

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ CFD ДЛЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ НАПОРНОГО КОЛЛЕКТОРА АКТИВНОЙ ЗОНЫ БРЕСТ-ОД-300

Сапожников И.С., Солонин В.И., Тутукин А.В.
(АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

В рамках «Стратегии развития атомной энергетики России в первой половине XXI века» [1-3] в России продолжают научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на развитие технологии быстрых реакторов (БР) IV-го поколения со свинцовым теплоносителем. Существенным шагом для освоения технологии БР с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем в промышленных масштабах является создание опытно-демонстрационного реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (СТ) и нитридным уран-плутониевым топливом БРЕСТ-ОД-300 [4, 5], призванного продемонстрировать эксплуатацию энергоблока нового уровня безопасности в замкнутом ядерном топливном цикле.

В БРЕСТ-ОД-300 применена интегральная компоновка первого контура со структурно выделенными петлями (рис. 1), при которой парогенераторы и циркуляционные насосы вынесены за пределы центральной полости реактора. В первом контуре применена уровневая схема течения СТ, при которой циркуляционные насосы поддерживают в периферийных полостях уровень СТ выше, чем над активной зоной (а.з.). Из напорных камер периферийных полостей СТ поступает во внешний кольцевой канал центральной полости реактора и опускается вдоль корзины а.з. до ее входной камеры, параллельным трактом от теплообменника расхолаживания теплоноситель также поступает во входную камеру а.з.

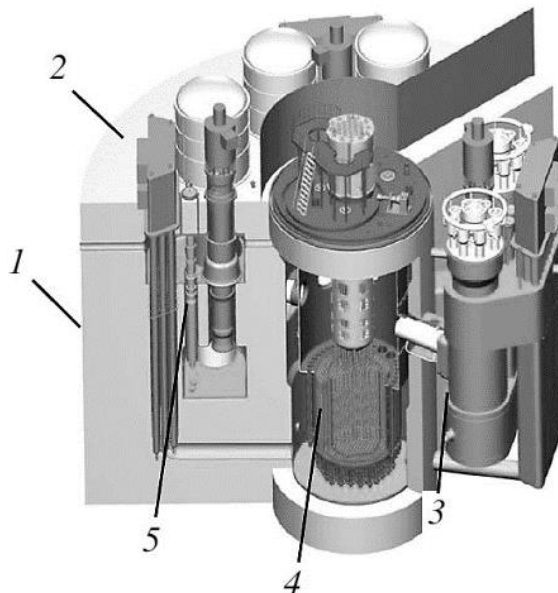


Рис. 1. Компоновка РУ БРЕСТ-ОД-300 (1 – корпус; 2 – коллектор воздушной системы аварийного охлаждения и нормального расхолаживания; 3 – парогенератор; 4 – активная зона; 5 – массообменный аппарат) [4]

Применение в качестве теплоносителя БР жидкого металла (свинца) привело к разработке новых компоновочных решений и необходимости анализа эксплуатационных особенностей реакторных установок. В отличие от водо-и газоохлаждаемых реакторов, которым необходима развитая система аварийного

охлаждения, в жидкометаллических реакторах отвод остаточного тепловыделения обеспечивается за счет естественной конвекции теплоносителя без использования активных систем отвода тепла [5]. Применительно к БРЕСТ-ОД-300 в случае аварийного отключения насосов и перехода первого контура в режим естественной циркуляции организуется течение через погружные теплообменники, в которых происходит отвод тепла от первого контура за счет естественной конвекции воздуха внутри теплообменных труб Фильда. Благодаря высокой температуре кипения жидкого металла по сравнению с его температурой в а.з. при аварийных сценариях не происходит вскипания теплоносителя, а необходимость поддержания высокого давления в первом контуре отпадает. Помимо этого, в СТ отсутствуют бурные экзотермические химические реакции между СТ и теплоносителем второго контура (пароводяная смесь), что позволяет применять двухконтурную схему отвода тепла. В случае разгерметизации трубок парогенератора предусматривается система локализации, позволяющая отводить парогазовую смесь из газовой полости реактора и обеспечивать проектное давление в первом контуре. В первом контуре необходимо поддерживать качество теплоносителя для снижения коррозионного износа контактирующих со СТ стальных конструкций, что приводит к необходимости прогнозировать и контролировать распределение кислорода в СТ, обеспечивающего проектные значения толщины оксидной пленки.

Таким образом, характерные особенности БР со СТ определяют актуальные направления разработки и совершенствования расчетных методик для обоснования безопасности реактора, поиска оптимальных конструктивных решений.

1. Входной участок активной зоны БРЕСТ-ОД-300

С позиции обеспечения теплотехнической надежности реакторной установки одним из наиболее важных требований является обеспечение контролируемых условий подвода теплоносителя к а.з. Компонировка а.з. БР помимо тепловыделяющих сборок (ТВС) включает препятствующие утечке нейтронов блоки отражателя (БО), как правило имеющие внешние габариты ТВС. На периферии а.з. кроме БО располагаются внутренние хранилища ТВС, достигших предельного выгорания, блоки радиационной защиты (БЗ). Таким образом, а.з. БР включает в себя большее число зон гидравлического профилирования, чем а.з. реактора на тепловых нейтронах.

В реакторе БРЕСТ-ОД-300 а.з. представляет собой композицию из составных частей: тепловыделяющих сборок (шестигранные, бесчехловые с гладкостержневыми твэлами); блоков отражателя, не содержащих делящиеся и воспроизводящие материалы, с высокой объемной долей свинца; блоков защиты с высокой объемной долей стали.

Несущим элементом ТВС является каркас, состоящий из направляющих труб и дистанционирующих решеток ячеистого типа подобно тому, как это выполнено в ТВС ВВЭР [6]. В нижней части каркас соединен с хвостовиком ТВС (рис. 2), в верхней – с головкой. В пространстве внутри хвостовика размещены дополнительные устройства, на выходе расположена шестигранная втулка, предназначенная для дистанционирования ТВС и содержащая решетку, дистанционирующую каркасные трубы.

Хвостовик ТВС предназначен для установки ТВС в одно из гнезд опорного стояка, представленного на рисунке 3. Опорный стояк включает в себя вертикальную трубу с боковыми проливными окнами и верхнюю часть с 7-ю гнездами для установки хвостовиков. Опорные стояки размещаются в плотной упаковке, образуя опорную плиту а.з.

Органы управления реактивностью размещены в ТВС с уменьшенным количеством твэлов и шестигранным вертикальным каналом (рис. 4) рабочего органа системы управления защитой, который затесняет пространство внутри и входное отверстие хвостовика. Рабочий участок блока отражателя/защиты (рис. 5) представляет

из себя шестигранный чехол, заполненный СТ или стальными блоками соответственно, в нижней части чехол соединен с хвостовиком блока, в верхней – с головкой.

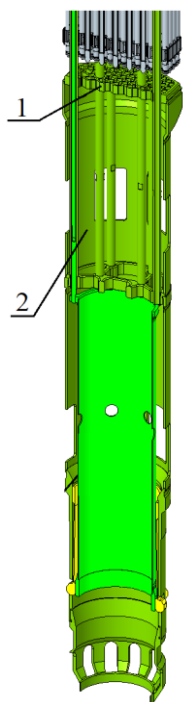


Рис. 2. Хвостовик ТВС и вид сверху на шестигранные решетки хвостовиков в сборе (1 – решетка; 2 – хвостовик)

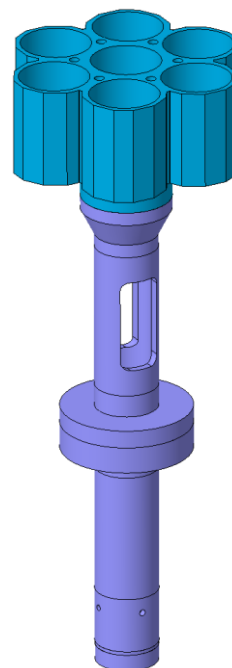
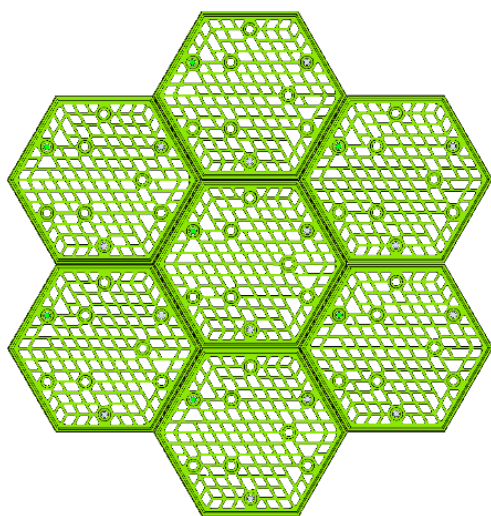


Рис. 3. Опорный стояк

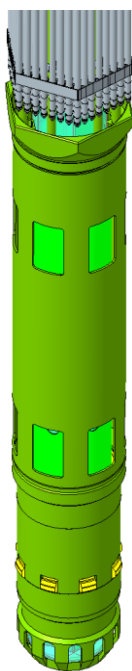


Рис. 4. Хвостовик ТВС с каналом рабочего органа

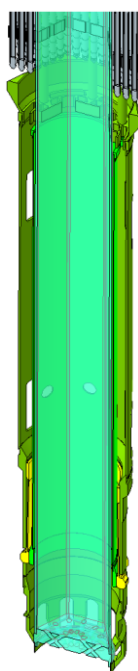
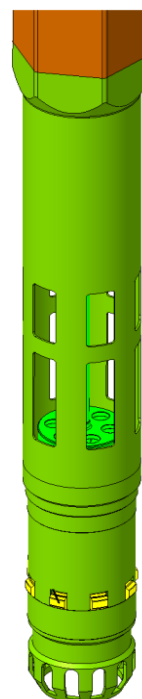


Рис. 5. Общий вид блока отражателя / защиты и его хвостовика



На рисунке 6 приведена схема течения СТ в а.з. и во входном участке а.з. РУ БРЕСТ-ОД-300. Течение на этом участке можно рассматривать как изотермическое. В нижнюю напорную камеру основная часть расхода СТ поступает из кольцевого опускного участка, меньшая – из 4-х боковых патрубков от теплообменников расхолаживания. Поступающий в нижнюю напорную камеру СТ распределяется

по входным отверстиям хвостовиков, меняя направление своего движения и перетекая между опорными стояками.

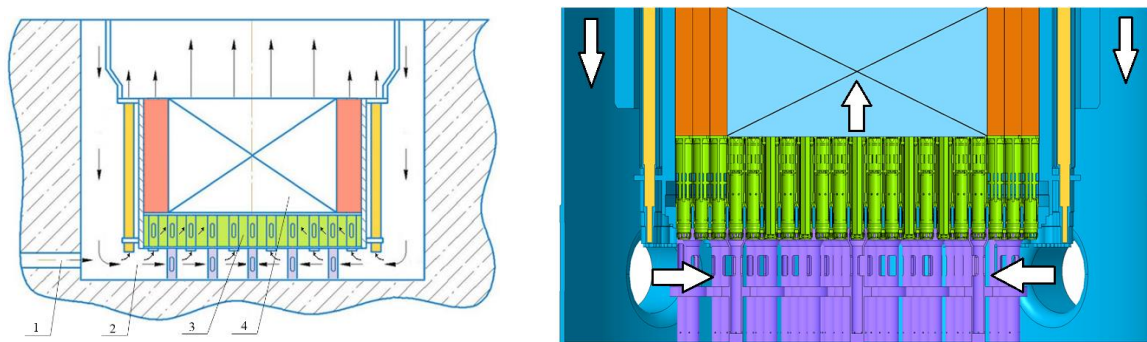


Рис. 6. Геометрия участка входа в а.з. и схема течения СТ во входном участке а.з. БРЕСТ-ОД-300 (1 – подвод СТ от теплообменника расхолаживания САОР; 2 – нижняя напорная камера; 3 – камера хвостовиков; 4 – а.з.)

Выше опорной плиты образуется камера, ограниченная сверху шестигранными втулками хвостовиков, снизу – опорной плитой а.з., с боковых сторон – корзиной а.з. В этой камере СТ может перераспределяться между хвостовиками посредством перетечек между пространством внутри и снаружи хвостовиков через их боковые проливные окна (рис. 6).

Избыточный расход СТ, поступающего на вход хвостовиков блоков (расход через рабочие участки блоков ограничен), перераспределяется между хвостовиками ТВС. Картина течения в камере хвостовиков определяется условиями подвода СТ из нижней напорной камеры и отвода к рабочим участкам ТВС, гидравлическими сопротивлениями трактов внутри и снаружи хвостовиков.

Отличительной особенностью геометрии входного участка в а.з. БРЕСТ-ОД-300 является отсутствие перфорированных решеток, предназначенных для снижения вихреобразования и неравномерности потока, которые используются в реакторах ВВЭР, PWR, проектах реакторов на быстрых нейтронах. Роль выравнивающих гидравлических устройств в данном случае играют опорные стояки, геометрия нижней камеры и хвостовиков.

Входной участок а.з. БРЕСТ-ОД-300 имеет сложную геометрическую конфигурацию. Для расчета параметров неоднородных пространственных распределений физических величин, характеризующих течение теплоносителя в напорной камере а.з., необходимы высокоточные трехмерные CFD-модели в комбинации с базой экспериментальных исследований. Применение CFD-моделей сопряжено с необходимостью их тщательной настройки, включающей обоснование применяемых методик моделирования, параметров сеточной модели, определение граничных условий и наличие существенных вычислительных ресурсов. Базы экспериментальных данных необходимы для валидации CFD-моделей в целом и обоснования возможности применения отдельных методик моделирования в частности (метод RANS, метод пористого тела, моделирование переноса примесей и др.).

2. Экспериментальная модель напорного коллектора

Для исследования гидродинамики течения в напорном коллекторе а.з. БРЕСТ-ОД-300 в лаборатории «Реакторная теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан макет фрагмента коллектора (рис. 7 и 8), выполненный в масштабе 1:5, и включающий в себя входную камеру напорного коллектора с подводящим участком, опорные стояки, опорную плиту и элементы корзины а.з., 18 хвостовиков блоков, 30

хвостовиков ТВС и соответствующие им имитаторы гидравлического сопротивления твэльных пучков ТВС.

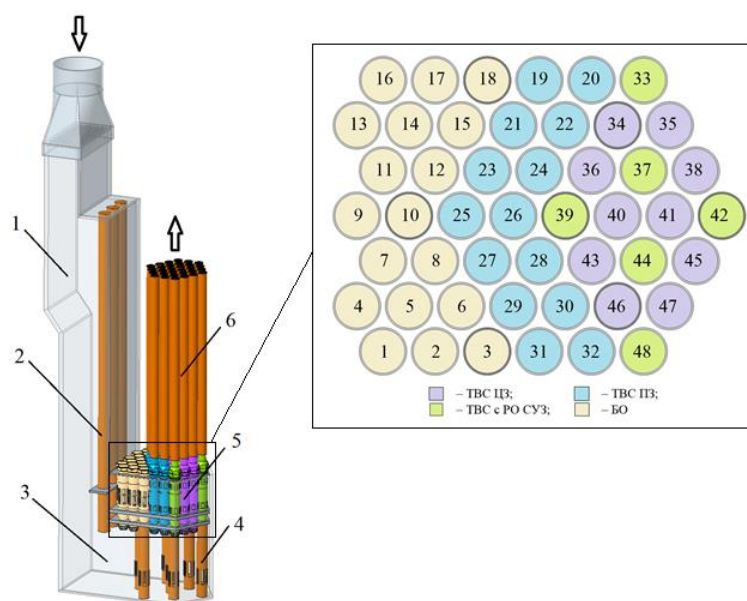


Рис. 7. Схема макета входного участка а.з. БРЕСТ-ОД-300
(1 – опускной участок; 2 – каналы внутриреакторного хранилища;
3 – входная камера; 4 – опорные стояки; 5 – камера с
хвостовиками; 6 – имитаторы ТВС)



Рис. 8.
Экспериментальный
участок макета

Экспериментальные исследования были выполнены при значениях чисел Рейнольдса в хвостовиках от $2,3 \cdot 10^4$ до $3,7 \cdot 10^4$, что в ~ 25 раз меньше проектных значений реактора при работе на полной мощности. Расход на входе составил $0,3775$ кг/с, скорость потока воздуха в хвостовиках при этом достигала 95 м/с (число Маха $0,29$), что указывает на отсутствие существенного влияния сжимаемости воздуха на гидравлические параметры течения. В ходе проведения экспериментов были измерены статические давления во входной камере напорного коллектора, на входе и выходе каждого хвостовика (суммарно 96 точек отбора), с использованием тарировочных зависимостей отдельных участков были определены расходы воздуха на входе и выходе каждого хвостовика. В нескольких направлениях входной камеры с использованием пневмометрических зондов и однониточных датчиков термоанемометра были измерены распределения модуля и угла направления скорости потока.

3. Валидация расчетных CFD-методик

В качестве средства численного моделирования применялся CFD-код Star-CCM+. Численная модель описывает близкое к изотермическому турбулентное течение воздуха как сжимаемого газа (при моделировании разброс температуры в трактах не превышал $1,8$ К); модель базируется на уравнениях Рейнольдса, дополненных уравнениями модели турбулентности «k-ε Realizable» (RANS-приближение). Воздух моделировался в приближении идеального газа. Суммарное количество контрольных объемов в расчетной модели равнялось примерно 20 млн.

С целью валидации расчетной модели RANS было проведено сопоставление расчетных и экспериментальных значений статического давления в 96-ти точках в нижней входной камере и камере хвостовиков, а также расходов на входе и выходе хвостовиков. Отклонения параметров не превышают 8% и лежат в пределах погрешности экспериментальной методики измерения. Результаты расчетного моделирования также достоверно отражают картину течения в напорной камере,

зафиксированную в ходе визуализации течения (рис. 9) и измерении скорости и угла направления потока (рис. 10).

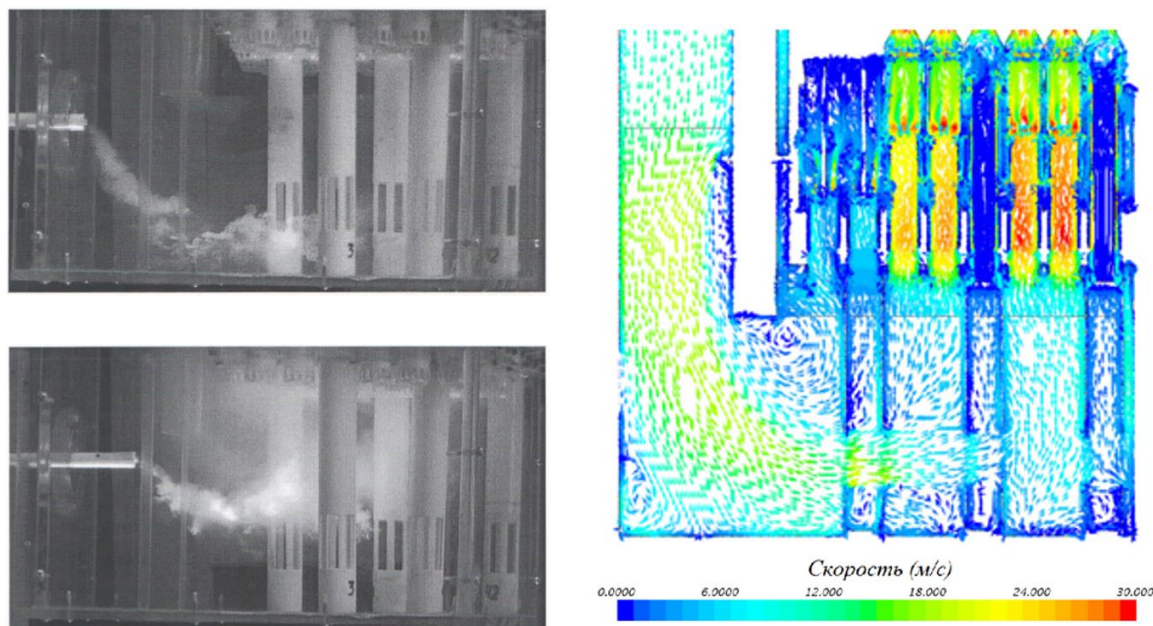


Рис. 9. Картина течения в нижней входной камере (экспериментальные данные и моделирование RANS)

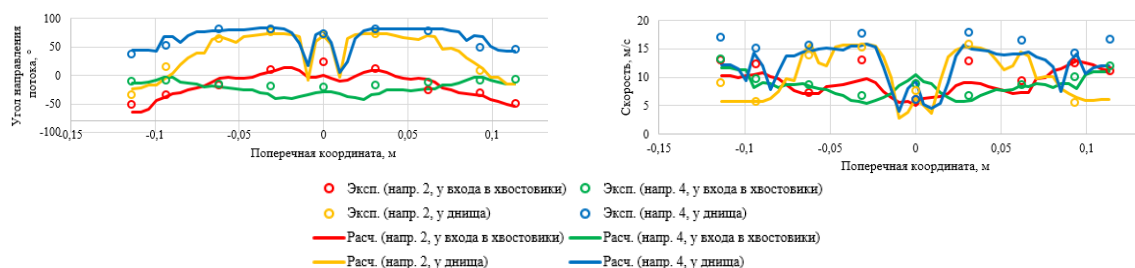


Рис. 10. Скорость угол направления потока в нижней камере

Далее был разработан вариант комбинированной расчетной модели, базирующейся на уравнениях пористого тела (метод приведенных скоростей) во внутренних трактах хвостовиков и на уравнениях RANS (модель турбулентности «k-ε Realizable») в пространстве между хвостовиками и за их пределами (рис. 11).

Геометрические модели «пористых» участков хвостовиков разработаны таким образом, чтобы проходное сечение имело одинаковую геометрическую конфигурацию и неизменную площадь. При этом сечения входа и выхода разработаны как однозначно определяемые плоские горизонтальные сечения одинаковой площади. Из расчетной области были исключены застойные области гидравлического тракта макета.

Для комбинированной модели отклонения расчетных давлений и расходов от экспериментальных данных составили не более 8,2% и 7,4% соответственно. Таким образом, применение модели пористого тела позволило уменьшить количество контрольных объемов сеточной модели в 4 раза при незначительном снижении точности моделирования по сравнению с RANS (рис. 12 и 13).

По результатам анализа параметров течения в трактах отдельных хвостовиков и напорного коллектора в целом установлено, что внутренние тракты хвостовиков макета могут быть описаны с использованием методики пористого тела с точностью,

достаточной для получения корректных оценок массообменных и напорных характеристик.

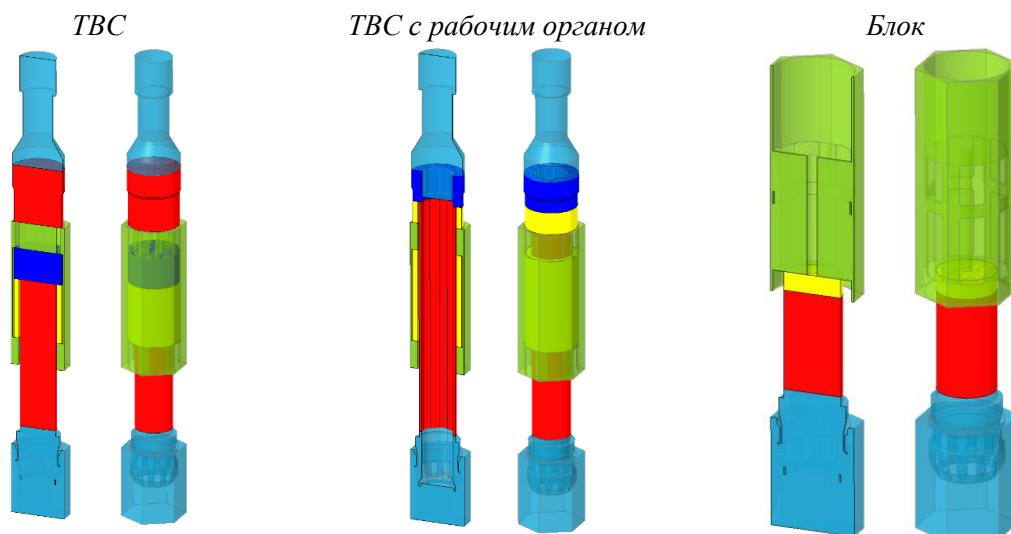


Рис. 11. Модели гидравлических трактов хвостовиков (голубой, зеленый – RANS; желтый, красный, синий – модель пористого тела)

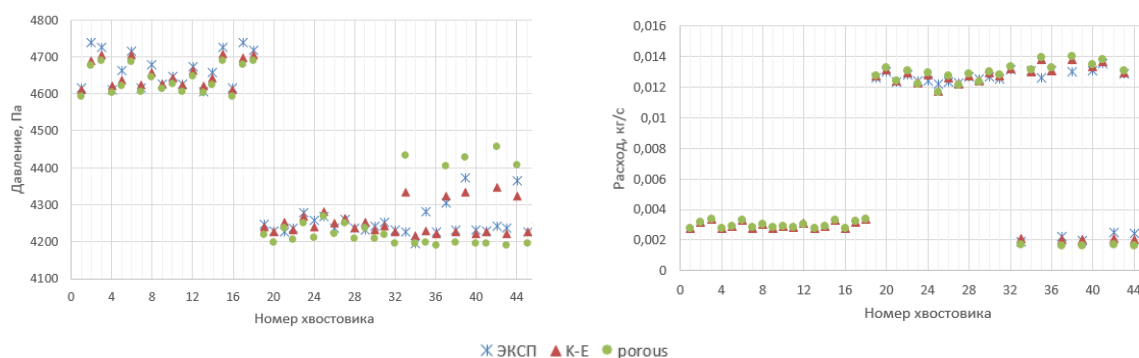


Рис. 12. Распределения давлений и расходов на входе хвостовиков

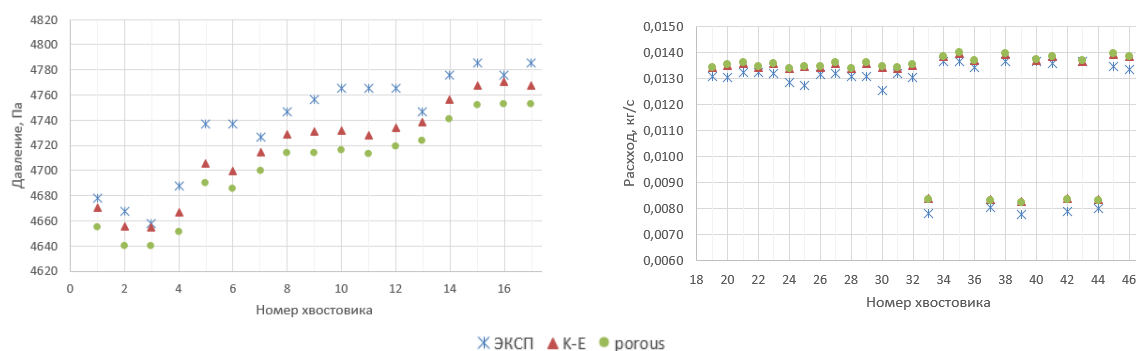


Рис. 13. Распределения давлений в нижней камере и расходов на выходе хвостовиков

4. Опыт применения CFD для гидродинамических расчетов напорного коллектора активной зоны

Изложенный подход к расчетному моделированию гидродинамически сложных коллекторных систем с использованием модельных экспериментов соответствует проводимым исследованиям [7-10].

Авторы [7] обобщают накопленный опыт экспериментальных исследований теплогидравлики тяжелых жидкометаллических теплоносителей и приходят к выводу о

том, что для исследования теплогидравлических параметров реактора с жидкометаллическими теплоносителями необходимо разрабатывать крупномасштабные CFD-модели, учитывающие взаимовлияние теплогидравлических процессов, протекающих в различных элементах оборудования 1-го контура.

Расчетные модели такого типа авторы [8] классифицируют как имитационные модели закрытой системы. В указанной работе приведены результаты экспериментальных и расчетных теплогидравлических исследований, проведенных на стенде E-SCAPE (Бельгия), который представляет из себя модель реактора MYRRHA [9] (интегрального типа с теплоносителем свинец-висмут) в масштабе 1:6. В напорной камере а.з. располагается гидравлическое устройство имеющее вид перфорированной обечайки. Помимо этого, на входе имитатора а.з. расположены две перфорированные пластины, имеющие эллиптическую форму и предназначенные для воспроизведения в модели гидравлического сопротивления а.з. (сама а.з. представлена в виде кольцевых обогреваемых каналов). Установка оснащена термopарами, датчиками давления и расходомерами.

Численная модель была разработана в трех исполнениях: с применением CFD-кодов Star-CCM+, ANSYS CFX и OpenFOAM (рис. 14). Параметры расчетных моделей подбирались независимо друг от друга, количество расчетных ячеек составляло от 20 млн. до 52 млн. Помимо гидравлических трактов каждая расчетная модель включала некоторые теплопередающие твердотельные элементы конструкции.

Согласно результатам исследований, модели CFD в разном исполнении завышали перепад давления на а.з. на 15% и более. По мнению авторов, это связано со следующими факторами: упрощения, сделанные в геометрических моделях CFD, отклонение геометрических параметров входных решеток а.з. в CFD от натурных.

Так, например, учет скошенных кромок отверстий входных решеток в модели Star-CCM+ приводят к снижению расчетных потерь давления на 10%. Также в различных расчетных моделях были по-разному воспроизведены геометрические модели трактов а.з., включая перфорированные пластины, отверстия которых имели разную угловую ориентацию. Таким образом, незначительные локальные отклонения геометрии входной решетки а.з. в расчетной модели приводят к существенным изменениям напорно-расходных характеристик участка.

Согласно приведенным авторами результатам, для моделирования течения в напорной камере требуется высококачественная расчетная сетка, достаточная для пространственного разрешения сильных градиентов скорости. Для модели Star-CCM+, показавшей лучшее совпадение с экспериментальными данными, была проведена наиболее тщательная подготовка расчетной сетки – параметры сетки подбирались для отдельных локальных областей потока в ходе предварительных расчетов.

Представленные расчетные модели включали в себя основную часть гидравлических трактов и оборудования 1-го контура РУ. Они позволяют проводить моделирование сложных теплогидравлических процессов, связанных с передачей тепла от а.з. к теплообменному оборудованию при различных режимах работы РУ.

Авторы работ [8, 10] сходятся во мнении о том, что для расчета характеристик потока в напорной камере а.з. необходимы высокоточные трехмерные CFD-модели в комбинации с базой экспериментальных исследований, поскольку сложный и разнообразный дизайн внутренней структуры камеры приводит к усложнению схемы течения, что снижает способности расчетных кодов прогнозировать параметры а.з., включая напорно-расходные характеристики коллекторов подвода и отвода, распределения расходов на входе а.з. и др.

При этом CFD-моделирование требует высоких затрат вычислительных ресурсов, что приводит к необходимости совершенствования расчетных CFD-методик с целью уменьшения масштаба сеточного разрешения и увеличения скорости расчета.

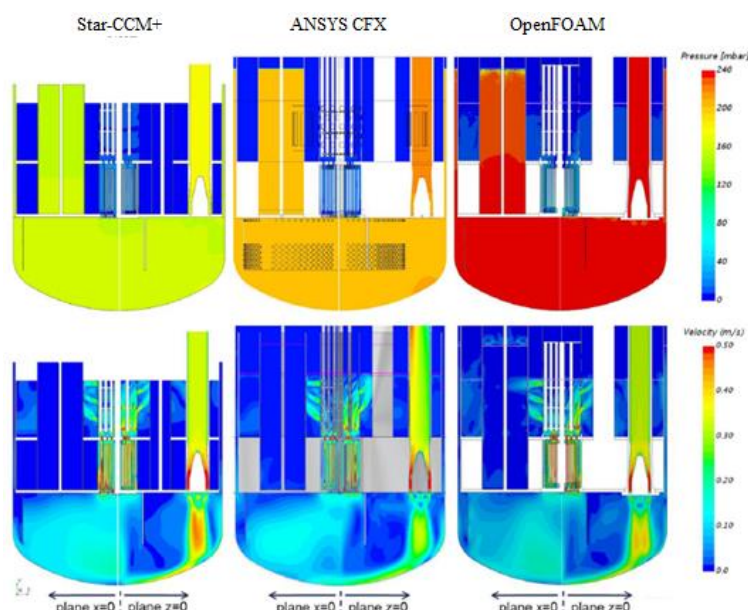


Рис. 14. Расчетные распределения давления и скорости теплоносителя в продольном сечении стенда E-SCAPE (Бельгия) [8]

На предприятии АО «НИКИЭТ», являющемся главным конструктором РУ БРЕСТ-ОД-300, накоплен значительный опыт в разработке расчетных CFD-моделей первого контура циркуляции теплоносителя и отдельных фрагментов РУ, создана обширная верификационная база CFD-тестов. Расчеты проводятся с использованием вычислительного кластера. Для проведения комплексных теплогидравлических CFD-расчетов трактов РУ применяется верифицированная коммерческая программа Star-CCM+, для расчетов турбулентных течений преимущественно используется дифференциальная двухпараметрическая модель турбулентности «k-ε Realizable» с двухслойной пристеночной функцией, работающей во всем диапазоне Y^+ .

Опыт разработки расчетных моделей трактов СТ РУ БРЕСТ-ОД-300 в рамках выполнения научно-исследовательских работ в АО «НИКИЭТ» показал, что для гидродинамического расчета входного участка а.з. с использованием RANS требуется порядка 800 млн расчетных ячеек в случае моделирования без упрощений геометрии трактов (~550 млн на камеру хвостовиков и ~250 млн на нижнюю напорную камеру) и в соответствии со строгими требованиями, предъявляемыми к расчетной сетке. Для расчета гидродинамики течения СТ в центральной полости РУ, включая а.з. в пористом приближении (метод приведенных скоростей, коэффициент пористости ~1) и участки подвода и отвода СТ, потребовалось 1,7 млрд расчетных ячеек (рисунок 16).

Построение расчетной сетки и расчетное моделирование проводились с применением коммерческого CFD кода Star-CCM+. Для удобства сеткопостроения расчетная область была разделена на 72 пористых и 195 RANS-регионов, количество интерфейсов между расчетными регионами составило 723. Оптимизация расчетной сетки, подразумевающая сокращение числа расчетных ячеек при контролируемой точности решения, не проводилась в связи со сложностью расчетных областей модели. Расчет проводился в изотермической постановке – высокие требования к вычислительным ресурсам не позволили провести моделирование теплопереноса.

Из результатов расчета следует, что условия подвода СТ к опускному участку из восьми кольцевых горизонтальных патрубков от четырех главных циркуляционных

насосов не оказывает влияния на течение в нижней камере а.з. Неравномерность статического давления на входе в хвостовики составляет порядка 2,5%. Существенное влияние на течение в нижней входной камере оказывают опорные стояки а.з., наличие которых уменьшает линейный масштаб вихревых структур.

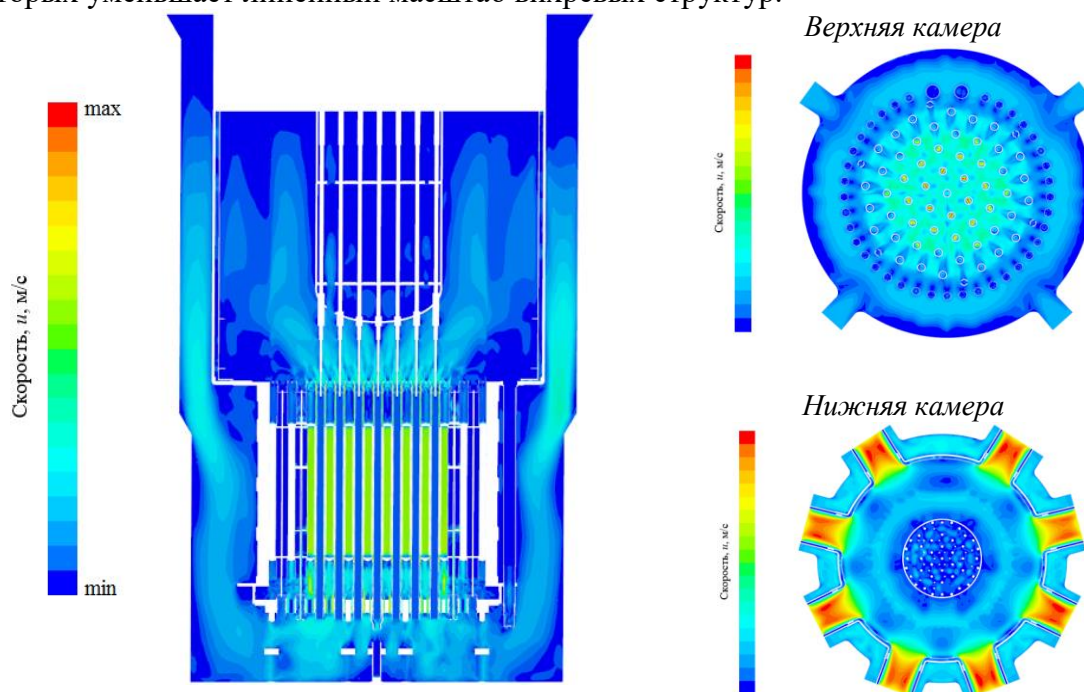


Рис. 16. Расчетное распределение скорости СТ в центральной полости РУ БРЕСТ-ОД-300 (АО «НИКИЭТ», 2018 г.)

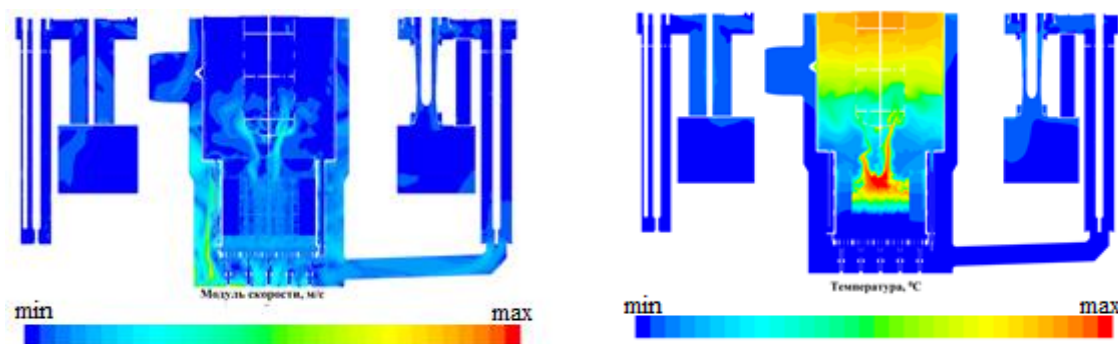


Рис. 17. Расчетные распределения скорости (слева) и температуры (справа) в 1-ом контуре РУ БРЕСТ-ОД-300 на момент 120 с переходного процесса (АО «НИКИЭТ», 2020 г.)

С целью проведения CFD-расчетов переходных нестационарных процессов и моделирования переноса по контуру РУ примесей, была разработана расчетная модель 1-го контура СТ, включающая в себя также защитный газ газовой полости и металлоконструкции, участвующие в теплообмене между «горячим» и «холодным» участками СТ (рис. 17). Моделирование взаимодействия СТ и защитного газа проводилось методом VOF.

Участки а.з., включающие опорную плиту с хвостовиками и головками, моделировались в виде сплошных тел простой геометрической формы в пористом приближении (метод приведенных скоростей, коэффициенты пористости различные). Такой подход позволил сократить количество расчетных ячеек, необходимых для расчета камеры хвостовиков напорного коллектора а.з., до 2,6 млн. Количество ячеек для опускного и входного участка а.з. (включая камеру хвостовиков) составило

~28 млн, для моделирования всего СТ центральной полости РУ – порядка 80 млн, суммарное количество ячеек расчетной модели составило ~215 млн.

Построение расчетной сетки и расчетное моделирование проводились с применением коммерческого CFD кода Star-CCM+. Для удобства сеткопостроения расчетная область была разделена на 135 регионов, количество интерфейсов между расчетными регионами составило 728.

При моделировании нестационарного процесса, связанного с потерей электроснабжения, был проведен расчет ~3 ч переходного режима. Установление новых положений уровней свинца в контуре циркуляции происходит за время порядка 30 секунд с момента отключения насосов. Включение САОР происходит спустя ~2 ч переходного процесса (пассивным образом).

Для представленных CFD-моделей подготовка задачи занимала несколько месяцев, непосредственно расчет длился несколько недель. Задействованные вычислительные ресурсы составляли приблизительно 1300 ядер с оперативной памятью ~120 ГБ для одной расчетной модели.

Заключение

Приведенные данные указывают на то, что разработка CFD-моделей трактов напорного коллектора РУ БРЕСТ-ОД-300 сопряжена с высокими требованиями к вычислительным ресурсам, большими трудозатратами, необходимостью учета влияния многих факторов, влияющих на результаты расчета. При разработке расчетной модели необходимо проведение ряда тестовых расчетов с применением CFD (сходимость и оптимизация расчетной сетки, проверка корректности применения пористого тела, уточнение эмпирических констант, настройка параметров решателя и др.).

С учетом ограниченности расчетных ресурсов, предельное количество ячеек сеточной модели для моделирования входного участка а.з. при проведении комплексных расчетов тепломассообмена в первом контуре РУ оценено в 5...15 млн ячеек. При разработке расчетной модели неизбежно использование методики пористого тела по крайней мере в области ТВС, а также возникает необходимость проводить существенные упрощения геометрии трактов СТ и оптимизацию расчетной сетки, подразумевая увеличение масштаба ячеек при условии сохранения контролируемой точности решения. Для оптимизации расчетной методики CFD-моделирования в дальнейшем целесообразным представляется уменьшение количества расчетных ячеек в областях моделирования RANS путем увеличения скорости роста ячеек призматического пристеночного слоя до 2...3, увеличение масштаба ячеек в ядре потока при условии сохранения контролируемой точности. Также актуальным направлением исследований является уточнение границ применимости модели пористого тела, коэффициентов модели и поиск наиболее оптимальных путей комбинации RANS и пористого тела. Необходимо расширять базу соответствующих верификационных тестов для обоснования применения расчетных методик с применением пористого тела при анализе нестационарных процессов РУ.

Необходимость оптимизации CFD-моделей входного участка а.з. определяет потребность в получении экспериментальных данных для верификации расчетных методик. Экспериментальные исследования гидродинамических характеристик течений жидких металлов в лабораторных условиях осложняется необходимостью поддержания температуры в контуре выше температуры замерзания и сложностью измерений необходимых параметров. Использование модельных теплоносителей воды и газа является оправданным с точки зрения моделирования гидродинамических параметров течения жидкого металла [11]. Это расширяет возможности исследования и набор методик измерения.

В настоящее время основным инструментом для обоснования безопасности РУ остается применение одномерных расчетных кодов. Тем не менее, методики CFD, в свою очередь, являются универсальным инструментом для поиска оптимальных конструктивных решений и получения информации о процессах в РУ, необходимой на этапах проектирования установки. Совершенствование подходов CFD и реализация комплексных контурных трехмерных расчетных моделей является актуальной задачей как для строящейся РУ БРЕСТ-ОД-300, так и для проектов перспективных атомных станций, таких как БР-1200 и др.

Список литературы

1. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Основные положения. М.: Минатом России, 2000. 26 с.
2. Белая книга ядерной энергетики / Адамов Е.О., Большов Л.А., Ганев И.Х., Зродников А.В., Кузнецов А.К., Лопаткин А.В., Мастепанов А.М., Орлов В.В., Рачков В.И., Смирнов В.С., Солонин М.И., Ужанова В.В., Черноплеков Н.А., Шаталов Г.Е. / М.: НИКИЭТ, 2001. 269 с.
3. О стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 г. / Алексеев П.Н., Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю. и др. // Атомная энергия. 2011. Т. 111. Вып. 4. С. 183–196.
4. Brest Lead-Cooled Fast Reactor: From Concept to Technological Implementation / E. O. Adamov, A. V. Kaplienko, V. V. Orlov [et al.] // Atomic Energy. – 2021. – Vol. 129, No. 4. – P. 179-187. – DOI 10.1007/s10512-021-00731-w. – EDN NAKPSO.
5. Адамов Е.О., Драгунов Ю.Г., Орлов В.В. и др. Машиностроение. Энциклопедия. Машиностроение ядерной техники. Т. IV-25. Кн. 1. Под ред. Адамова Е.О. 2005 – 906 с.
6. Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г. и др. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. – М.: НКИ – «Академкнига», 2004. – 220 с.
7. Coupled system thermal Hydraulics/CFD models: General guidelines and applications to heavy liquid metals / A. Pucciarelli [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 153. No. 4 – DOI 10.1016/j.anucene.2020.107990.
8. CFD analyses of the European scaled pool experiment E-SCAPE / Dirk C. Visser [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2020. – Vol. 358. No. 3 – DOI 10.1016/j.nucengdes.2019.110436
9. MYRRHA accelerator driven system programme: recent progress and perspectives / H. A. Abderrahim, D. De. Bruyn, M. Dierckx [et al.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – No 2. – P. 29-42. – DOI 10.26583/npe.2019.2.03. – EDN LSWATY.
10. Recent progress of CFD applications in PWR thermal hydraulics study and future directions / Mingjun Wang [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 153. No 4. – DOI 10.1016/j.anucene.2020.107836.
11. Сорокин, А. П. Моделирование теплофизических процессов в обоснование проектов быстрых реакторов нового поколения с жидкометаллическими теплоносителями / А. П. Сорокин, Ю. А. Кузина, А. И. Орлов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – № 3. – С. 240-265. – EDN VBFKXB.