

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ РАСЧЕТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ РАСХОЛАЖИВАНИЯ РЕАКТОРА С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Д.В. Диденко*, Д.Е. Балувев*, О.Л. Никаноров*, С.А. Рогожкин*,
С.Ф. Шепелёв*, А.А. Аксёнов**, М.Н. Жестков**, А.Е. Щеляев**

* АО «ОКБМ им. И.И. Африкантова»

603074, Россия, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15

** ООО «ТЕСИС»

127083, Россия, г. Москва, ул. Юннатов, 18, офис 705



Разработан методический подход для расчетного исследования теплогидравлических процессов, происходящих в реакторе на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, с использованием отечественного программного комплекса вычислительной гидродинамики FlowVision. Подход учитывает интегральную компоновку оборудования первого контура реакторной установки, особенности теплообмена в жидкометаллическом теплоносителе и позволяет с помощью обоснованных упрощений моделировать теплообмен при течении теплоносителя через активную зону и теплообменное оборудование реактора. В частности, методический подход может быть использован при обосновании безопасности при расхолаживании реактора, а также для других расчетных исследований, требующих моделирования активной зоны и теплообменного оборудования реактора интегрального типа.

Представлен краткий обзор ранее разработанных методических подходов для исследования процессов расхолаживания реакторов с жидкометаллическими теплоносителями. Выделены общие принципы данных подходов, их преимущества и недостатки.

Разработана трехмерная расчетная модель перспективного реактора, включающая в себя одну теплообменную петлю (одна четвертая часть реактора). Обоснована применимость модели зазора FlowVision для моделирования пространства между тепловыделяющими сборками активной зоны (межпакетного пространства), а также модели пористого каркаса для моделирования теплообменного оборудования реактора. Выполнено расчетное исследование номинального режима течения теплоносителя в реакторе. Показано, что разработанный методический подход применим для решения задач течения теплоносителя в различных режимах работы реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем.

Ключевые слова: реактор с жидкометаллическим теплоносителем, интегральная компоновка, методический подход, CFD, FlowVision, активная зона, LMS, расхолаживание реактора, межпакетное пространство.

© Д.В. Диденко, Д.Е. Балувев, О.Л. Никаноров, С.А. Рогожкин, С.Ф. Шепелёв, А.А. Аксёнов, М.Н. Жестков, А.Е. Щеляев, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Интегральная компоновка оборудования реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН), характеризующаяся размещением всего основного оборудования первого контура внутри корпуса реактора, и особые условия теплообмена в жидких металлах, которые отличают их от остальных видов теплоносителей, используемых в реакторной технике, требуют разработки специальных методических подходов для моделирования процессов тепломассопереноса в современных отечественных кодах вычислительной гидродинамики. С помощью разрабатываемых методических подходов выполняются различные расчетные исследования теплогидравлических процессов, происходящих в реакторных установках на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РУ БН). Результаты данных исследований используются, например, для обоснования систем расхолаживания реактора типа БН.

Основные сложности при расчетном исследовании теплогидравлических процессов связаны с моделированием активной зоны и теплообменного оборудования. Конструктивная сложность тепловыделяющих сборок (ТВС), а также промежуточного (ПТО) и автономного теплообменников (АТО) ввиду наличия в них большого количества составляющих элементов требует создания методического подхода, который бы позволял с помощью обоснованных упрощений и использования специальных моделей с приемлемой точностью выполнять расчеты теплогидравлических процессов, происходящих в РУ БН.

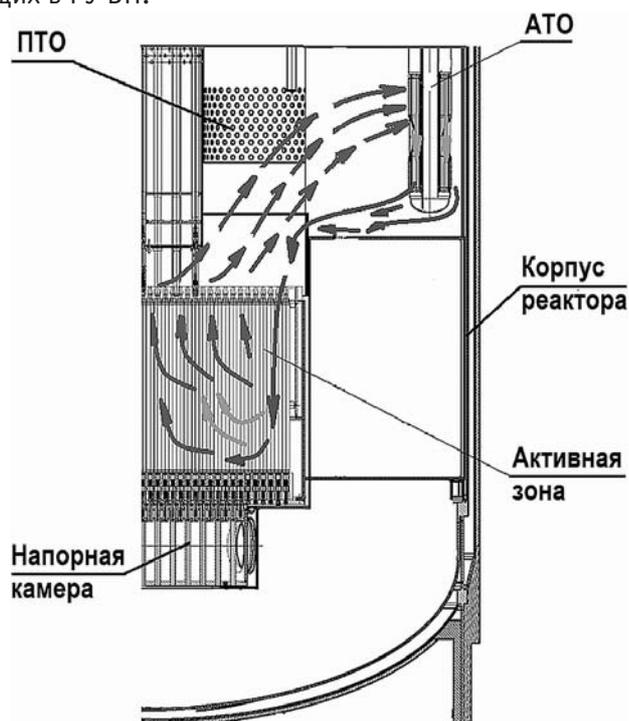


Рис.1. Схема циркуляции теплоносителя при расхолаживании РУ БН через межпакетное пространство

В настоящее время одним из возможных вариантов расхолаживания реакторной установки на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РУ БН) в режимах, требующих отвода остаточных тепловыделений, рассматривается её расхолаживание через пространство между ТВС активной зоны, называемое межпакетным пространством (рис. 1). Данный вариант расхолаживания реакторной установки заключается в отводе остаточных тепловыделений от активной зоны за счет создания

контур циркуляции, при котором охлажденный в АТО теплоноситель первого контура омывает ТВС снаружи, отводя тепло через их чехлы. Также предполагается, что часть натрия попадает внутрь ТВС из напорной камеры активной зоны.

За последнее десятилетие опубликован ряд научных материалов, посвященных расчетному анализу расхолаживания реакторов с жидкометаллическим теплоносителем с использованием CFD-программ. В статье [1] представлен обзор работ по моделированию режима потери теплоотвода быстрого реактора PHENIX, вызванной отключением насосов первого контура, что приводило к развитию естественной циркуляции в первом контуре. Численное моделирование выполнено с помощью системных (CATHARE и ATHLET) и CFD-кодов (TRIOU и OPENFOAM). В работе [2] представлены расчеты реактора в двумерной осесимметричной постановке и проводится верификация используемой модели по результатам, полученным по другим программным средствам (кросс-верификация), а также по результатам экспериментов.

Наиболее совершенная численная модель активной зоны реактора изложена в отчете Аргоннской национальной лаборатории [3]. Здесь ТВС моделируются с помощью расчетной сетки, которая разрешает расстояния между ними. Уделено значительное внимание генерации расчетной сетки.

В нашей стране ведутся работы по моделированию тепловыделяющих сборок и реактора в целом. В работе [4] приведен расчет активной зоны реактора БРЕСТ на основе модели пористого тела с помощью программного модуля APMod, а также выполнена кросс-верификация с DNS-кодом (Direct Numerical Simulation) CONV-3D.

С помощью коммерческих программ ANSYS-CFX и STAR-CD были проведены расчеты расхолаживания реактора PFBR (Индия) через межпакетное пространство активной зоны [5]. В данных расчетах ТВС активной зоны и теплообменники моделировались с использованием модели пористого тела. Подвод и отвод тепла в расчетной модели осуществлялись через ТВС и теплообменники соответственно. Также был учтен теплообмен через чехлы ТВС.

В 2015 г. с помощью программы STAR-CD были выполнены расчеты течения теплоносителя в корейском инновационном реакторе KALIMER [6]. При моделировании принимались следующие допущения: активная зона и теплообменники задавались с помощью модели пористого тела, межпакетное пространство и геометрия ТВС не моделировались.

Рассмотрев вышеприведенные методические подходы, можно отметить ряд общих принципов, а именно, моделирование активной зоны и теплообменников выполнялось с помощью модели пористого тела, полная геометрия ТВС заменяется объемом с эквивалентными теплофизическими свойствами. Также следует отметить, что результаты в данных работах получены либо с помощью прецизионных отечественных кодов, не позволяющих в настоящее время решать задачи инженерного анализа, либо на основе универсальных зарубежных CFD-кодов с использованием моделей турбулентности RANS/URANS, которые применяются для решения широкого класса задач. Особенности теплопереноса в жидкометаллических натриевых теплоносителях в этих кодах уделено недостаточное внимание, поэтому для разработки методического подхода для расчетного исследования течения теплоносителя в процессе расхолаживания реактора с натриевым теплоносителем был выбран программный комплекс (ПК) вычислительной гидродинамики FlowVision. Выбор ПК FlowVision обосновывается реализованной в нем моделью LMS (Liquid Metal Sodium) для расчета турбулентного теплопереноса в натриевом теплоносителе, а также моделью пористого каркаса, которая позволяет рассчитывать теплопередачу в теплообменном оборудовании. Модель LMS в составе FlowVision верифицирована на обширной экспериментальной базе [7, 8]. FlowVision аттестован для моделирования тепло-

гидравлических процессов, происходящих при течении натриевого теплоносителя в РУ БН [9]. Однако вопросы моделирования ТВС и активной зоны в целом не рассматривались.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА И РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Для исследования процессов тепломассопереноса и обоснования безопасности РУ БН в части расхолаживания через межпакетное пространство были разработаны трехмерная расчетная модель и методический подход на базе ПК FlowVision.

Геометрическая модель реактора (рис. 2) включает в себя фрагменты активной зоны, напорной камеры, центральной поворотной колонны (ЦПК), ПТО, АТО и главный циркуляционный насос (ГЦН) с напорным трубопроводом. Модель представляет собой одну четвертую часть реальной конструкции реактора и воспроизводит одну его теплоотводящую петлю.

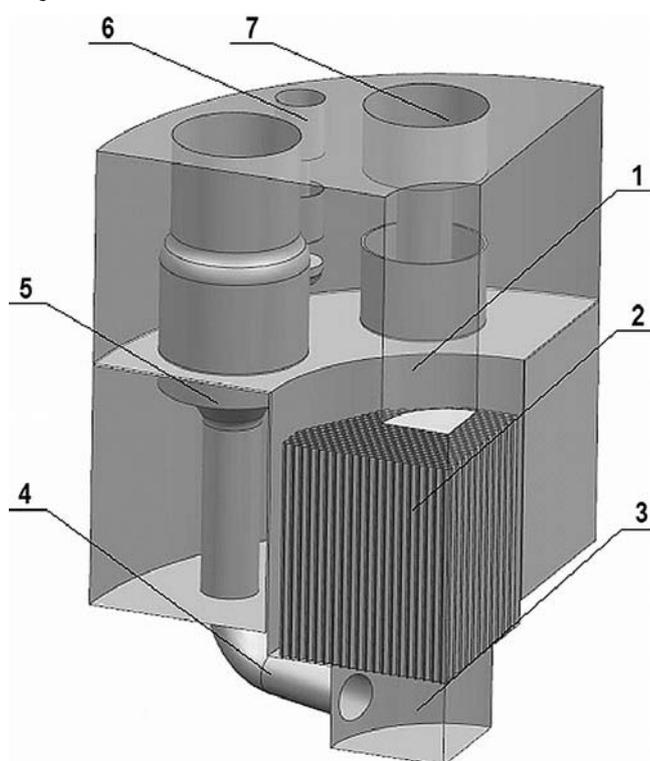


Рис. 2. Геометрическая модель реактора типа БН: 1 – ЦПК; 2 – активная зона; 3 – напорная камера; 4 – напорный трубопровод; 5 – ГЦН; 6 – АТО; 7 – ПТО

Характерные размеры конструктивных элементов (ТВС с межпакетным пространством, АТО, ПТО, ГЦН) значительно меньше габаритов основной части конструкции. Разрешение течения в них приводит к значительному увеличению количества расчетных ячеек и необходимости использования для расчета высокопроизводительных вычислительных ресурсов. Для оптимизации времени и затрачиваемых вычислительных ресурсов, а также корректного моделирования течения натрия в элементах реактора применялась модель зазора FlowVision [10], которая позволяет решать задачи течения жидкости в узких, по сравнению с основной геометрией, каналах без дополнительного измельчения расчетной сетки. Модель зазора предполагает, что в узком канале имеет место установившееся плоское течение, для которого известны силы сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса.

Для упрощения расчетной модели реактора ТВС активной зоны были представлены в виде шестигранных элементов, в которых моделировались гидравлическое сопротивление и подогрев теплоносителя. Предполагается, что сопротивление равномерно распределено по всей высоте сборки, а энерговыделение сосредоточено в пределах тепловыделяющей (активной) части (рис. 3).

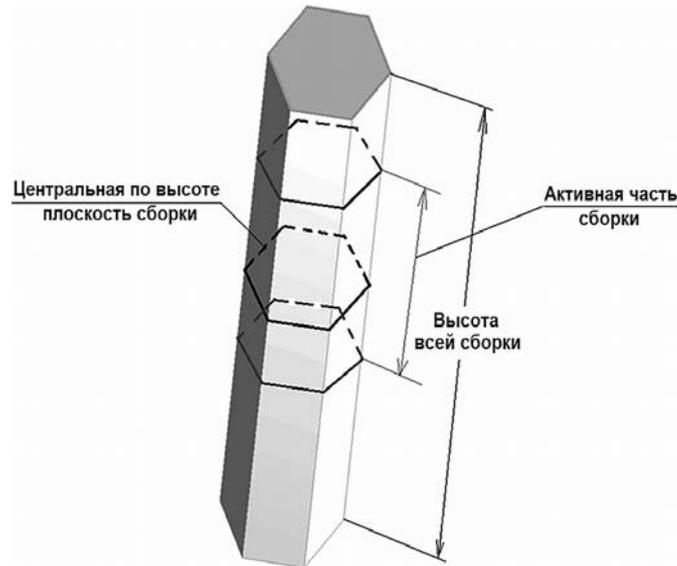


Рис. 3. Расчетная модель ТВС активной зоны

Модель ТВС представляет собой металлический корпус в виде шестигранной трубы, на котором поставлены условия сопряжения с окружающим сборку натрием и с натрием, заполняющим объем ТВС. Внутри ТВС задан пористый каркас, моделирующий тепловыделяющие элементы.

При моделировании активной зоны учтены зоны гидравлического профилирования (ГП) – восемь зон ГП в области размещения основных (центральных) ТВС, четыре зоны ГП в сборках боковой зоны воспроизводства, а также зоны со сборками отражателя, биологической защиты и отработавших ТВС. Зоны ГП характеризуются различными значениями энерговыделений и расхода теплоносителя.

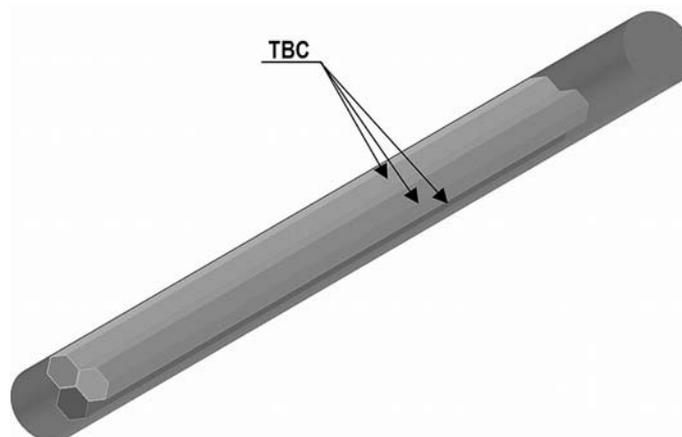


Рис. 4. Геометрия модели с тремя ТВС и межпакетным пространством

Для исследования влияния размеров сетки на результат расчета и возможности

применения модели зазора FlowVision [10] при моделировании межпакетного пространства был выполнен расчет модели, состоящей из трех типов ТВС с разными энерговыделениями (рис. 4).

В данной модели межпакетное пространство геометрически отделено от внутреннего объема ТВС. Для учета теплопередачи от натрия внутри ТВС к натрию в межпакетном пространстве чехлы всех сборок были выделены в отдельные, сопряженные по теплообмену с проточной частью, расчетные подобласти, в которых рассчитывалось уравнение теплопроводности в твердом теле.

Рассматривался режим, в котором теплоноситель с заданным расходом поступает в расчетную область и распределяется по пучку ТВС и межпакетному пространству. Нагретый в ТВС теплоноситель поступает в полость за активной зоной и движется через выходную границу расчетной области. При этом контрольными величинами были перепад давления на ТВС, расход теплоносителя через каждую ТВС, расход теплоносителя через межпакетное пространство, значения температур теплоносителя на выходе из пучка ТВС.

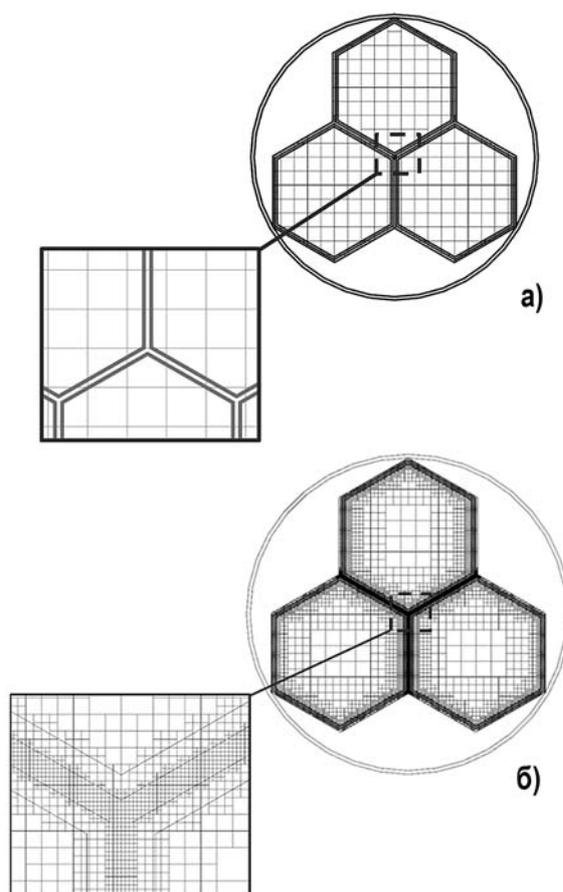


Рис. 5. Упрощенная (а) и подробная (б) расчетные сетки (вид сверху)

Для двух расчетных сеток были выполнены расчеты модели упрощенной и подробной сборок. В упрощенной расчетной сетке (рис. 5а) использовалась неравномерная начальная сетка, сгущенная на входе теплоносителя в пучок ТВС. Для получения подробной сетки упрощенная была локально измельчена в области чехлов ТВС и межпакетного пространства (рис. 5б). Стоит отметить, что в упрощенной сетке, в

отличие от подробной, моделирование течения натрия в межпакетном пространстве осуществляется посредством модели зазора. Количество расчетных ячеек для упрощенной сетки составило 37 тыс., для подробной – 25 млн.

Расчеты, полученные на упрощенной и подробной сетках, сравнивались друг с другом. В качестве эталонного принималось решение, полученное на подробной расчетной сетке. Сравнение результатов расчета показало, что отличие полученных результатов на упрощенной сетке с использованием модели зазора от результатов, полученных для подробной сетки без модели зазора, не превышает 7%, что говорит о правомерности использования принятой методики расчета активной зоны без детального разрешения межпакетного пространства.

Для учета теплопереноса в ПТО и АТО использовалась модель пористого каркаса FlowVision. Трубные пучки теплообменников были заменены на кольцевые элементы, в которых одновременно задавалось наличие двух сред (натрия первого и второго контуров) в виде сплошной и дисперсной (пористый каркас) фаз. Дисперсная фаза представляет собой жесткий каркас, который заполняет определенную долю расчетной области и позволяет моделировать неравномерность распределения температуры второго контура РУ БН. Теплообмен между контурами учитывался посредством задания теплофизических и гидравлических характеристик в сплошной и дисперсной фазах с помощью пользовательских переменных [11]. Эти переменные задавались с учётом температур натрия на входе в теплообменник в обоих контурах, площади поверхности теплообмена, коэффициента теплопередачи между контурами, массового расхода и удельной теплоемкости условной дисперсной среды.

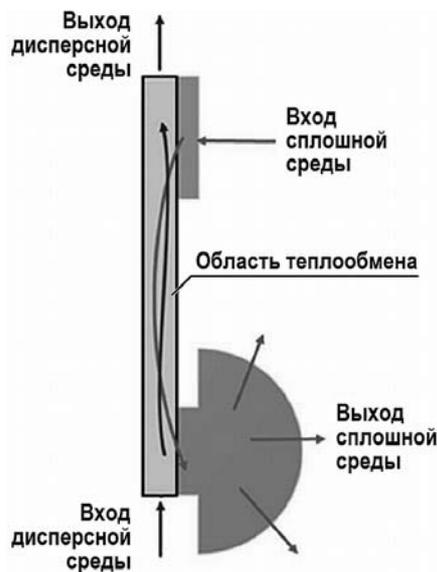


Рис. 6. Геометрия расчетной области тестового теплообменника

Модель пористого каркаса позволила оценить неравномерность распределения температуры в обоих контурах. Данный подход был рассмотрен на примере расчета в осесимметричной постановке течения натрия через тестовый теплообменник (рис. 6).

Система уравнений математической модели теплообменника состоит из нескольких уравнений, численно решаемых программным комплексом FlowVision [12]: полные уравнения Навье-Стокса, уравнение неразрывности (закон сохранения массы), уравнения закона сохранения энергии, записанные через удельную энтальпию, а также уравнения k - ε -модели турбулентности. Для того, чтобы учесть пористый каркас, в уравнение Навье-Стокса добавляется член типа силы Дарси в виде

$$-FV - DV(Vn_v),$$

где V – скорость жидкости, м/с; n_v – единичный вектор в направлении скорости; F [кг/м³с] и D [кг/м⁴] – коэффициенты, отвечающие за линейную и квадратичную по скорости часть силы сопротивления. Эти коэффициенты определяются либо эмпирически, либо путем детальных расчетов движения жидкости внутри ТВС. Модель пористого каркаса добавляет также вытеснение жидкости в результате наличия каркаса в объеме, занимаемом жидкостью.

В результате тестового расчета теплообменника было получено, что параметры теплообменника, определяемые программой, отличаются от проектных параметров менее чем на 1%.

РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ РЕАКТОРА

Для апробации разработанного методического подхода и расчетной модели был выполнен расчет трехмерного течения теплоносителя в реакторе БН в режиме работы на номинальной мощности.

Течение теплоносителя и теплообмен в проточной части реактора в FlowVision описывалось с помощью модели турбулентного течения несжимаемой жидкости с учетом сопряженного теплообмена. В качестве границ расчетной модели с точки зрения задания условий входа и выхода теплоносителя принимаются сечения ГЦН в области напорного трубопровода. На входе в модель задается нормальная составляющая массовой скорости течения теплоносителя, его температура, а также начальная степень турбулизации потока. На выходе из расчетной области задавалось условие свободного выхода с заданием нулевого значения статического давления.

Использовалась неравномерная начальная сетка, сгущенная к области ТВС. Для более детального моделирования течения теплоносителя начальная сетка была дополнительно локально измельчена (адаптирована) в области стенок ТВС. Количество расчетных ячеек в модели составило около 5,6 млн. Небольшое для такого класса задач количество расчетных ячеек связано с расчетом одной из четырех теплоотводящих петель реактора, а также с использованием модели зазора.

Сравнение результатов, полученных численным моделированием, с проектными данными подтвердило, что разработанная расчетная модель дает хорошее соответствие получаемых результатов с данными проекта. Отклонение среднего значения подогрева теплоносителя в активной зоне, полученное в расчете, не превышает 3% от проектного значения, а погрешность значения среднего перепада давления в активной зоне составляет не более 7,4%. Основной тракт циркуляции натриевого теплоносителя в номинальном режиме работы реактора реализуется по направлению ГЦН - напорная камера - активная зона - ПТО - ГЦН. Максимальная температура теплоносителя реализуется на выходе из активной зоны.

ВЫВОДЫ

Разработан методический подход для расчетного исследования течения теплоносителя в реакторе при расхолаживании через межпакетное пространство с использованием программного комплекса вычислительной гидродинамики FlowVision.

С использованием разработанного методического подхода и модели реактора выполнено расчетное исследование номинального режима течения теплоносителя в реакторе в трехмерной постановке.

Сравнение результатов численного моделирования с проектными данными подтвердило, что методика расчета течения теплоносителя в межпакетном пространстве активной зоны с использованием модели зазора программы FlowVision дает хорошее соответствие получаемых результатов с ожидаемыми параметрами. Отсутствие

необходимости разрешать зазоры между ТВС с использованием подробной расчетной сетки приводит к значительной экономии вычислительных ресурсов и времени, затрачиваемого на расчеты.

Моделирование теплообменников АТО и ПТО с помощью модели пористого каркаса дает возможность выполнения расчета распределения температур по первому и промежуточному контурам САОТ с учетом тепловой инерционности конструктивных материалов.

Разработанный методический подход дает возможность с требуемой точностью решать сложные задачи течения теплоносителя в реакторах типа БН в режимах как нормальной эксплуатации, так и в режимах нарушения нормальной эксплуатации, требующих подключения САОТ.

Литература

1. Pialla D., Tenchine D., Li S., Gauthé P., Vasile A., Baviere R., Tauveron N., Perdu F., Maas L., Cocheme F., Huber K., Cheng X. Overview of the system alone and system/CFD coupled calculations of the PHENIX Natural Circulation Test within the THINS project. // Nuclear Engineering and Design. – 2015. – Vol. 290. – PP. 78-86.
2. Rakhi Anil Kumar Sharma, Velusamy K. Integrated CFD investigation of heat transfer enhancement using multi-tray core catcher in SFR. // Annals of Nuclear Energy. – 2017. – Vol. 104. – PP. 256-266.
3. Merzari E., Shemon E., Yu Y., Thomas J., Obabko A., Jain R., Mahadevan V., Solberg J., Ferencz R., Whitesides R. Full Core Multi-Physics Simulation with Offline Core Deformation. / ANL/NE-15/42. – Nuclear Engineering Division, Argonne National Laboratory. – 2015.
4. Корсун А.С., Меринов И.Г., Харитонов В.С., Баясхаланов М.В., Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Первичко В.А. Расчетное моделирование теплогидравлических процессов в тепловыделяющих сборках с жидкометаллическим теплоносителем в приближении анизотропного пористого тела. // Теплоэнергетика. – 2019. – №4. – С. 12-22.
5. International Atomic Energy Agency, Status of Fast Reactor Research and Technology Development. / IAEA-TECDOC-1691. – Vienna: IAEA, 2012. – 832 p.
6. Park Jong-Pil, Jeong Ji Hwan, Lee Tae-Ho. Scientific design of a large-scale sodium thermal-hydraulic test facility for KALIMER – Part II: Validation of reactor pool design using CFD analyses. // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – Vol. 76. – PP. 439-450.
7. Рогожкин С.А., Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Осипов С.Л., Сазонова М.Л., Фадеев И.Д., Шепелев С.Ф., Шмелев В.В. Разработка модели турбулентного теплопереноса для жидкометаллического натриевого теплоносителя и её верификация. // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014 – Т. 7. – № 3. – С. 306-316.
8. Rogozhkin S.A., Fadeev I.D., Shepelev S.F., Aksenov A.A., Mosunova N.A., Frick P.G. V&V Status of CFD Codes Applied to BN Reactors. / Proc. of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR-17). Paper IAEA-CN245-418. – Yekaterinburg, Russian Federation, 2017. – 10 p.
9. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ FlowVision. Регистрационный номер 492 от 19.12.2019 г.
10. Ozturk U., Soganci S., Akimov V., Tutkun M., Aksenov A. Validation of FlowVision CFD on ICCS2015 Test Case: Application of Gap Model and SGGR for Leakage Flow Prediction in a Dry Screw Compressor. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 604 (012010).
11. Рогожкин С.А., Аксенов А.А., Пахолков В.В., Жлуктов С.В., Жестков М.Н., Шепелев С.Ф., Шмелев В.В. Разработка методики расчетного анализа теплогидравлических процессов в реакторе на быстрых нейтронах с применением кода FlowVision. // Компьютерные исследования и моделирование. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 87-94.
12. Руководство пользователя FlowVision. Версия 3.12.01. – М.: 000 «ТЕСИС», 2020. – 1549 с.

Поступила в редакцию 10.09.2020 г.

Авторы

Диденко Денис Владимирович, инженер-конструктор

E-mail: nikanorov@okbm.nnov.ru

Балуев Дмитрий Евгеньевич, ведущий инженер-конструктор

E-mail: nikanorov@okbm.nnov.ru

Никаноров Олег Леонидович, начальник бюро, канд. техн. наук

E-mail: nikanorov@okbm.nnov.ru

Рогожкин Сергей Александрович, начальник отдела, канд. техн. наук

E-mail: rogozhkin@okbm.nnov.ru

Шепелёв Сергей Фёдорович, главный конструктор РУ БН, канд. техн. наук

E-mail: shepelev@okbm.nnov.ru

Аксёнов Андрей Александрович, технический директор, канд. физ.-мат. наук

E-mail: andrey@tesis.com.ru

Щеляев Александр Евгеньевич, заместитель директора по проектам и продажам

E-mail: alex@flowvision.ru

Жестков Максим Николаевич, специалист центра технической поддержки

E-mail: mzhestkov@flowvision.ru

UDC 621.039.5:(532+536) БН+621.039.513:621.039.526

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGICAL APPROACH FOR ANALYTICAL STUDY OF THE COOLANT FLOW IN THE PROCESS OF SODIUM-COOLED REACTOR COOLDOWN

Didenko D.V. *, Baluev D.E. *, Nikanorov O.L. *, Rogozhkin S.A. *, Shepelev S.F. *, Aksenov A.A. **, Zhestkov M.N. **, Shchelyaev A.E. **

JSC «Afrikantov OKBM»

15 Burnakovskiy proezd, 603074 Nizhny Novgorod, Russia

«TESIS» LTD

of. 705, 18 Yunnatov Str., 127083 Moscow, Russia

ABSTRACT

A methodological approach for an analytical study of thermohydraulic processes occurring in a fast sodium cooled reactor was developed using the domestic software package for computational fluid dynamics – FlowVision. This approach considers an integral layout of the primary equipment of the reactor plant, peculiarities of heat exchange in a liquid metal coolant, and also makes it possible, using proved simplifications, to simulate heat-mass-exchange in the course of coolant flow through the core and heat exchanging equipment of the reactor. In particular, the methodological approach can be used to justify safety during reactor cooldown and for other analytical studies that require simulating the core and heat exchange equipment of an integral-type reactor.

A brief overview was given of the methodological approaches developed previously to study cooldown processes of liquid metal cooled reactors. The general principles of

these approaches, their advantages and disadvantages were highlighted.

A 3-D analytical model consisting of one loop (one-fourth part of the reactor) of an advanced reactor was developed. The authors justified the applicability of the FlowVision gap model for simulating the space between the heat-generating assemblies of the core (inter-package space) as well as the porous skeleton model for simulating the heat exchange equipment of the reactor. An analytical study of the nominal flow regime of the coolant in the reactor was carried out. The paper shows that the developed methodological approach is applicable to solving problems of coolant flow in various operating modes of liquid metal cooled reactor plants.

Key words: liquid metal cooled reactor, integral layout, methodological approach, CFD, FlowVision, core, LMS, reactor cooldown, inter-wrapper space.

REFERENCES

1. Pialla D., Tenchine D., Li S., Gauthier P., Vasile A., Baviere R., Tauveron N., Perdu F., Maas L., Cocheme F., Huber K., Cheng X. Overview of the system alone and system/CFD coupled calculations of the PHENIX Natural Circulation Test within the THINS project. *Nuclear Engineering and Design*. 2015, v. 290, pp. 78-86.
2. Rakhi, Anil Kumar Sharma, Velusamy K. Integrated CFD investigation of heat transfer enhancement using multi-tray core catcher in SFR. *Annals of Nuclear Energy*. 2017, v. 104, pp. 256-266.
3. Merzari E., Shemon E., Yu Y., Thomas J., Obabko A., Jain R., Mahadevan V., Solberg J., Ferencz R., Whitesides R. *Full Core Multi-Physics Simulation with Offline Core Deformation*. ANL/NE-15/42, Nuclear Engineering Division, Argonne National Laboratory, 2015.
4. Korsun A.S., Merinov I.G., Kharitonov V.S., Bayaskhalanov M.V., Chudanov V.V., Aksenova A.E., Prvichko V.A. Numerical Simulation of Thermal-Hydraulic Processes Liquid-Metal Cooled Fuel Assemblies in the Anisotropic Porous Body Approximation. *Теплоэнергетика*. 2019, no. 4, pp. 12-22 (in Russian).
5. International Atomic Energy Agency, *Status of Fast Reactor Research and Technology Development*, IAEA-TECDOC-1691. Vienna, IAEA, 2012, 832 p.
6. Park Jong-Pil, Jeong Ji Hwan, Lee Tae-Ho. Scientific design of a large-scale sodium thermal-hydraulic test facility for KALIMER – Part II: Validation of reactor pool design using CFD analyses. *Annals of Nuclear Energy*. 2015, v. 76, pp. 439-450.
7. Rogozhkin S.A., Aksenov A.A., Zhlukto V.S., Osipov S.L., Sazonova M.L., Fadeev I.D., Shepelev S.F., Shmelev V.V. Development and verification of a turbulent heat transport model for sodium-based liquid metal coolants. *Vychislitel'naya Mekhanika Sploshnykh Sred*. 2014, v. 7, no. 3, pp. 306-316 (in Russian).
8. Rogozhkin S.A., Fadeev I.D., Shepelev S.F., Aksenov A.A., Mosunova N.A., Frick P.G. V&V Status of CFD Codes Applied to BN Reactors. *Proc. of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR-17)*. Paper IAEA-CN245-418. Yekaterinburg, Russian Federation, 2017, 10 p.
9. Attestation Passport of the Computer Program FlowVision. Registration No 492 from 19.12.2019 (in Russian).
10. Ozturk U., Soganci S., Akimov V., Tutkun M., Aksenov A. Validation of FlowVision CFD on ICCS2015 Test Case: Application of Gap Model and SGGR for Leakage Flow Prediction in a Dry Screw Compressor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, v. 604 (012010).
11. Rogozhkin S.A., Aksenov A.A., Pakholkov V.V., Zhlukto V.S., Zhestkov M.N., Shepelev S.F., Shmelev V.V. Development of methodology for computational analysis of thermohydraulic processes in fast-neutron reactor with FlowVision CFD software. *Komp'yuternye Issledovaniya i Modelirovaniye*. 2017, v. 9, no. 1, pp. 87-94 (in Russian).
12. *User's Guide FlowVision*. Version 3.12.01. Moscow. «TESIS» Ltd. Publ., 2020, 1549 p. (in Russian).

Authors

Didenko Denis Vladimirovich, Design Engineer

E-mail: nikanorov@okbm.nnov.ru

Baluev Dmitry Evgenievich, Lead Design Engineer

E-mail: nikanorov@okbm.nnov.ru

Nikanorov Oleg Leonidovich, Head of Design Group, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: nikanorov@okbm.nnov.ru

Rogozhkin Sergey Aleksandrovich, Head of the Department, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: rogozhkin@okbm.nnov.ru

Shepelev Sergey Fyodorovich, Chief Designer of BN Reactor Plants, Cand.Sci. (Engineering)

E-mail: shepelev@okbm.nnov.ru

Aksenov Andrey Aleksandrovich, Technical Director, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: andrey@tesis.com.ru

Shchelyaev Aleksandr Evgenievich, Deputy Director for Projects and Sales

E-mail: alex@flowvision.ru

Zhestkov Maksim Nikolaevich, Technical Support Center Specialist

E-mail: mzhestkov@flowvision.ru