

АНИСОНЯН ВАГАН РУБЕНОВИЧ

**ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ПРОЕКТА МЕДИЦИНСКОГО РЕАКТОРА МАРС С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ
ГИДРОДИНАМИКИ И СОПРЯЖЕННОГО
ТЕПЛООБМЕНА**

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 Экспериментальном научно исследовательском и методическом центре “Моделирующие системы” (ООО ЭНИМЦ “МС”)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Казанцев Анатолий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бараненко Валерий Иванович

кандидат технических наук, доцент
Слободчук Виктор Иванович

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского

Защита состоится «07» сентября 2011 г. в 14 час 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.10 при Национальном исследовательском ядерном университете “МИФИ”, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1, зал заседаний ученого совета ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «29» июня 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор

В.Л. Шаблов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа направлена на решение проблем, возникающих при исследовании теплогидравлических процессов, протекающих в реакторной установке МАРС, проектируемой для нейтронной терапии. Полученные результаты обеспечивают расчетное обоснование геометрии и безопасного функционирования реакторной установки МАРС. Для решения данной проблемы использовались методы вычислительной гидродинамики программного комплекса OpenFOAM. С целью тестирования программного комплекса, автором были проведены расчеты, результаты которых сравнивались с экспериментальными данными. Чтобы решить задачу сопряженного теплообмена в РУ МАРС, автором модифицирован блок теплофизических свойств и уравнение энергии открытого пакета программ OpenFOAM.

Актуальность проблемы.

Разработка новых методов ядерной медицины является сложной технической проблемой, требующей участия многих специалистов. По современным представлениям около 30% злокачественных новообразований относительно радиорезистентны. В лечении больных с такими опухолями наиболее целесообразно использовать нейтронное излучение. В МРНЦ РАМН, более чем на 400 больных с различными локализациями опухолей показано, что сочетанная фотонно-нейтронная терапия с вкладом нейтронов в дозу радикального курса 20-40% способствует значительному повышению эффективности лечения, а именно: 5 летняя выживаемость возрастает на 20-30% при отсутствии побочных эффектов воздействия нейтронов.

Использование нейтронного излучения не заменяет и не противопоставляется развитию других способов лечения онкологических больных, а позволяет существенно расширить показания к лучевой терапии и увеличить ее эффективность. Лучевая терапия является одним из многих инструментов современной медицины, компонентом пакета медицинских услуг.

В этой связи актуальным является разработка проекта специализированного реактора как источника нейтронов для известных видов нейтронной терапии: нейтронсоударная терапия (НСТ) на быстрых нейтронах, нейтрон-захватная терапия (НЗТ) на эпитепловых нейтронах, сочетанная нейтронная терапия. Предполагается сконструировать реактор так, чтобы при любых обстоятельствах его конструкция за счет естественных причин не допускала бы возникновения аварии с выбросом радиоактивности, что могло бы повлечь облучение персонала и населения. За счет малой мощности и импульсного режима работы реактора в нем практически не накапливаются продукты деления, поэтому в любых проектных и запроектных авариях, включая «полное разрушение реактора в случае гипотетического террористического акта», полностью исключаются выбросы активности, превышающие допустимые уровни.

Ранее в работах группы под научным руководством Казанского Ю.А., были решены нейтронно-физическая задача по выбору параметров медицинского реактора и дозиметрическая оптимизационная задача обоснования коллимационного устройства и фильтров с целью получения наилучшего терапевтического эффекта с учетом ограничения времени облучения пациента и минимизации мощности реактора. Представленные автором исследования необходимы для выполнения теплогидравлического обоснования проекта установки МАРС, отчета по обоснованию безопасности реактора новой конструкции, и являются частью работы многих групп экспертов.

В диссертации представлены результаты расчетных исследований процессов тепломассообмена в новом медицинском специализированном реакторе, выполненные в целях обоснования безопасности РУ МАРС. Изучаемые в работе процессы имеют трехмерный характер вследствие сложной геометрической формы конструкции и наличия разномасштабных внутренних элементов: перегородки, твэлы, стержни СКУЗ. Дополнительными факторами, действующими в совокупности, являются: турбулентность; переменность теплофизических свойств теплоносителя; нестационарный характер исследуемых аварийных и переходных процессов; воздействие массовых сил; сложное нелинейное взаимное влияние гидравлических сопротивлений в ТВС и т. д. По очевидным причинам эти обстоятельства не позволяют воспользоваться инженерными методами расчета для анализа протекающих процессов. Поэтому разработка и верификация математических моделей на основе современных методов вычислительной гидродинамики, численный анализ процессов в конкретном оборудовании, оптимизация на основании полученных данных конструкций и режимов работы устройств представляются актуальными.

Тематика исследований находится в русле приоритетных направлений науки технологий и техники РФ (от 21.05.06 пункт Безопасность атомной энергетики) и входит в «Перечень критических технологий РФ» (от 21.05.2006).

Результаты, полученные автором, использованы в эскизном проекте РУ МАРС.

Цель работы:

Решение теплофизических и гидродинамических проблем расчетного обоснования безопасного функционирования реакторной установки МАРС. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Модифицировать имеющийся открытый пакет программ OpenFOAM для возможности решения поставленных задач, в частности, изменить блок теплофизических свойств и компонентов тепловыделения в уравнении энергии.
2. Верифицировать метод расчета нестационарного переноса массы, импульса и энергии при течении теплоносителя в конструкции сложной геометрической формы, содержащей разномасштабные внутренние элементы, в условиях влияния турбулентности, массовых

сил, переменности теплофизических и транспортных свойств и других осложняющих факторов.

3. Разработать и протестировать нодализационные схемы, позволяющие получить решения для сформулированных теплофизических моделей на доступных средствах вычислительной техники и в приемлемые интервалы времени.
4. Методами вычислительного эксперимента, используя трехмерное нестационарное моделирование, исследовать процессы гидродинамики и теплообмена в корпусе специализированной медицинской реакторной установки МАРС для номинального режима, а также для аварийных условий, задаваемых требованиями ООБ.

Личным вкладом автора в представленную работу является:

- разработка замкнутой теплогидравлической модели, модификация на ее основе трехмерной модели сопряженного тепломассопереноса с использованием методов вычислительной гидродинамики;
- разработка и реализация нодализационных схем, выполнение тестовых и методических расчетов;
- проведение расчетных исследований, выполнение анализа полученных решений для нахождения допустимых характеристик активной зоны реактора;
- объяснение наблюдаемых особенностей решений, оценка приемлемости технологических режимов эксплуатации оборудования, написание статей и докладов.

На защиту выносятся:

- Теплофизическая модель для расчета гидродинамики и сопряженного теплопереноса на основе методов вычислительной гидродинамики в трехмерной динамической постановке.
- Модифицированный автором открытый пакет программ OpenFOAM, разработанный автором для расчета РУ МАРС модуль `vagChtMultiRegionFoam`, предназначенный для расчета сопряженного теплообмена и гидродинамики в многокомпонентной гетерогенной области.
- Результаты расчетов теплогидравлических характеристик специализированного медицинского реактора МАРС в номинальных условиях, необходимые для обоснования выбора параметров насосов.
- Результаты расчета условий охлаждения ТВС РУ МАРС для запроектной аварии при полном извлечении стержня СКУЗ.

Научная новизна диссертации

1. Разработана динамическая трехмерная методика расчета для описания процессов гидродинамики и сопряженного теплообмена в элементах оборудования специализированного медицинского реактора МАРС на основе методов вычислительной гидродинамики.
2. Впервые получены расчетные данные о трехмерных гидродинамических и тепловых полях элементов первого контура специализированного реактора МАРС на основе методов вычислительной гидродинамики.

3. На основе полученных данных проведен анализ эффективности предлагаемых конструкторских решений, влияние различных факторов на механизмы протекающих процессов. Проведен вычислительный эксперимент, на основе которого дано объяснение некоторых наблюдаемых особенностей температурных и гидродинамических полей в рассматриваемых конструкциях. Разработаны рекомендации, направленные на повышение эффективности оборудования.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждаются сравнением опубликованных опытных данных и их обобщений с результатами, полученными при использовании программного комплекса OpenFOAM методами вычислительной гидродинамики (CFD).

Практическая значимость работы

Получены необходимые инженерам и проектировщикам данные о тепловом состоянии элементов первого контура МАРС в различных режимах эксплуатации, особенностях протекающих в устройствах процессов гидродинамики и теплообмена. Разработаны рекомендации по оптимизации конструкторских решений и технологических режимов эксплуатации, в частности:

1. Даны рекомендации по изменению гидравлических характеристик конструкции из-за обнаружения зон с низкой проницаемостью по теплоносителю, которые могут обуславливать появление зон с недопустимыми неравномерностями температурного поля в установке в режиме аварии с выбросом стержня СКУЗ и дальнейшего съема остаточного тепловыделения;
2. Для проекта конструкции корпуса активной зоны РУ МАРС показано, что наиболее интенсивно охлаждаются части ТВЭлов, расположенные на периферии активной зоны по высоте, в то время как наиболее энергонапряженные центральные области реактора охлаждаются при продольном обтекании ТВС и следовательно, имеют более низкие коэффициенты теплообмена;
3. Показано, что при запроектной аварии в РУ МАРС, начинающейся с выброса стержня СКУЗ и последующем задаваемом уровне тепловыделения 426% от номинальной тепловой мощности, достижения температуры кипения на оболочках ТВЭлов не происходит.

Реализация результатов

Программные средства, разработанные для исследования трехмерных процессов в РУ МАРС переданы научной организации, выполнявшей проектные работы реактора. Результаты представленных работ использованы в ЭНИМЦ «Моделирующие системы», г. Обнинск.

Разработанный подход является современным высокотехнологическим решением и в будущем может быть использован для анализа процессов в разнообразном энергетическом оборудовании, при проектировании малых и сверхмалых реакторов нового поколения.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на следующих конференциях:

- Конференция Теплофизика 2010, Обнинск, 20-22 октября 2010 г.
- Конференция «Параллельные вычислительные технологии 2011», МГУ, Москва, 28 марта - 1 апреля 2011 г.

Публикации

Основное содержание диссертации изложено в 2 статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК и 2 публикациях в сборниках и трудах конференций.

Структура и объем диссертации

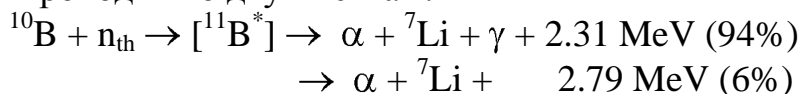
Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержит 119 страниц, 30 рисунков, 2 таблицы, список литературы состоит из 141 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, ее научная и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обозначен личный вклад автора. Дано краткое содержание работы и ее место в данном направлении исследований.

В главе 1 описано состояние проекта РУ МАРС, предназначенного для использования в нейтронной терапии в качестве источника нейтронов. Дан обзор методов решения на основе вычислительной гидродинамики.

При лечении онкологических заболеваний головного мозга с помощью специализированного медицинского реактора МАРС в проекте предполагается использовать два вида терапии: нейтрон - захватную терапию и нейтрон - соударную терапию. Нейтрон-захватная терапия (НЗТ) использует эпитепловые нейтроны с энергией в диапазоне от нескольких эВ до десятков кэВ. Нейтрон-соударная терапия (НСТ) использует быстрые нейтроны с энергией от долей МэВ до нескольких МэВ. Реактор МАРС сконструирован с 2 нейтронными коллимирующими устройствами, предназначенными для НЗТ и НСТ соответственно. Ядерная реакция при НЗТ проходит по двум веткам:



Опыт использования НЗТ и теоретические расчеты показали, что наиболее оптимальная энергия нейтронов для нейтронно-захватной терапии находится в пределах от 0.4 эВ до 10 кэВ для опухолей, залегающих на глубинах от 0 до 8 см. Оптимальная энергия для каждого конкретного случая залегания опухоли определяется индивидуально.

Терапия онкологических заболеваний с помощью ионизирующего излучения основана на уничтожении клеток, для чего необходима поглощенная в раковой опухоли энергия на уровне 50 Грэй. Уровень таких величин поглощенной энергии смертелен при общем облучении человека, поэтому защита здоровых клеток от облучения является весьма важной задачей. При этом разогрев облучаемых тканей незначителен.

НЗТ позволяет за счет введения боросодержащих препаратов использовать эффект резонансного поглощения тепловых нейтронов, что позволяет получить максимальный терапевтический эффект при минимальном вреде от излучения для организма. Специалистами МРНЦ РАМН был использован адаптированный в нашей стране боросодержащий препарат BSH. Переносимость препарата и облучения нейтронами вполне удовлетворительные. Такого эффекта нет в других методах лучевой терапии, например при использовании ускорительной техники.

Автор участвовал в теплофизической части обоснования проекта установки МАРС, дополняя работу широкого круга специалистов коллектива разработчиков под научным руководством д.ф.-м.н. профессора Казанского Ю.А.

Модель активной зоны специализированного медицинского реактора представлена на рисунке 1. Для обеспечения максимума терапевтического эффекта специализированный медицинский реактор МАРС имеет оптимизированную уплощенную форму активной зоны. Сама активная зона состоит из 8 кассет, в каждой из которых размещено 50 твэлов. В конструкции твэла МАРС использован укороченный твэл реактора БН-600. Топливо в виде диоксида урана имеет 17% обогащение по ^{235}U . Высота таблеток топлива в твэле 36 см, полная длина твэла 42,2 см. Корпус активной зоны и оболочки твэлов выполнены из нержавеющей стали. Замедлителем и теплоносителем является вода. Основные параметры активной зоны РУ МАРС представлены в таблице 1.

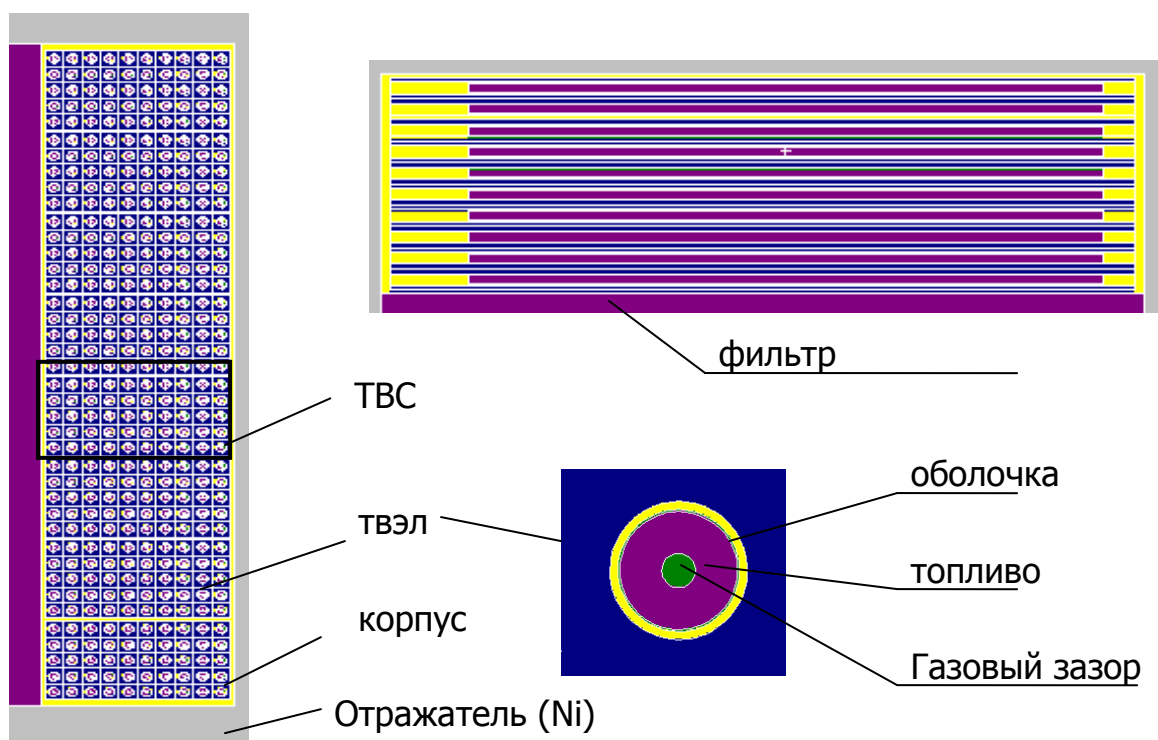


Рис. 1. – Модель активной зоны реактора МАРС

Характеристики активной зоны реактора

Характеристика		Значение
Топливо		UO ₂
Обогащение, % по ²³⁵ U		17
Загрузка, кг		37,5 (UO ₂)
Замедлитель		H ₂ O
Объем воды в активной зоне, м ³		0,0188
Активная зона	Высота, мм	422
	Ширина, мм	481
	Толщина, мм	120
Корпус активной зоны, мм		5
Количество ТВС, шт.		8
Количество твэлов в ТВС, шт.		50
Твэл	Внешний диаметр, мм	6,9
	Толщина оболочки, мм	0,4
	Внутренний диаметр топлива, мм	0,85
	Внешний диаметр топлива, мм	2,95
Шаг решетки, мм		12

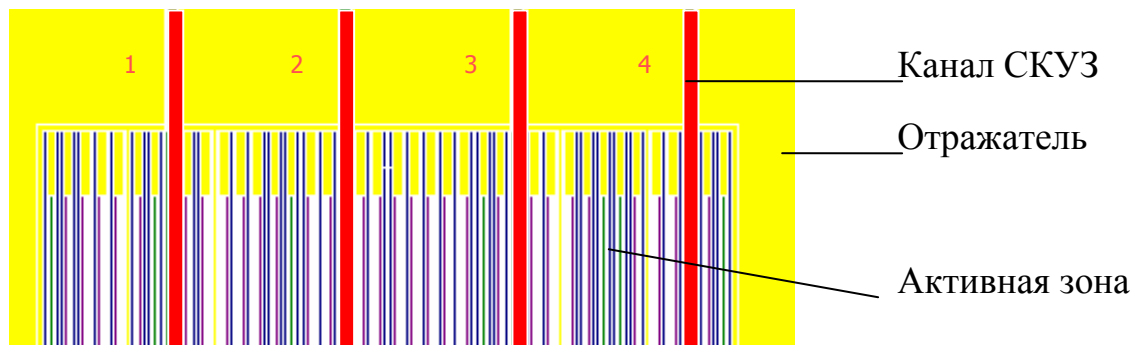


Рис. 2. – Расположение каналов СУЗ в активной зоне реактора

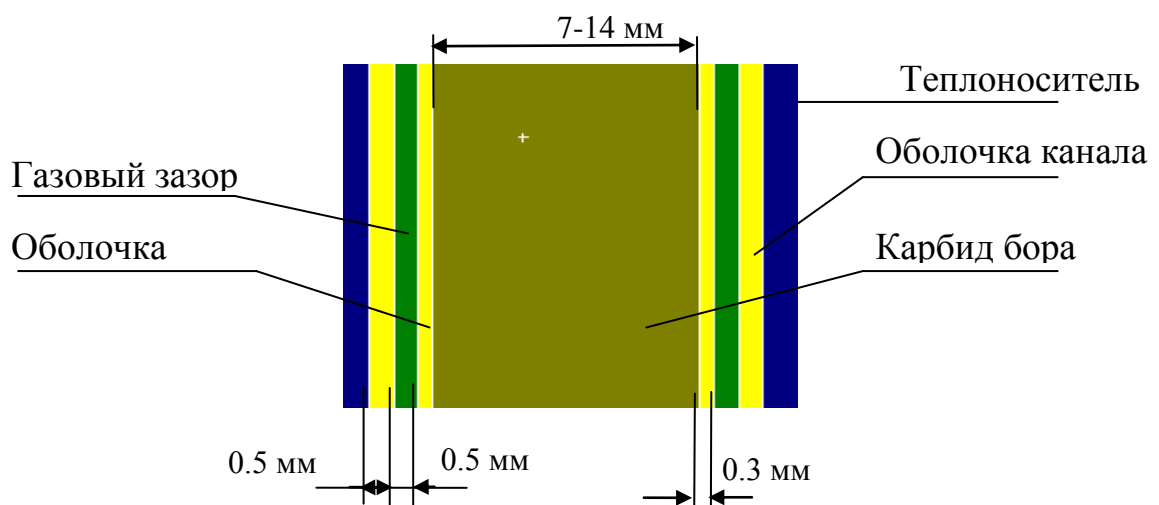


Рис. 3. – Стержень СУЗ в РУ МАРС

В проекте специализированного реактора МАРС имеются 4 стержня системы контроля управления и защиты (СКУЗ). С учетом требований ядерной безопасности выбран вариант расположения каналов СКУЗ сверху АЗ для обеспечения падения при обесточении. Каждый стержень СКУЗ размещается вместо четырех твэлов в ТВС. На рисунках 2 и 3 показаны размеры каналов СКУЗ и поглощающего стержня в канале.

Полученные в нейтронно-физическом расчете габаритные характеристики стержней СКУЗ и их веса приведены в таблице 2. Поглощающие стержни имеют различный диаметр для удовлетворения требованиям ядерной безопасности в РУ МАРС.

Таблица 2.
Характеристики стержней СКУЗ

№ стержня в активной зоне	Диаметр поглощающего материала стержня, мм	Вносимая реактивность, %
1	18,2	-1,4
2	11,2	-1,9
3	11,2	-1,6
4	7,4	-0,3

Следует отметить, что гидродинамический расчет реактора маленького размера значительно сложнее расчетов энергетических реакторов. Конструкция внутрикорпусных элементов реактора РУ МАРС содержит 8 перегородок, 4 стержня СКУЗ имеющих различные диаметры, 384 установленных твэлов. Фактически все элементы обтекаются начальными гидродинамическими участками, что делает невозможным применение инженерных методов, основанных на суммировании гидравлических сопротивлений, так как имеется продольное, поперечное и косое обтекание пучка, а гидравлическое сопротивление при смене направления обтекания меняется в 3 раза, соответственно меняются и локальные коэффициенты теплоотдачи. Поэтому был выбран метод вычислительной гидродинамики, применение которого возможно вследствие относительно малых габаритов корпуса реактора.

Выполнен обзор CFD кодов, используемых для расчетов теплогидравлических задач. Для расчета медицинского реактора МАРС обоснован выбор открытого пакета программ OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation), модифицированный до потребностей проекта.

Определение гидравлического сопротивления и расчет сопряженного теплообмена для новой неисследованной конструкции реактора является проблемой, которой посвящена данная работа. Зависимость гидравлического сопротивления от расхода позволяет обоснованно осуществлять выбор насоса для первого контура. Пакет в исходном виде не был предназначен для ядерной энергетики и не способен решить поставленную задачу. Потребовалось выполнить доработку открытого пакета в области

теплофизических и транспортных свойств (стандартная формуляция свойств воды IF-97) и добавлять источникный компонент (удельное энерговыделение) в дифференциальное уравнение переноса тепла. Лицензия открытого кода позволяет без нарушения авторских прав выполнять такие изменения.

Использование CFD методов является современным высокотехнологическим методом, который предъявляет к квалификации пользователя высокие требования. В частности, необходимо правильно выполнить постановку задачи и граничных условий, выбрать модель турбулентности и оптимизировать нодализационную схему с учетом пристеночных функций. Далее в главе выполнен обзор литературы, посвященной описанию современных представлений о турбулентности и методах решения классических и прикладных задач. Кратко приведены описания моделей турбулентности, доступные пользователю пакета программ OpenFOAM. Для правильного выбора модели турбулентности приведен краткий обзор возможностей и ограничений моделей турбулентности для описания внутренних течений, к которым относится основная задача работы. В заключение сделан вывод о возможности применения для рассматриваемой задачи стандартных моделей турбулентности: $k-\omega$ SST -модели и стандартной $k-\varepsilon$ модели. В следующей главе отдельный раздел посвящен выбору между этими моделями.

В главе 2 приведены результаты верификации и валидации программного пакета. Выполнены расчетные исследования, подтверждающие **достоверность и обоснованность** выбранного метода решения и, тем самым, результатов работы. Достоверность метода и программы подтверждается сравнением опубликованных опытных данных с результатами, полученными при использовании открытого пакета программ OpenFOAM, использующего методы вычислительной гидродинамики (CFD). Сравнение включает как проверку на классической задаче сопряженного теплообмена в трубе, так и сравнение CFD расчетов с результатами экспериментов на стенде (верификация) и расчетами других авторов, реализовавших подобную модель (валидация).

Рассмотрены следующие тестовые проблемы, выбранные на основе соответствия элементам конструкции MAPC [1,3,4]:

- Расчет течения в осесимметричном тупике (3D Эксперимент на воздухе).
- Классическая задача о теплообмене в трубе при граничных условиях постоянного теплового потока на внешней поверхности стенки и при наличии тепловыделения на центральном участке трубы.

Решение любой задачи возможно в минимальное время, если выбран некоторый пакет программ, максимально близкий к требующейся постановке, выяснено какие доработки необходимо выполнить для решения целевой задачи, выполнены необходимые модификации и проверена правильность работы получившегося расчетного инструмента на тестовых задачах. После этого можно приступать к решению поставленной задачи.

В рамках этого подхода для решения задач моделирования элементов ЯЭУ и обоснования конструкции реактора МАРС был выбран пакет программ с открытым исходным кодом OpenFOAM, в котором имеется набор решателей для задач механики сплошной среды, в том числе для задач нестационарного трехмерного сопряженного теплообмена. В отличие от выполненных ранее расчетов реактора МАРС, задача может ставиться без существенных упрощений, с использованием систем дифференциальных уравнений в частных производных в 3D динамической постановке. Преимуществом выбора открытого кода является возможность выполнять любые необходимые изменения кода, поскольку имеется лицензионно чистое рабочее место с открытыми операционными системами, такими как Ubuntu, OpenSUSE, Debian и т. п. Недостатком подхода это необходимость освоения операционной системы, под которой разработан пакет, сопутствующих открытых продуктов и методов работы с ними.

Требующимися дополнениями являлись свойства стандартной воды и пара в формуляции IF97 вместо имевшегося ранее приближения идеального газа и вставки компонент тепловыделения в уравнении энергии. Свойства воды взяты из открытой библиотеки MCF и добавлены ко всем используемым решателям.

В разделе 2.1 на примере классической задачи теплообмена в трубе с постоянным тепловым потоком со стенки показано хорошее совпадение расчетов как с интегральными обобщениями опытных данных: перепадом давления и балансом тепла. Получено также хорошее совпадение расчетов с экспериментальными профилями локальных параметров в виде универсальных безразмерных профилей температуры и универсальных профилей скорости.

На рисунке 4. приведено сравнение результатов расчетов с приведенных к безразмерному виду обобщениями в виде универсальных профилей скорости в трубах Рейхардта и Ушакова-Левченко. Видно, что расчетный профиль скорости расположен между двумя опытными, то есть полученные расчетные данные хорошо совпадают с безразмерными опытными кривыми.

Сравнение результатов приведенных к безразмерному виду расчетных профилей температуры с универсальными безразмерными профилями представлено на рисунке 5. Видно, что полученные расчетные данные хорошо совпадают с безразмерными обобщениями опытных данных по профилям температуры в трубах. Отклонение расчетов в правой части графика и формул связано с тем, что в окрестности оси невозможно описать логарифмическим законом условия симметрии профилей температуры и скорости на оси трубы.

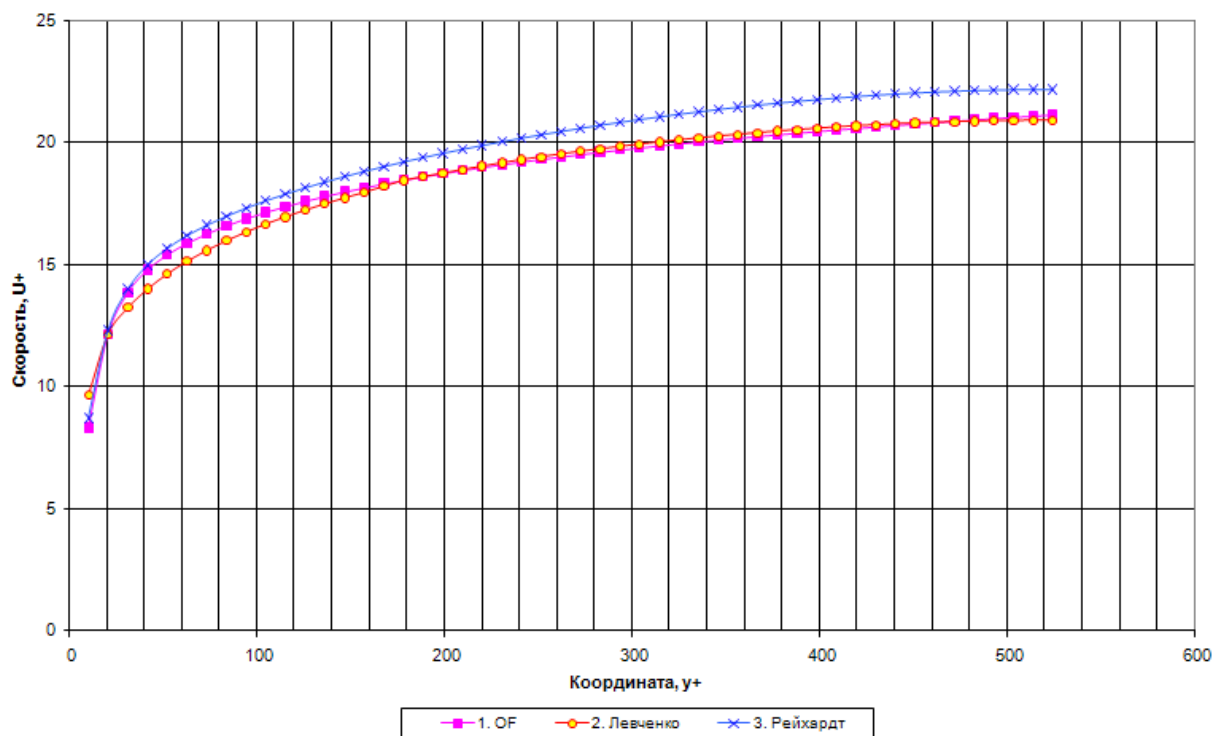


Рис. 4. Универсальный профиль скорости. Сравнение 1 – расчетного профиля авторов по коду OpenFOAM (OF) с 2 – профилем Левченко-Ушакова и 3 – профилем Рейхардта

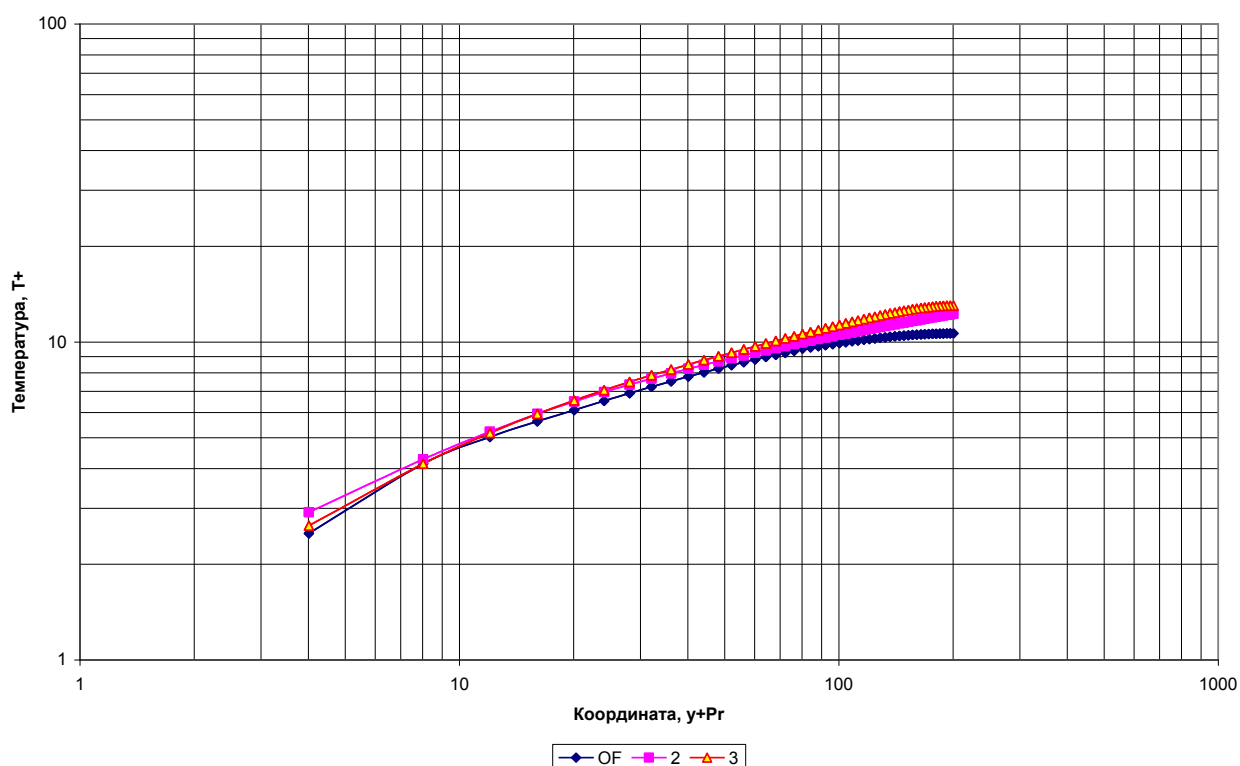


Рис. 5. Сравнение универсальных профилей температуры 1 - расчеты по коду OpenFOAM (OF), 2- модифицированный профиль Рейхардта (1), 3 - профиль (2)

На рисунке 5. выполнено сравнение расчетов с формулой Рейхардта для безразмерного профиля температуры (модифицированной из универсального профиля скорости Рейхардта):

$$T^+ = 2,5 \ln \left[(1 + 0,4y^+ \text{Pr})^{1,5} \frac{(1+R)}{(1+2R^2)} \right] + 1,0 \left[1 - \exp \left(-\frac{y^+ \text{Pr}}{11} \right) - \left(\frac{y^+ \text{Pr}}{11} \right) \exp(-0,33y^+) \right] \quad (1)$$

В диссертации предложена формула:

$$T^+ = \left[2,5 \ln(y^+ \text{Pr} + 1) + B(\text{Pr}) \right] \frac{(y^+ \text{Pr}) \cdot (1 - 0,5(y^+ / \kappa_0^+)^4)}{2,5 \ln(y^+ \text{Pr} + 1) + B(\text{Pr})} \quad (2)$$

$$B(\text{Pr}) = 24,5 \text{Pr}^{0,55} - 8,2 \ln(\text{Pr}) - 19$$

Видно, что получено хорошее совпадение расчетных и опытных данных, представленных в универсальных безразмерных координатах.

При сравнении решения сопряженной задачи теплообмена в трубе CFD методом получено хорошее совпадение интегральных параметров задачи. Для перепада давления получена погрешность 2%, подогрев теплоносителя с высокой степенью точности (0.5%) совпадает с балансным значением. Получено хорошее совпадение расчетных и опытных данных для профилей температуры, скорости, коэффициентов турбулентного переноса. Это подтверждает правильность построения сетки, выбор решателя, а также достоверность выбранного метода и открытого пакета программ OpenFOAM в целом.

Для расчета сложной геометрической конструкции, которой является реактор МАРС, требуется использовать одну из моделей турбулентности. Для освоения методов расчета турбулентных течений и проверки качества ее реализации в коде был выполнен расчет течения в осесимметричном тупике.

Областью ответственности расчетчика является правильность построения сетки, корректность задания начальных и граничных условий, выбор модели турбулентности.

Для того, чтобы выполнить валидацию и верификацию программного пакета, проверив влияние выбора разных моделей турбулентности, был выполнен расчет эксперимента в осесимметричном тупике на воздухе. При этом код не модифицировался, не использовались выполненные соискателем изменения в программном пакете, в частности, не использовались свойства стандартной воды.

В разделе 2.2 проведено сравнение опытных данных при течении в осесимметричном тупике, схема которого представлена на рисунке 6, и расчетов с использованием двух моделей турбулентности. Сетка, использованная при решении 3D задачи, показана на рисунке 6.

Получены удовлетворительные результаты совпадения расчетов с экспериментами. Места и величины наблюдаемых отклонений от экспериментальных данных в расчетах соответствуют аналогичным отклонениям в расчетах других авторов с использованием стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

Выполненный объем работы позволяет судить о надежности разработанного расчетного инструмента и перейти к решению практических задач расчета специализированного медицинского реактора МАРС.

В главе 3 приведены результаты расчетных исследований по определению ряда теплогидравлических характеристик реактора МАРС

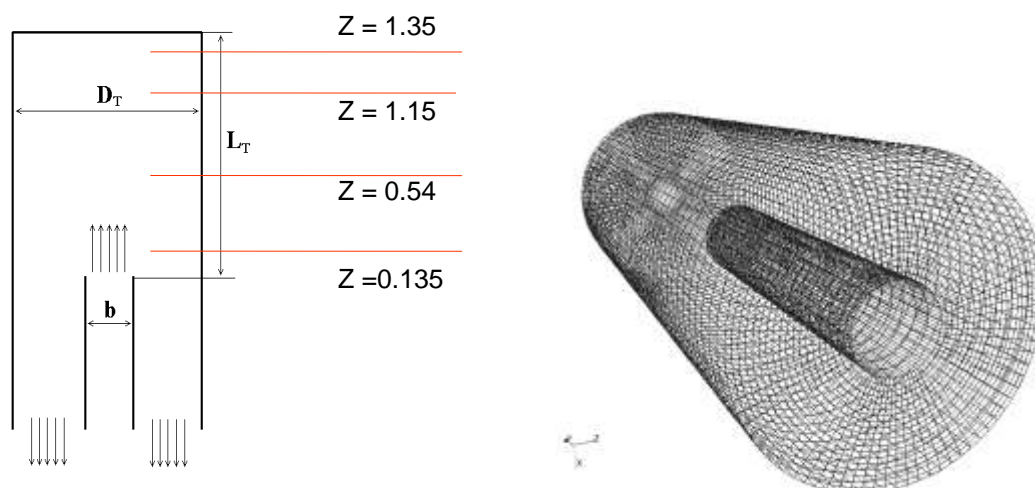


Рис. 6. Схема эксперимента в осесимметричном тупике и расчетная сетка. Показаны безразмерные величины высотных отметок, на которых выполнено сравнение с профилями вертикальной компоненты скорости.

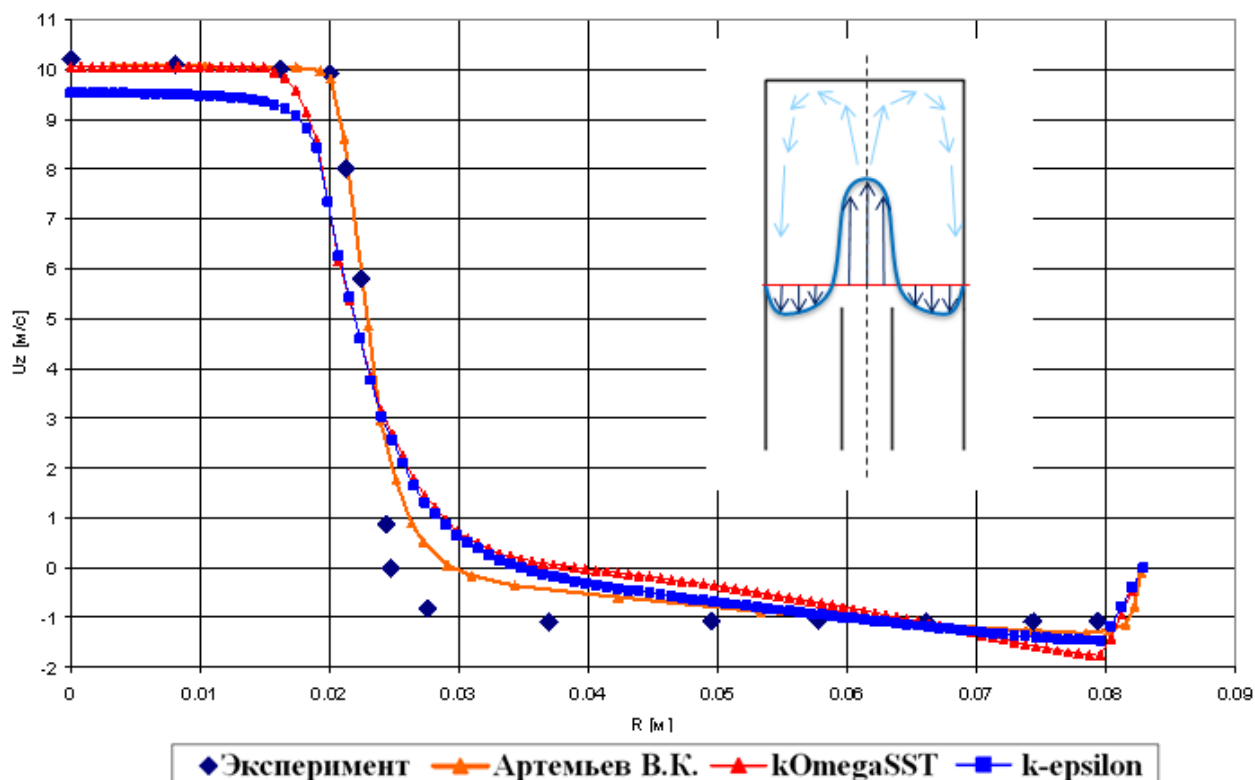


Рис. 7. Сравнение вертикальной компоненты скорости U_z на отметке $z=0,135$. \blacklozenge – эксперимент, \blacktriangle – расчет Артемьева (ГНЦ РФ – ФЭИ), \blacktriangle – расчет автора по $k-\omega$ -SST -модели, \blacksquare - расчет автора по $k-\varepsilon$ - модели

Активная зона реакторной установки «МАРС»

Представлены результаты моделирования теплофизических процессов в новом медицинском специализированном реакторе, выполненные на стадии эскизного проекта, в целях обоснования безопасности РУ МАРС. Теплофизическое обоснование является частью совместной работы многих групп экспертов, в частности, в работе используются удельное энерговыделение в топливе, величина и пространственное распределение которого получены нейтронно – физической группой при проектировании.

Поскольку основная часть расчетов по обоснованию РУ выполнялась с использованием традиционных инженерных методов и сетевых кодов, их результаты использованы как исходные данные при постановке задач. В работе представлены только те расчеты, которые выполнены с использованием методов вычислительной гидродинамики.

Для расчета гидродинамики и сопряженного теплообмена в корпусе РУ МАРС (рисунок 8.) использовались проектные данные режима работы на номинальной мощности. Тепловая мощность реактора $Q = 10$ кВт. Расход теплоносителя первого контура $G_f = 1,0$ кг/с. Температура теплоносителя на входе в реактор $t_f = 24$ °С.

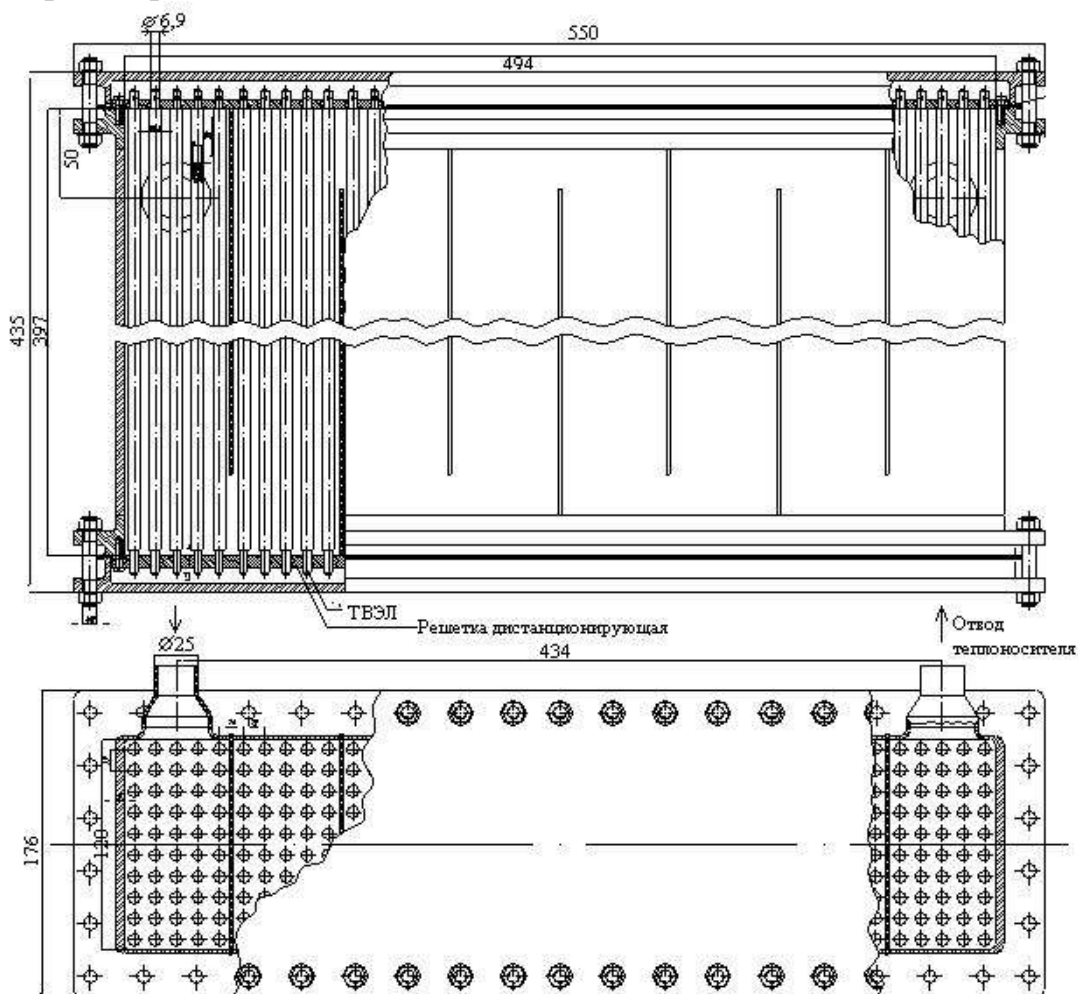


Рис. 8. Конструкция корпуса реактора РУ МАРС с установленными твэлами

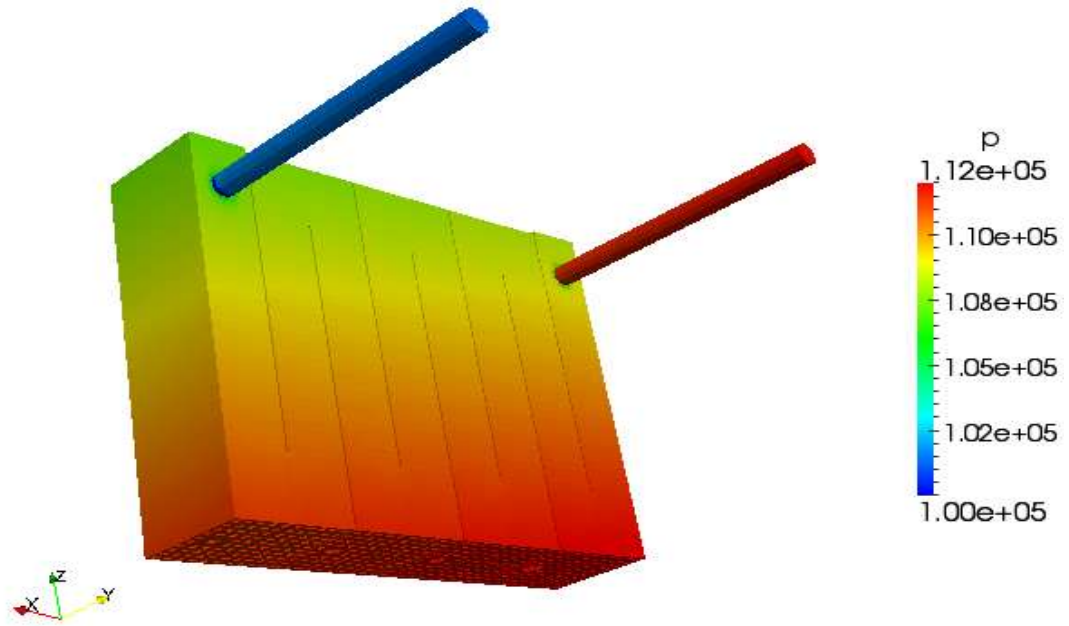


Рис. 9. Установившиеся поля давления P [Па] в теплоносителе при решении сопряженной задачи теплообмена для расчета номинального режима РУ МАРС.

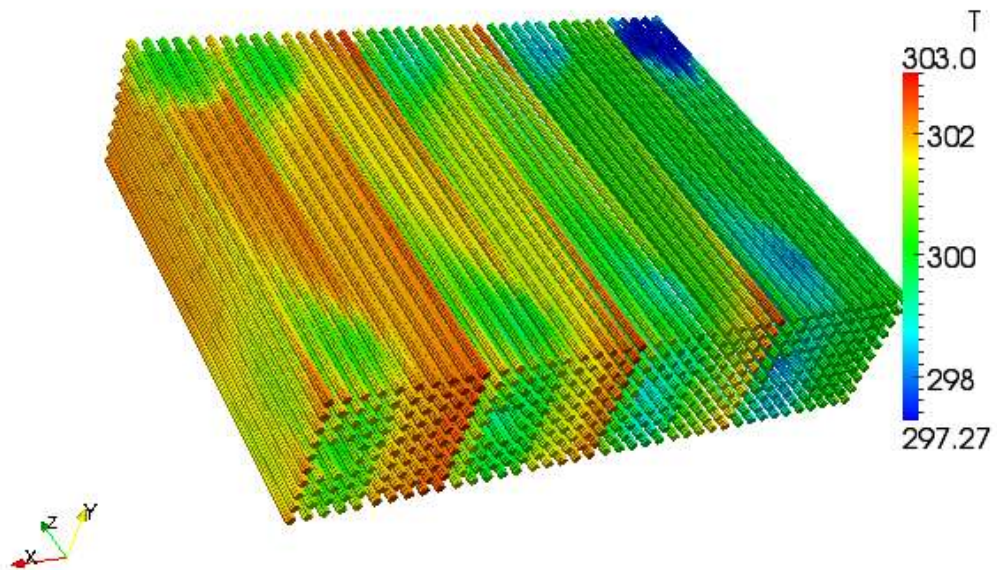


Рис. 10. Установившиеся температуры оболочек твэлов T [K] при решении сопряженной задачи теплообмена для расчета номинального режима РУ МАРС.

Так как в пакете программ OpenFoam в сопряженном решателе chtMultiRegionFOAM не имелось стандартных свойств воды, была добавлена открытая библиотека MCF, в которой используется международный стандарт свойств воды IF-97.

Использованная математическая постановка задачи приведена в [2, 3]. Она включает систему усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и стандартную $k-\varepsilon$ -модель турбулентности.

С использованием пакета программ OpenFoam и модифицированного соискателем расчетного модуля (называемого решателем), получившего название vagChtMultiRegionFOAM, были выполнены вариантыные расчеты для исследования полного сопротивления между входным и выходным патрубками корпуса активной зоны МАРС при изменении расхода в первом контуре. Обработка всей серии расчетов дана на рисунке 11. Получены обобщающие расчеты формулы.

При обработке результатов определяющими величинами приняты средняя скорость на входе во входной патрубков и диаметр патрубков на входе и выходе из корпуса реактора.

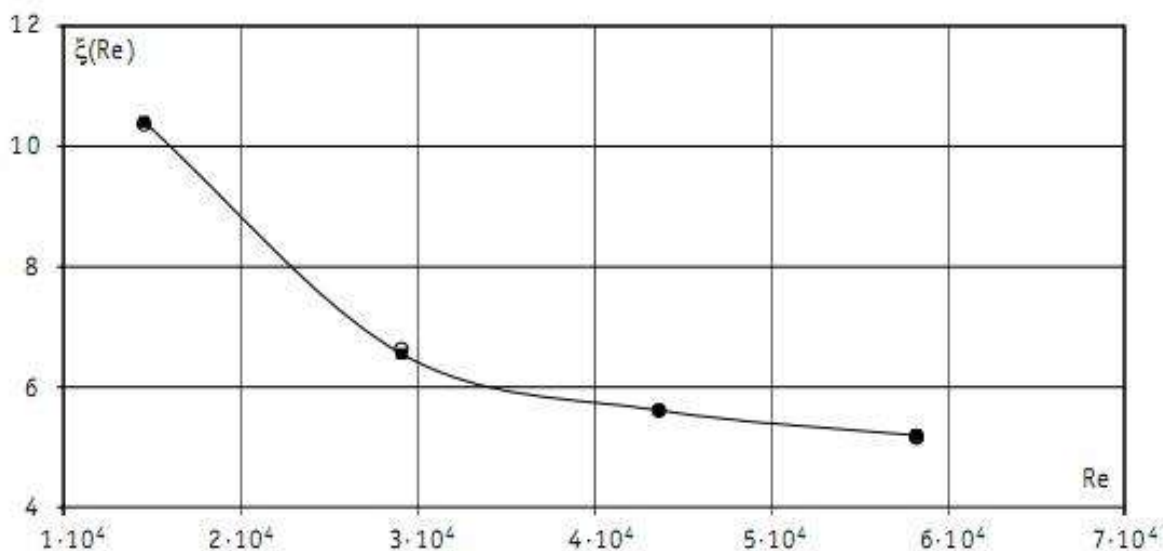


Рис. 11. Результаты серии расчетов при изменении расхода через корпус реактора МАРС, обобщенные в виде зависимости $\xi(Re)$ коэффициента сопротивления корпуса реактора от числа Re : \circ – ξ расчетное; \blacksquare – формула (3)

Обобщение серии расчетов в интервале чисел $Re = 1,46e+4 \div 5,82e+4$ выражено формулой

$$\xi(Re) = \exp(13499/Re + 1.4156). \quad (3)$$

Среднеквадратичная погрешность 1,76%. Максимальное отклонение 7,48%.

Следующий расчет выполнялся для оценки последствий постулируемого нормативами исходного события из списка рекомендованных для отчета по обоснованию безопасности исследовательских реакторов. Рассматривалась авария с увеличением тепловой мощности в 4.26 раза (выброс стержня СКУЗ).

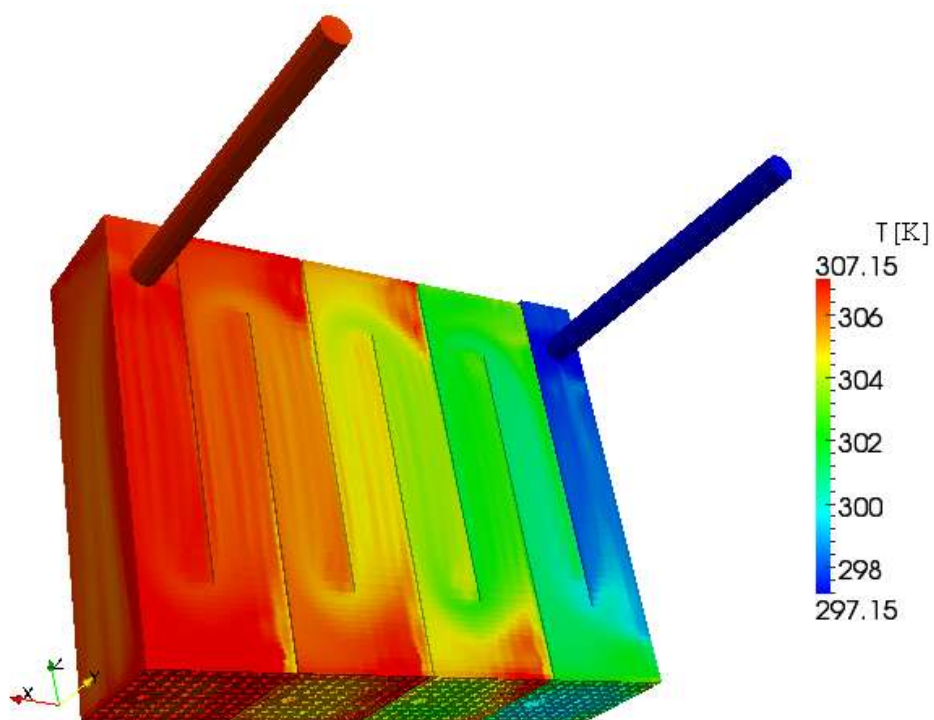


Рис. 12. Расчет аварийного режима с выбросом стержня СКУЗ для РУ МАРС. Решение сопряженной задачи теплообмена CFD методом. Поля температуры T [K] в теплоносителе.

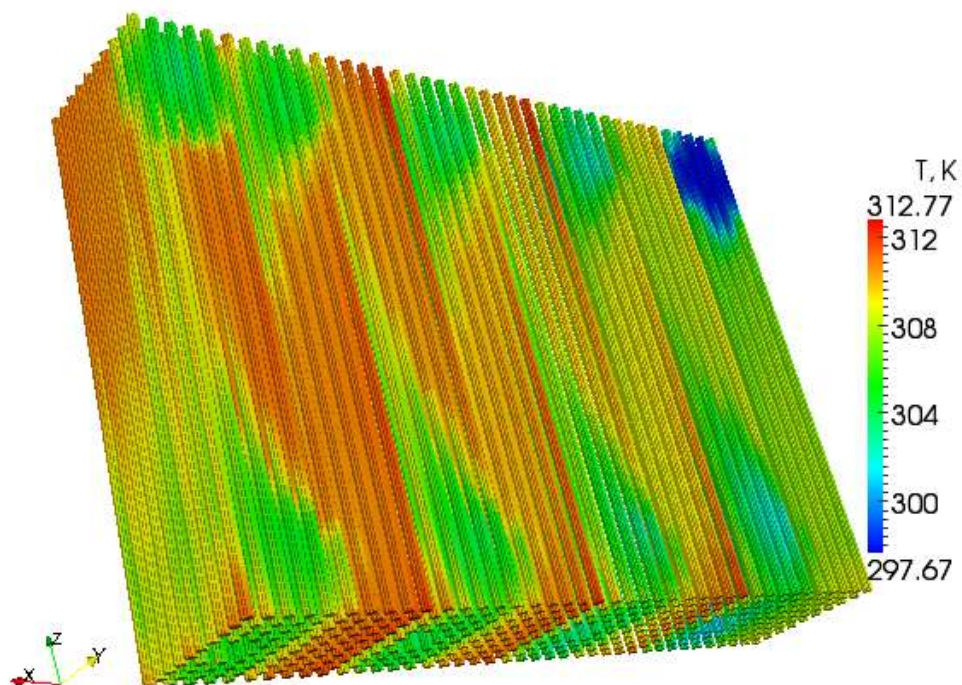


Рис. 13. Расчет аварийного режима с выбросом стержня СКУЗ для РУ МАРС. Решение сопряженной задачи теплообмена CFD методом. Поля температуры оболочек твэлов T [K].

В активной зоне реактора МАРС имеется 4 стержня СКУЗ (рисунок 2.), выброс одного регулирующего стержня приводит к переходному процессу в реакторе, в финале которого все отрицательные обратные связи останавливают рост реактивности на новом стабилизированном уровне мощности в 4,26 раза больше номинального. Нейтронно - физические характеристики являлись исходными данными расчета.

Поскольку номинальный подогрев в реакторе невелик: 2,5 °С, то оказалось, что новое устойчивое состояние реактора достигается при подогреве около 10,6 °С, что согласуется с результатами расчета температурного поля кодом OpenFOAM, представленного ранее. При решении динамической задачи температура на стенках не достигала линии насыщения во всем переходном процессе с большим запасом.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ формулируются основные результаты работы, выносимые на защиту.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана теплогидравлическая модель, описывающая процессы теплообмена в сопряженной трехмерной динамической постановке для медицинского специализированного реактора МАРС
2. Впервые получены расчетные данные о трехмерной гидродинамике и сопряженном теплообмене внутри корпуса РУ МАРС. Данные серии расчетов обобщены в виде зависимости коэффициента сопротивления корпуса реактора от числа Re.
3. Впервые выполнен расчет аварийного процесса с выбросом стержня управления из реактора. Расчет запроектной аварии для РУ МАРС при неизменном тепловыделении 426% от номинальной тепловой мощности показал, что достижения температуры кипения оболочек твэлов не происходит.
4. В результате модификации стандартного решателя открытого пакета программ OpenFOAM получен решатель `vagChtMultiRegionFoam` с добавленными свойствами стандартной воды и компонентом удельного тепловыделения в твердом теле.
5. Получены результаты решений ряда тестовых задач, которые позволили убедиться в хорошем описании опытных данных при течении и сопряженном теплообмене в круглой трубе и опытных кривых при течении в осесимметричном тупике. Сравнение данных по перепаду давления показывает, что отличие расчета от известных экспериментальных данных не превышает 5%. Рассчитанный балансный подогрев теплоносителя совпадает с точностью 0,5% с мощностью тепловыделения.

Публикации по теме диссертации

В рецензируемых журналах из списка ВАК:

1. Казанцев А. А. Моделирование 3D течения CFD кодом OpenFOAM / А.А. Казанцев, В.Р. Анисонян // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. - № 4. – С. 183-192.
2. Казанцев А. А. CFD расчеты в обоснование специализированного медицинского реактора МАРС / А.А. Казанцев, В.Р. Анисонян // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. - № 3. – С. 31-38.

В других изданиях:

3. Казанцев А.А., Анисонян В.Р. Теплогидравлический расчет активной зоны РУ МАРС с использованием CFD кода OpenFOAM / А.А. Казанцев, В.Р. Анисонян // Сборник докладов межотраслевого семинара «Тяжелые жидкометаллические теплоносители (Теплофизика-2010)». Обнинск. ГНЦ РФ -ФЭИ. – 2010, – С. 280-295.
4. Казанцев А. А. Моделирование течения в осесимметричном тупике CFD-кодом / А.А. Казанцев, В.Р. Анисонян // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2011): труды международной научной конференции (Москва, 28 марта – 1 апреля 2011 г.) [Электронный ресурс] – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – С. 693. – URL:<http://omega.sp.susu.ac.ru/books/conference/PaVT2011>

Компьютерная верстка В.Р. Анисонян

ЛР № 020713 от 27.04.1998		
Подписано к печати		Формат бумаги 60×84/16
Печать ризограф.	Бумага МВ	Печ. л. 1,5
Заказ №	Тираж 100 экз.	Цена договорная

Отдел множительной техники ИАТЭ
249035, г. Обнинск, Студгородок, 1