого на сегодняшний день. Строительство атомной электростанции (АЭС), например, мощностью 1200 МВт оказывается в ряде районов выгоднее, чем строительство ТЭС аналогичной мощности.

Еще большее значение данное свойство ядерного топлива имеет для транспорта: судно может обходиться без перезагрузки топлива в течении нескольких лет.

Однако использование ядерной энергии требует обеспечения безопасности объекта энергетики. Для этого используют активные и пассивные устройства и системы безопасности. Особенно интересно использование пассивных систем и устройств, когда система отключается или реагирует на возникшие отклонения от нормальной эксплуатации без вмешательства человека. Одним из проявлений ориентации на использование пассивных систем и устройств является отказ от циркуляционных насосов и применение естественной циркуляции теплоносителя в реакторном оборудовании [2,4,5]. В связи с этим в настоящее время много работ посвящено исследованию процесса естественной циркуляции, ее изучению и моделированию.[1]

### **CFD коды**

Использование ядерной энергии требует обеспечения безопасности объектов энергетики. Это, в частности, объясняет высокие требования к точности при проектировании устройств и конструкций. Для более точного понимания процессов, происходящих внутри проектируемых объектов, проводятся модельные эксперименты, строятся математические модели объектов. В настоящее время особенно актуально в связи с этим применение CFD кодов (методов вычислительной гидродинамики), позволяющих визуализировать происходящие внутри исследуемых объектов процессы, выявить энергонапряженные узлы и элементы, и уже на стадии проектирования предпринять меры по исправлению выявленных недостатков. [6]

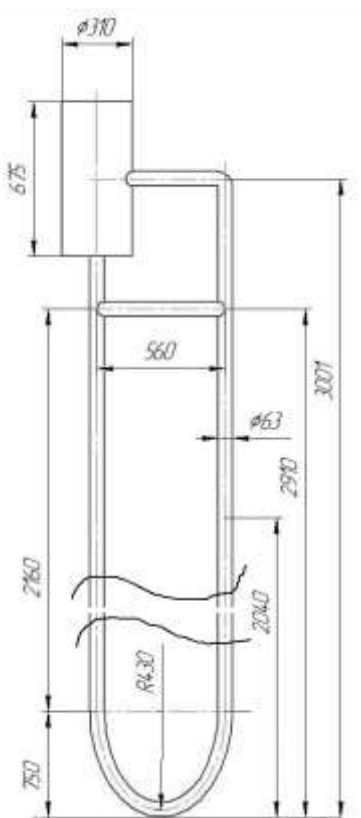
Однако для использования CFD кодов необходимо адаптировать их под конкретную задачу, создать и опробовать модель, описывающую конкретный процесс. И, как результат, верифицировать расчетное средство для решения этой конкретной задачи.

### **Цель работы**

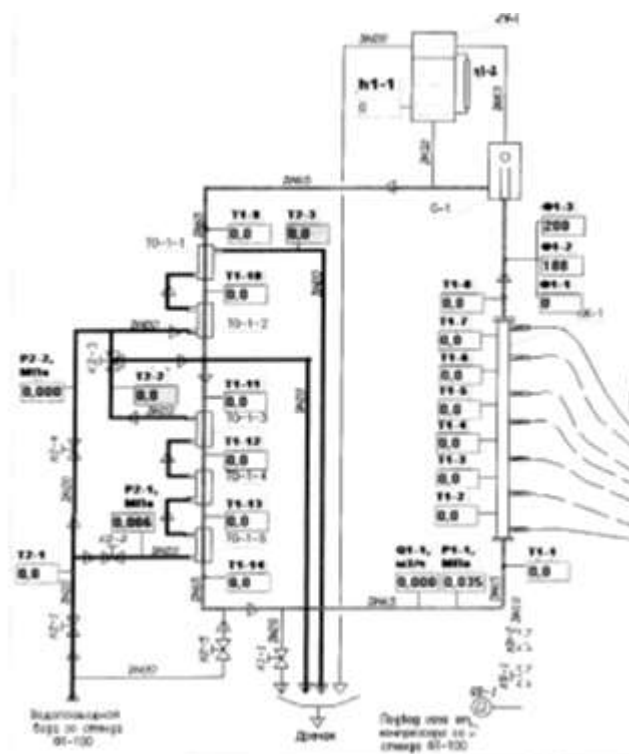
В данной работе исследуется процесс естественной циркуляции, а так же предприняты попытки моделирования данного процесса с использованием современных расчетных средств – CFD кодов.

### **Решение поставленной задачи**

Для решения поставленной задачи первоначально была проведена серия экспериментов на циркуляционном стенде ФТ-101, находящемся на кафедре «Ядерные реакторы и энергетические установки» института ядерной энергетики и технической физики НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Схема стенда представлена на рисунке 1 [3]



а)



б)

Рис.1. Схема циркуляционного стенда: а) схема циркуляционного тракта, б) схема расположения средств теплофизического контроля

В состав установки входят:

- бак с водой;
- нагревательный участок трубы;
- холодильники ТО 1-1 ÷ ТО 1-5;
- термоэлектрические термометры Т 1-1 ÷ Т 1-6;
- средства теплофизического контроля.

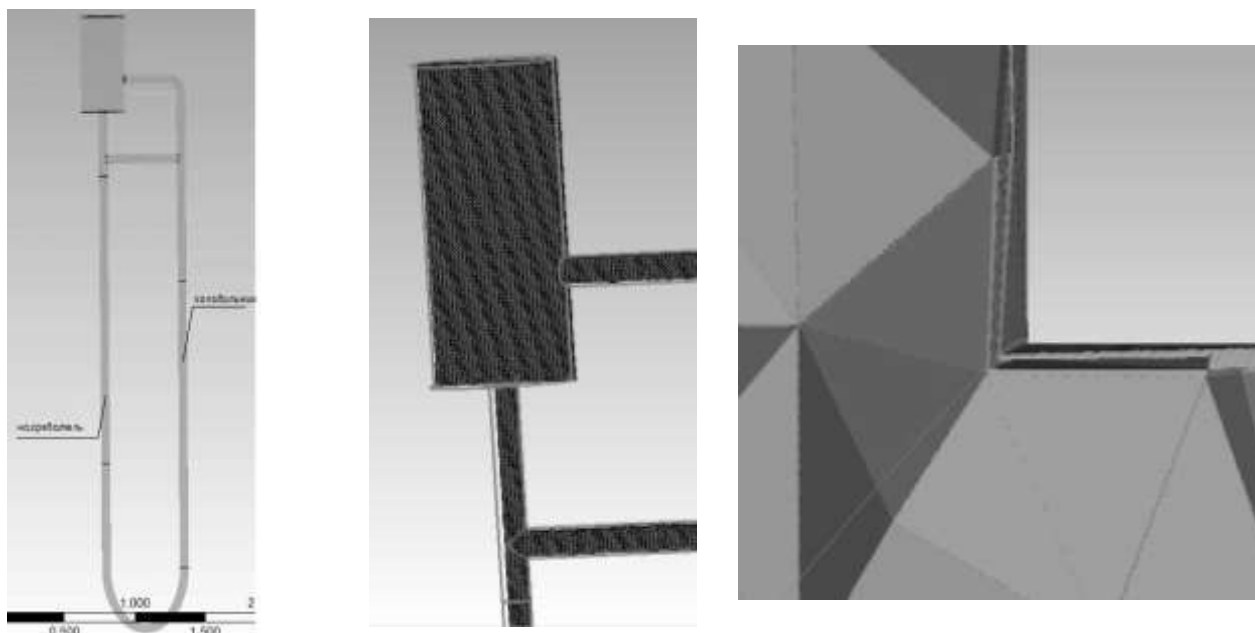
Параметры эксперимента представлены в таблице 1:

Таблица 1

Давление в контуре:		1 атм	
N нагревателя, кВт		10	
T холодильника, °C		10	
Температуры термопар при установившемся режиме:	Нагреватель	1	75
		2	77
		3	82
	Холодильник	1	80

		2	77
		3	75

Данный стенд был смоделирован для расчетов с применением CFD кодов. На рисунке 2 представлена 3-D модель стенда, сеточные элементы и пограничные призматические слои. Сеточная модель состоит из 1,2 млн элементов, призматический слой – 3 ряда.



а)

б)

в)

Рис.2. а) 2-D модель стенда, б) сеточные элементы, в) призматические слои

Построенная сеточная модель была экспортирована в расчетную программу.

Заданные расчетные параметры:

Жидкость: вода

Теплофизические параметры: библиотечные

Сила гравитации: по оси X  $-9,81 \text{ м}^*/\text{с}^2$

Давление 1 атм;

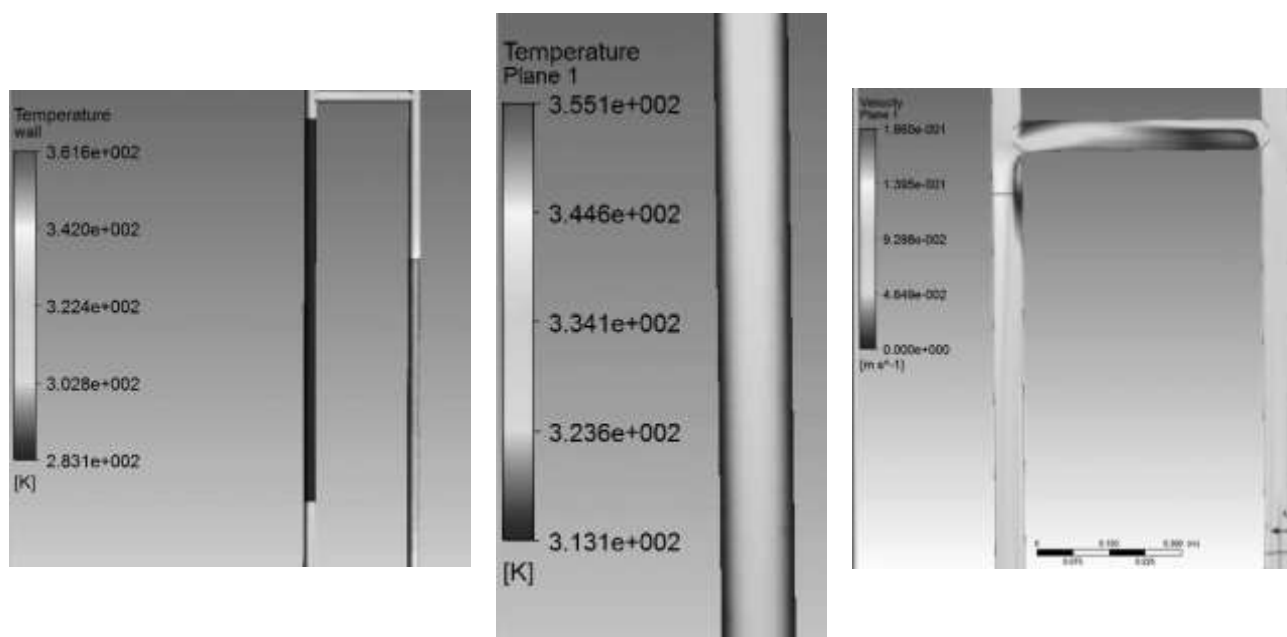
Модель турбулентности: SST модель

Способ теплообмена – тепловой поток;

Нагреватель: тепловой поток  $25000 \text{ Вт}/\text{м}^2$

Холодильник: Температура  $10^\circ \text{ C}$ .

На рисунке 3 представлены результаты расчетов



а) б) в)

Рис. 3. а) распределение температур по стенке циркуляционного канала,  
 б) распределение температур в центральном сечении холодильника,  
 в) распределение скоростей в верхней части циркуляционного канала

Полученные результаты и сравнение виртуального и натурного результатов представлены в таблице 2.

**Таблица 2**

Сравнение результатов натурного и виртуального экспериментов

Температуры термопар при установившемся режиме:	Тип участка	№ Термопары	Натурный эксперимент, Тн	Виртуальный эксперимент, Тв	δ, % относительная погрешность
		Нагреватель	1	75	72
2			77	75	2,5
3			81	85	5
Холодильник		1	80	60	25
		2	77	57	25
		3	60	45	25

**Заключение**

В данной работе предпринята попытка расчета процесса естественной циркуляции для экспериментальной установки имитирующей циркуляционный контур с применением CFD кодов.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы: процесс естественной циркуляции удалось смоделировать на виртуальной модели стенда, жидкость циркулировала из-за разности плотностей. Температура горячей жидкости в установившемся режиме в виртуальном эксперименте соответствует температуре жидкости аналогичного течения в натурном эксперименте. Температуры жидкости на входе и на выходе из теплообменника совпадают с точностью в 5% (максимум). Процесс охлаждения описывается не настолько точно, погрешность достигает 25%. Это может быть вызвано разными способами задания граничных условий и неточным описанием процессов теплопроводности в металле виртуального стенда на холодной ветке.

### Список литературы

1. Андреев В.В., Турченко М.В., Абрамов А.А. Преобразование характеристик гидравлического сопротивления с целью обобщения экспериментальной информации о течении жидкости в трубах// Научно-технический вестник Поволжья. – 2012 г. – №4 – С. 35-38
2. Благовещенский А.Я., Бор С.М., Конович М.Н. и др. Энергетические режимы работы реакторной установки с ВВЭР-1000 на естественной циркуляции теплоносителя/ / Теплоэнергетика. – 2004. – № 2. – С. 36–42.
3. Дунцев А.В. Исследование процесса естественной циркуляции при кипении жидкости – Н. Новгород, Типография НГТУ, 2010 г.
4. Овчинников Ф.Я., Семенов В.В. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988г.
5. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках.- М. Атомиздат, 1974 г.
6. Thomas Folsche, Head of Technology, CP Pumpen AG, Zofingen, Switzerland Оптимизация проточной части насоса с целью повышения его энергоэффективности// URL: <http://www.cadfem-cis.ru/solutions/optimiz/ex2/> (дата обращения 29.03.2015).

### Рецензенты:

Мисевич П.В., д.т.н., профессор кафедры «Вычислительных систем и технологий» Института радиоэлектроники и информационных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород;

Ломакина Л.С., д.т.н., профессор кафедры «Вычислительных систем и технологий» Института радиоэлектроники и информационных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.