

На правах рукописи



ВЕРТИКОВ ЕВГЕНИЙ АНДРЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА
ПРОГРАММЫ SC-CORE ДЛЯ СУБКАНАЛЬНОГО
ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПОЛНОМАСШТАБНЫХ
АКТИВНЫХ ЗОН ВВЭР**

Специальность 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл,
радиационная безопасность

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

Научный руководитель: **Олексюк Дмитрий Анатольевич**, кандидат технических наук, начальник отдела теплофизических исследований НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Мелихов Олег Игорьевич**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры атомных электрических станций Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва;

Афремов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, директор отделения теплофизики Акционерного общества «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежалея», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, г. Москва.

Защита диссертации состоится 13 октября 2026 г., начало в 14:00, на заседании диссертационного совета 02.1.003.08 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте <http://nrcki.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 02.1.003.08

кандидат физико-математических наук



Д.А. Шкаровский

Актуальность темы. На протяжении всей истории развития атомной энергетики России и мира непрерывно совершенствовалось программное обеспечение для моделирования мультифизических процессов в реакторных установках. Современный уровень надежности и эффективности реакторных установок достигнут благодаря расчетным программам, прошедшим верификацию и валидацию на экспериментальных данных. При этом значительный объем материалов, обосновывающих безопасность реакторных установок, составляют теплогидравлические расчеты.

В отделе теплофизических исследований НИЦ «Курчатовский институт» на протяжении нескольких десятилетий разрабатывается и совершенствуется семейство теплогидравлических программ SC, основанных на субканальном (поячейковом) методе моделирования течения теплоносителя. Данный метод представляет собой специализированный способ решения уравнений течения теплоносителя в пределах стержневых сборок, при котором расчетная область разбивается в поперечном направлении на множество параллельных подканалов, обменивающихся между собой энергией, импульсом и массой за счет молекулярно-турбулентной диффузии, поперечного течения теплоносителя и других явлений. В России и за рубежом субканальные программы являются основным средством обоснования теплотехнической надежности активных зон (АЗ) ядерных реакторов с водой под давлением. Обоснованное повышение теплотехнических запасов создает предпосылки для оптимизации экономических показателей и для внедрения инновационных технических решений в уже существующие энергоблоки. Повышение теплотехнических запасов, к которым, в первую очередь, относятся минимальный запас до кризиса теплоотдачи и максимальное массовое паросодержание, может быть достигнуто несколькими путями.

В качестве одного из возможных путей предлагается переход к использованию «best-estimate» методик, основанных на реалистичных моделях и граничных условиях без консервативных упрощений. Характерным примером служит методика учета местоположения «горячей» ТВС в АЗ при расчете минимального запаса до кризиса теплоотдачи. В отечественной практике моделируется взаимосвязь рассматриваемой «горячей» ТВС с теплогидравлическим каналом, представляющим оставшуюся часть АЗ. Данный подход позволяет учесть снижение расхода через «горячую» ТВС вследствие конвективного перераспределения, вызванного ее повышенной мощностью, но не принимает во внимание тепловые и гидравлические характеристики окружающих ТВС. В зарубежной практике моделируется взаимосвязь рассматриваемой «горячей» ТВС с множеством теплогидравлических каналов, которые соответствуют соседним ТВС или их отдельным частям и характерный поперечный размер которых увеличивается по мере отдаления от

«горячей» ТВС. Хотя данный метод лишен вышеуказанного недостатка, он требует дополнительного обоснования корректности применения замыкающих соотношений для укрупненных каналов. В качестве альтернативного решения выступает субканальное мелкосетчатое моделирование полномасштабной АЗ, обладающее рядом преимуществ:

- возможность моделирования при минимальном количестве допущений;
- возможность моделирования смешанных АЗ, в которых существует гидравлическая неравноценность различных ТВС;
- возможность учета неравномерности расхода и температуры теплоносителя между ТВС на входе в АЗ.

Субканальные программы с возможностью моделирования полномасштабных АЗ также могут быть использованы в качестве теплогидравлических модулей в составе мультифизических программных комплексов класса «best-estimate».

Таким образом, актуальной является задача разработки для субканальной программы численного алгоритма, обеспечивающего возможность проведения теплогидравлических расчетов полномасштабных АЗ ядерных реакторов с водой под давлением, и его последующее обоснование путем верификации, валидации и кросс-верификации.

Цель работы – разработка численного алгоритма для субканальной теплогидравлической программы SC-Core и обоснование его применимости для проведения быстрых расчетов полномасштабных активных зон ядерных реакторов с водой под давлением, в том числе и в случае наличия ярко-выраженных поперечных конвективных перетоков.

Задачи работы. Для достижения цели были поставлены следующие основные задачи:

1. Анализ отечественного и мирового опыта разработки численных алгоритмов применительно к моделированию теплогидравлических процессов в АЗ водоохлаждаемых ядерных реакторов, включая различные подходы к моделированию двухфазных потоков и связанные с ними постановки исходной системы дифференциальных уравнений, способы ее дискретизации в пространстве и методы решения систем нелинейных уравнений (СНУ) и разреженных систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большой размерности.

2. Разработка и реализация в составе программы SC-Core численного алгоритма для субканального моделирования течения теплоносителя в пределах полномасштабных АЗ ядерных реакторов с водой под давлением.

3. Анализ используемых в отечественных субканальных программах замыкающих соотношений и реализация в составе программы SC-Core наиболее представительных из них.

4. Разработка и использование набора верификационных задач для подтверждения корректности исходного кода численного алгоритма программы SC-Core.

5. Обоснование программы SC-Core для расчета полномасштабных АЗ ядерных реакторов в случае наличия ярко-выраженных поперечных конвективных перетоков, обусловленных входной неравномерностью распределения расхода по ТВС, наличием в АЗ гидравлически неравноценных ТВС различного конструктивного исполнения, а также наличием частичной блокировки проходного сечения ТВС в месте установки дистанционирующих решеток.

6. Демонстрация эффективности разработанного численного алгоритма программы SC-Core при работе на многопроцессорных вычислительных кластерах.

Научная новизна работы заключается в получении следующих результатов:

1. Для субканального моделирования адаптирован и реализован в составе программы SC-Core алгоритм решения уравнений термогидродинамики SIMPLE.

2. Выполнена параллельная реализация разработанного численного алгоритма с использованием технологий OpenMP и MPI. С использованием восьми процессов расчет единичного стационарного состояния полномасштабной АЗ реактора ВВЭР-1000 занимает приблизительно 10 минут.

3. Впервые разработан набор верификационных задач для обоснования корректности численных алгоритмов субканальных программ. Разработанный набор позволяет подтверждать корректность численной аппроксимации конвективных слагаемых и источников членов во всех четырех уравнениях сохранения математической модели однофазных субканальных программ. Набор может быть использован для обоснования программ данного класса при прохождении процедуры аттестации в Ростехнадзоре.

4. Программа SC-Core, по сравнению с отечественными программами аналогами, обоснована для расчета задач с наличием ярко-выраженных поперечных конвективных перетоков. С использованием программы возможно проводить теплогидравлические расчеты полномасштабных АЗ с целью определения теплотехнических запасов при непарциальном режиме работы ГЦНА, в случае наличия ТВС различного конструктивного исполнения, а также в случае частичной блокировки проходного сечения ТВС.

Практическая значимость. Программа SC-Core использовалась в цикле работ по расчетному обоснованию теплотехнических запасов АЗ реактора ВВЭР-С. С целью определения топливного цикла с наилучшими теплогидравлическими характеристиками выполнена серия расчетов 60-градусного сектора симметрии АЗ в каждый момент времени каждого рассмотренного топливного цикла. Оценена предельно допустимая мощность реактора ВВЭР-С при работе на одном ГЦНА с учетом увеличения входной неравномерности расхода теплоносителя.

С использованием программы SC-Core рассчитаны максимально допустимые температуры на выходе из ТВС для формирования таблицы допустимых режимов при вводе в эксплуатацию реактора ВВЭР-ТОИ Курской АЭС-2.

Ведутся работы по использованию программы SC-Core в составе системы внутриреакторного контроля для интерпретации показаний термодатчиков СВРД. Прорабатываются варианты внедрения программы SC-Core в состав мультифизических программных комплексов с целью расчета минимального запаса до кризиса теплоотдачи в АЗ реакторов ВВЭР при протекании динамических процессов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Численный алгоритм субканальной теплогидравлической программы SC-Core, предназначенный для расчета полномасштабных АЗ ядерных реакторов с водой под давлением на многопроцессорных вычислительных кластерах.

2. Набор верификационных задач, позволяющий обосновывать корректность субканальных теплогидравлических программ, в том числе и при прохождении их аттестации в Ростехнадзоре.

3. Расчетное обоснование программы SC-Core путем выполнения валидации на экспериментальных данных и кросс-верификации с программой CFD-класса.

Достоверность и обоснованность. Достоверность программы SC-Core и получаемых путем ее использования результатов подтверждается:

1. использованием при разработке численного алгоритма программы SC-Core релевантных методов механики сплошных сред, математической физики и вычислительной математики;

2. использованием в составе программы SC-Core замыкающих соотношений, распространенных при проведении теплогидравлических расчетов в отечественной атомной отрасли и рекомендуемых надзорным органом;

3. проведением верификации, валидации и кросс-верификации программы SC-Core.

Апробация работы. Основные положения, сформулированные в диссертационной работе, были представлены на следующих российских и международных научных конференциях:

1. XXIV Международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 10-11 апреля 2024 г., Подольск, Россия;

2. XVII Минский международный форум по теплообмену. Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова, 20-24 мая 2024 г., Минск, Беларусь;

3. Межотраслевая научно-техническая конференция «Моделирование динамических процессов в ЯЭУ» (Динамика-2024). ФГУП «НИТИ им. Александрова», 04-07 июня 2024 г., Сосновый бор, Россия.

Публикации. Основные результаты научных исследований, положенных в основу диссертационного исследования, изложены в статьях, рецензируемых ВАК, а также зарегистрированы в виде РИД (программы для ЭВМ). Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад соискателя.

1. Разработана, с использованием языка программирования Fortran, архитектура программы SC-Core, соответствующая актуальным принципам проектирования программного обеспечения для высокопроизводительных вычислений.

2. Проведен анализ литературных источников по модернизации существующих и созданию новых численных алгоритмов в расчетных инструментах для моделирования теплогидравлических процессов в ядерных реакторах с водой под давлением.

3. На основании выполненного анализа, адаптирован и реализован в составе программы SC-Core алгоритм SIMPLE для решения нелинейной системы уравнений течения теплоносителя.

4. Разработанный алгоритм верифицирован с целью подтверждения порядка аппроксимации на созданном наборе задач, имеющих аналитические решения.

5. Проведены теплогидравлические расчеты по программе SC-Core с целью обоснования возможности ее применения в задачах с наличием ярко-выраженных конвективных поперечных перетоков. Выполнена валидация на экспериментальных данных по выравниванию неравномерности расхода теплоносителя на входе в ТВС и по обтеканию теплоносителем ДР в фрагментах смешанных АЗ. Выполнена кросс-верификация с программой CFD-класса на задаче по обтеканию теплоносителем заблокированной дистанционирующей решетки.

6. Выполнено тестирование программы SC-Core, подтвердившее работоспособность и высокую производительность при работе на многопроцессорных вычислительных кластерах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, и содержит 170 страниц машинописного текста, 47 рисунков, 13 таблиц, 202 формулы. Список литературы включает 170 наименований.

Основные положения и результаты исследований

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель, задачи, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость, степень достоверности и апробация результатов, полученных в диссертации.

В первой главе приводится анализ литературных источников, посвященных методам и программам теплогидравлического расчета активных зон, при этом особое внимание уделяется субканальному приближению. В статье [2] определено место субканального метода в общей иерархии теплогидравлических расчетных инструментов и представлена ретроспектива развития отечественных субканальных программ.

Для получения актуальной картины о применяемых в субканальных программах численных алгоритмах проанализировано 19 расчетных инструментов, разрабатываемых и используемых в 8 странах, с точки зрения: возможности моделирования нестационарных процессов; модели двухфазного потока; метода дискретизации в пространстве; алгоритма решения СНУ и СЛАУ. Исторически наиболее часто используемым алгоритмом являлась послойная маршевая процедура, изначально предложенная в программе COBRA-IV, на основании которой, в определенном смысле, разработаны многие современные субканальные программы. Однако в более современных разработках наблюдается активное использование вариаций алгоритмов Ньютона и SIMPLE, которые конструируют СЛАУ для всей расчетной области в целом. Использование данных алгоритмов также сопровождается применением схем интерполяции более высокого порядка аппроксимации.

Во второй главе представлено детализированное описание разработанного численного алгоритма программы SC-Core, предназначенной для моделирования стационарного течения теплоносителя в пределах полномасштабных АЗ ядерных реакторов с водой под давлением с использованием субканального метода и одножидкостной модели двухфазного потока.

Для дискретизации исходной системы дифференциальных уравнений сохранения используется метод контрольных объемов на разнесенных сетках. В данном случае помимо основного множества контрольных объемов, которые представлены на рисунке 1 и по которым выполняется интегрирование уравнений неразрывности и сохранения энергии, дополнительно выделяются два множества – смещенных в аксиальном и поперечном направлениях и предназначенных для получения соответствующих уравнений движения. Ниже представлена полученная в результате дискретизации СНУ.

Уравнение неразрывности:

$$m_{i,j+\frac{1}{2}} - m_{i,j-\frac{1}{2}} + \Delta z_j \cdot \sum_{k=1}^{N_t^k} w_{i,j,k} = 0 \quad (1)$$

где суммирование выполняется по всем «соседям» контрольного объема.

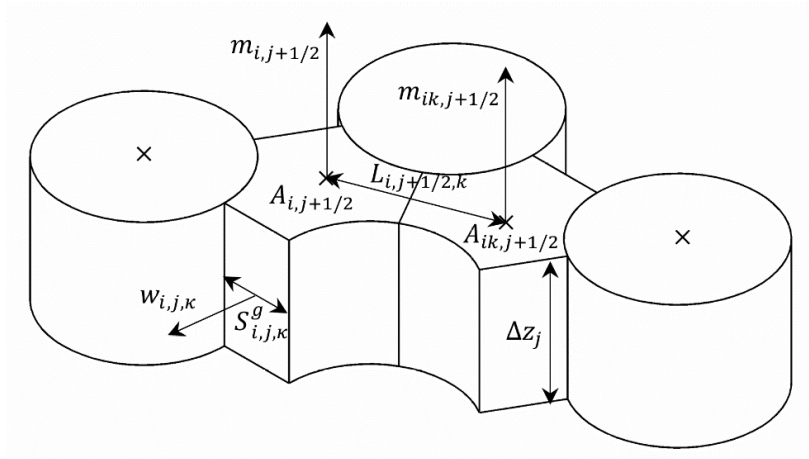


Рисунок 1 – два соседних регулярных контрольных объема основной расчетной сетки: i – индекс подканала; j – индекс аксиального слоя, ik – индекс подканала, являющегося k -ым «соседом» для i -го

Уравнение сохранения энергии:

$$\begin{aligned}
 & [m \cdot h]_{i,j+\frac{1}{2}} - [m \cdot h]_{i,j-\frac{1}{2}} + \Delta z_j \cdot \sum_{k=1}^{N_i^k} [w \cdot h]_{i,j,k} = \\
 & = \Delta z_j \cdot \sum_{r=1}^{N_i^r} q_{i,j,r}^l + \Delta z_j \cdot \sum_{w=1}^{N_i^w} L_{i,j,w} \cdot R_{i,iw,j}^{eff} \cdot (T_{iw,j} - T_{i,j}) + \quad (2) \\
 & + \Delta z_j \cdot \sum_{k=1}^{N_i^k} \lambda_{i,j,k} \cdot S_{i,j,k}^g \cdot \frac{T_{ik,j} - T_{i,j}}{L_{i,j,k}} + \Delta z_j \cdot \sum_{k=1}^{N_i^k} w_{i,j,k}^T \cdot (h_{ik,j} - h_{i,j})
 \end{aligned}$$

В правой части уравнения (2) слагаемые соответственно отвечают за подвод энергии от тепловыделяющих элементов, обмен энергией через необогреваемую теплопроводящую стенку, обмен энергией за счет теплопроводности и турбулентных поперечных перетоков.

Аксиальное уравнение движения:

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{m^2 \cdot v}{A} \right]_{i,j+1} - \left[\frac{m^2 \cdot v}{A} \right]_{i,j} + \Delta z_{j+\frac{1}{2}} \cdot \sum_{k=1}^{N_i^k} \left[w \cdot \frac{m \cdot v}{A} \right]_{i,j+\frac{1}{2},k} = \\
 & = -V_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot g \cdot \rho_{i,j+\frac{1}{2}} - V_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{\Delta z_{j+\frac{1}{2}}} - \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\lambda_f \cdot \frac{\Delta z}{d_{hy}} + \xi^{loc} \right) \cdot \frac{m^2 \cdot v}{A} \right]_{i,j+\frac{1}{2}} + \quad (3) \\
 & + \Delta z_{j+\frac{1}{2}} \cdot \sum_{k=1}^{N_i^k} K^T \cdot w_{i,j+\frac{1}{2},k}^T \cdot \left(\left[\frac{m \cdot v}{A} \right]_{ik,j+\frac{1}{2}} - \left[\frac{m \cdot v}{A} \right]_{i,j+\frac{1}{2}} \right)
 \end{aligned}$$

В правой части уравнения (3) слагаемые соответственно отвечают за действие силы гравитации, силы, вызванной градиентом давления, за потери на трение и местные сопротивления, а также за обмен импульсом за счет турбулентных поперечных перетоков.

Поперечное уравнение движения:

$$\begin{aligned} & \left[L \cdot w \cdot \frac{m \cdot v}{A} \right]_{i,j+\frac{1}{2},k} - \left[L \cdot w \cdot \frac{m \cdot v}{A} \right]_{i,j-\frac{1}{2},k} = \\ & = -V_{i,j,k} \cdot \frac{p_{ik,j} - p_{i,j}}{L_{i,j,k}} - \frac{1}{2} \cdot \left[V \cdot \frac{\xi^w}{L} \cdot \frac{w \cdot |w| \cdot v}{(S^g)^2} \right]_{i,j,k} \end{aligned} \quad (4)$$

Основными неизвестными в СЛУ (1) – (4) являются следующие величины: $h_{i,j}$, $p_{i,j}$, $m_{i,j+1/2}$ и $w_{i,j,k}$. Параметры V , A , Δz , S^g , L , d_{hy} полагаются известными геометрическими характеристиками расчетной области. Для вычисления ρ , T , λ , K^T , w^T , λ_f , ξ^{loc} , ξ^w , α используются замыкающие соотношения. Обоснование выбора соответствующих эмпирических корреляций и методик выполнено в [3] путем анализа зависимостей, используемых в отечественных аттестованных субканальных программах SC-INT (НИЦ «Курчатовский институт»), ТИГРСП (АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС») и КАНАЛ (АО «ОКБМ Африкантов»).

Для вычисления $h_{i,j,k}$ и $m_{i,j+1/2,k}$, переносимых конвективным потоком в поперечном направлении, используются схема интерполяция против потока или центральная разность. Для расчета $h_{i,j+1/2}$, $m_{i,j}$ и $w_{i,j+1/2,k}$, которые сдвинуты в аксиальном направлении относительно основных расчетных узлов, реализован широкий набор схем интерполяции: против потока первого и второго порядков аппроксимации, схема QUICK третьего порядка.

Для решения полученной СЛУ адаптирован и программно реализован алгоритм SIMPLE, являющийся основным подходом к решению задач вычислительной гидродинамики в программах CFD-класса. Основная идея численного алгоритма заключается в следующем. Исходя из текущего поля давления p^* путем решения СЛАУ, соответствующих линеаризованным уравнениям движения (3) и (4), находятся приближенные поля аксиальных расходов m^* и поперечных конвективных перетоков w^* . Далее вводятся поправки:

$$m = m^* + m'; \quad w = w^* + w'; \quad p = p^* + p' \quad (5)$$

Соотношения для взаимосвязи поправок m' и w' с поправкой к давлению p' получаются исходя из соответствующих уравнений движения путем отбрасывания слагаемых, содержащих искомые значения в соседних узлах расчетной сетки. Далее, путем подстановки в (1) итоговых выражений для m и w , получаются уравнения для определения поправок к полю давления, после нахождения которых выполняется обновление значений переменных и переход к следующей итерации алгоритма.

В программе SC-Core для решения возникающих в итерационном процессе СЛАУ используется открытая библиотека для научных вычислений PETSc. Наиболее ресурсоемкой частью реализованного численного алгоритма является решение СЛАУ для нахождения

поправок к полю давления, которое выполняется с использованием метода GMRES и предобуславливателя GAMG.

В третьей главе выполнено обоснование разработанного численного алгоритма программы SC-Core путем выполнения верификации, валидации и кросс-верификации с программой CFD-класса.

Для субканальных теплогидравлических программ наиболее распространенными верификационными тестами является следующая пара изотермических задач:

- пара различных подканалов, на вход в которые подается одинаковый расход;
- пара идентичных подканалов, на вход в которые подается различный расход.

Для первой задачи проверяется факт установления расходов теплоносителя, конечные значения которых в случае отсутствия турбулентного обмена импульсом возможно определить аналитически из условия равенства перепадов давления. Для второй задачи проверяется факт выравнивания расходов до идентичных значений. Однако данные задачи не позволяют подтвердить корректность скорости выравнивания расходов, а лишь обосновывают правильность установившихся значений по причине отсутствия соответствующих аналитических решений.

Для верификации численного алгоритма программы SC-Core автором разработан набор из четырех верификационных задач. Разработанный набор затрагивает все уравнения, присутствующие в однофазной субканальной программе, а также позволяет подтвердить корректность расчета всех основных переменных, изменения которых вызваны различными источниковыми членами.

Основной проблемой при разработке набора верификационных задач является невозможность получения аналитических распределений расходов и давления даже в простой геометрии, например, в двухканальной модели. В данном случае для оценки порядка численной аппроксимации в качестве эталонного решения можно было бы использовать результаты численного решения на очень мелкой сетке. Однако вместо этого было принято решение внедрить в правые части уравнений неразрывности (1), сохранения энергии (2) и движения в аксиальном направлении (3) дополнительные источниковые члены. Данные слагаемые позволяют тестировать численные алгоритмы с использованием так называемого метода искусственных решений («method of manufactured solutions»). Суть метода заключается в выборе аналитического распределения искомой величины и дальнейшего определения источникового члена, при задании которого результаты применения численного алгоритма можно будет сравнивать с выбранным аналитическим выражением.

Задача № 1. Течение в изолированном подканале, в который подводится по синусоидальному закону энергия от примыкающих к нему тепловыделяющих элементов.

$$\begin{aligned}
m_{in} \cdot \frac{\partial h(z)}{\partial z} &= q^l(z) \\
h(0) &= h_{in} \\
q^l(z) &= q_{avg}^l \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{z}{H}\right)
\end{aligned} \tag{6}$$

Задача № 2. Адиабатическое течение в паре идентичных подканалов, на вход в которые подается теплоноситель с одинаковым расходом, но разной энтальпией. Подканалы обмениваются друг с другом энергией за счет турбулентных поперечных перетоков, принимающих постоянное значение.

$$\begin{aligned}
m_{in} \cdot \frac{\partial h_1(z)}{\partial z} &= w^T \cdot (h_2(z) - h_1(z)) \\
m_{in} \cdot \frac{\partial h_2(z)}{\partial z} &= w^T \cdot (h_1(z) - h_2(z)) \\
h_1(0) &= h_{1,in}; \quad h_2(0) = h_{2,in}
\end{aligned} \tag{7}$$

Задача № 3. Адиабатическое течение в изолированном подканале с источником массы, распределенным по синусоидальному закону. Гравитация и трение отсутствуют.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial m(z)}{\partial z} &= S^m(z) \\
m(0) &= m_{in} \\
\frac{1}{A^2} \cdot \frac{\partial v(p) \cdot m^2(z)}{\partial z} &= -\frac{\partial p(z)}{\partial z} + \frac{u_0}{A} \cdot S^m(z) \\
p(H) &= p_{out} \\
S^m(z) &= w_{avg} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{z}{H}\right)
\end{aligned} \tag{8}$$

Задача № 4. Адиабатическое течение в паре идентичных подканалов, в одном из которых задан источник массы. Предполагается, что теплофизические свойства не зависят от давления. Турбулентный обмен импульсом не рассматривается. Коэффициент гидравлического сопротивления трения принимает постоянное значение.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial m_1(z)}{\partial z} + w(z) &= 0 \\
\frac{\partial m_2(z)}{\partial z} - w(z) &= S_2^m(z) \\
m_1(0) &= m_{1,in}; \quad m_2(0) = m_{2,in} \\
\frac{v}{A^2} \cdot \frac{\partial m_1^2(z)}{\partial z} + \frac{1}{A} \cdot w(z) \cdot \frac{m_1(z) \cdot v}{A} &= -\frac{\partial p_1(z)}{\partial z} - \rho \cdot g - \frac{\lambda_f}{d_{hy}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1^2(z) \cdot v}{A^2} \\
\frac{v}{A^2} \cdot \frac{\partial m_2^2(z)}{\partial z} - \frac{1}{A} \cdot w(z) \cdot \frac{m_1(z) \cdot v}{A} &= -\frac{\partial p_2(z)}{\partial z} - \rho \cdot g - \frac{\lambda_f}{d_{hy}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{m_2^2(z) \cdot v}{A^2} \\
p_1(H) &= p_2(H) = p_{out}
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\frac{S^g}{L} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(w(z) \cdot \frac{m_1(z) \cdot v}{A} \right) = -(p_2(z) - p_1(z)) - \frac{1}{2} \cdot \xi_w \cdot \frac{w(z) \cdot |w(z)| \cdot v}{(S^g)^2}$$

Верификация программы SC-Core на разработанном наборе задач подтвердила корректность реализации схем интерполяции 1-го, 2-го и 3-го порядков аппроксимации для конвективных слагаемых и численного алгоритма в целом.

В качестве следующего этапа обоснования программы SC-Core выступает валидация. Проблемам обоснования погрешностей субканальных теплогидравлических программ посвящена работа [4]. Некоторые результаты валидации программы SC-Core представлены в [5] для расчета «классических» для субканальных программ параметров: аксиального перепада давления, локальных массовой скорости и температуры теплоносителя, критического теплового потока. Для обоснования возможности применения программы SC-Core для расчета полномасштабных АЗ с учетом неравномерности в распределении расхода теплоносителя на входе, а также смешанных АЗ, в пределах которых располагаются ТВС различного конструктивного исполнения, дополнительно выполняется валидация на:

- экспериментах по выравниванию расхода по высоте АЗ реактора типа ВВЭР при наличии его входной неравномерности, выполненных на стенде ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (см. рисунок 2);
- экспериментах по обтеканию теплоносителем дистанционирующих решеток в фрагментах смешанных АЗ реактора типа PWR, выполненных компанией Mitsubishi Heavy Industries Ltd (см. рисунок 3).

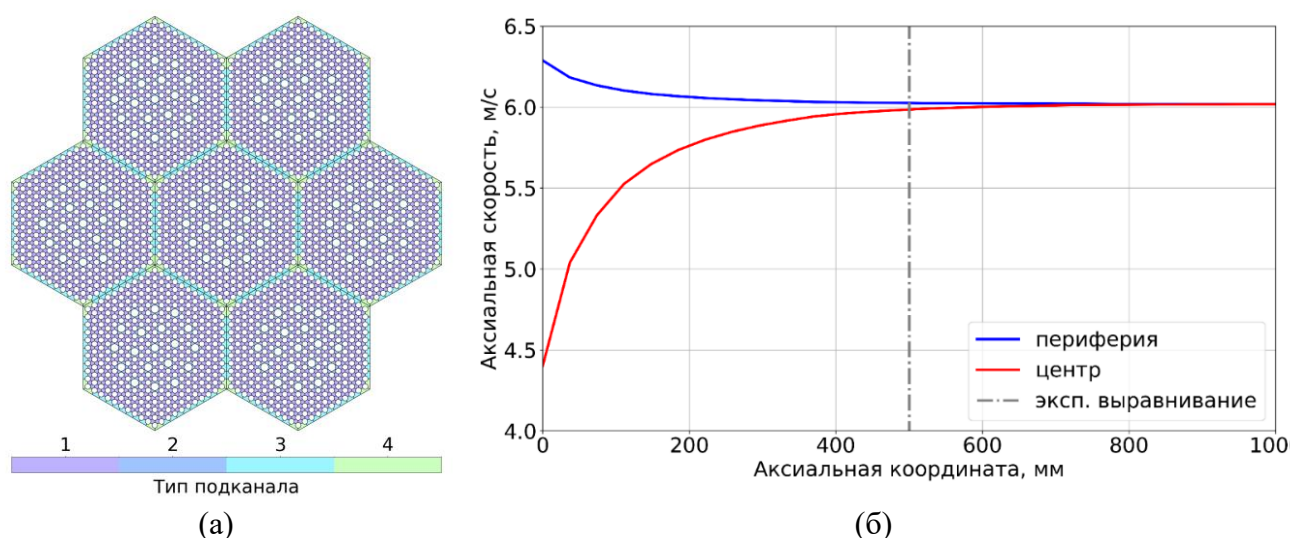
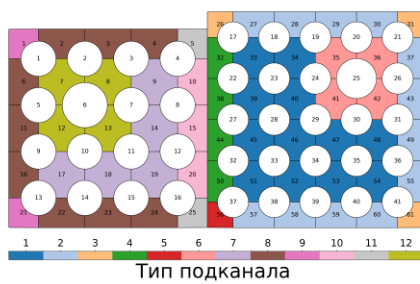
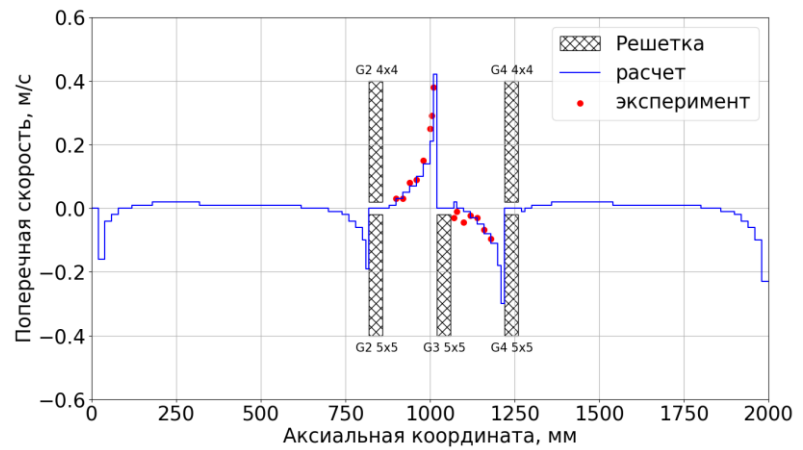


Рисунок 2 – Результаты валидации на модели ОКБ «ГИДРОПРЕСС», состоящей из семи ТВС ВВЭР-1000: (а) – разбиение поперечного сечения на подканалы; (б) – распределение аксиальной скорости теплоносителя в случае наличия 30 % входной неравномерности



(а)



(б)

Рисунок 3 – Результаты валидации на модели Case-2, состоящей из пучков стержней в квадратной упаковке 5x5 и 4x4: (а) – разбиение поперечного сечения на подканалы; (б) – распределение скорости теплоносителя в поперечном направлении

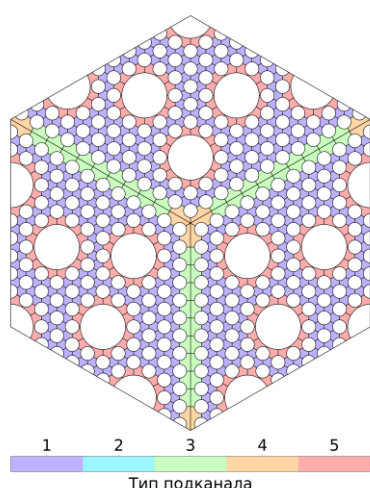
Таким образом, выполнена валидация программы SC-Core для расчета:

- аксиального перепада давления: $\Delta = -0.1 \%$ и $\sigma = 4.6 \%$;
- локальных скоростей теплоносителя: $\Delta = 0.6 \%$ и $\sigma = 3.3 \%$;
- локальных температур теплоносителя: $\Delta = 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\sigma = 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$;
- критического теплового потока: $\Delta = 0.2 \%$ и $\sigma = 10.7 \%$;
- длины выравнивания расхода при его входной неравномерности по ТВС;
- поперечных конвективных перетоков в смешанных АЗ: $\Delta = -0.9 \%$ и $\sigma = 2.2 \%$.

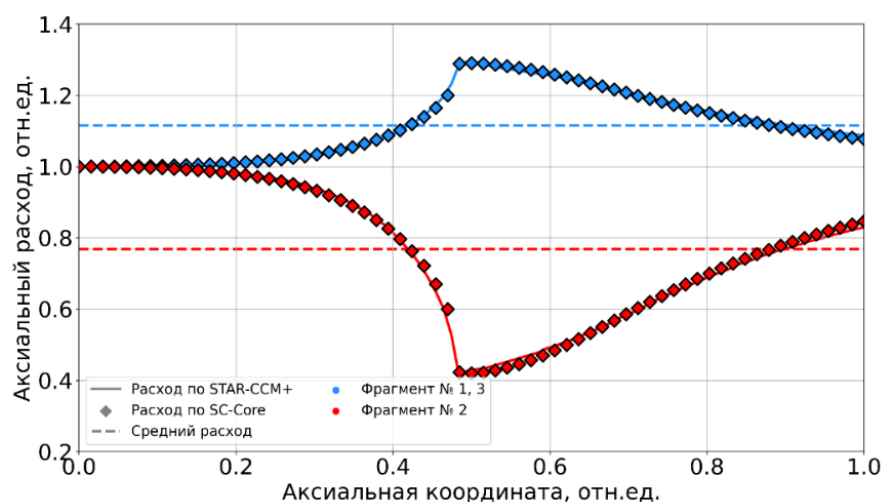
Заключительном этапе обоснования программы SC-Core является проведение кросс-верификации с программой CFD-класса. Рассматривается задача моделирования гидродинамики в потоке, формируемом пучками продольно обтекаемых твэлов в фрагменте АЗ ВВЭР-С, состоящим из трех 120° сегментов ТВС-С. В центре расчетной области, высота которой составляет 1 м, установлена штатная дистанционирующая решетка (ДР) с высотой ячеек 30 мм. В программе STAR-CCM+ заблокированная ДР моделируется в приближении пористого тела с коэффициентом пористости 25 %. В программе SC-Core заблокированная ДР моделируется следующей комбинацией:

- увеличением коэффициента гидравлического сопротивления заблокированного участка ДР по сравнению со штатным;
- уменьшением до 0.1 % относительно номинальной ширины зазоров между сегментом ТВС с заблокированной ДР и двумя другими.

Результаты кросс-верификации представлены на рисунке 4. При сопоставлении результатов моделирования по программам SC-Core и STAR-CCM+ получено среднеквадратичное $\sigma = 4.3 \%$ и околонулевое среднеарифметическое отклонения.



(а)



(б)

Рисунок 4 – Результаты кросс-верификации программ STAR-CCM+ и SC-Core на задаче о блокировке проходного сечения ТВС-С: (а) – разбиение поперечного сечения на подканалы; (б) – распределение аксиального расхода ТВС

В четвертой главе резюмированы ключевые особенности программы SC-Core, продемонстрирована эффективность параллельной реализации основного численного алгоритма, а также выполнен расчет максимально допустимой тепловой мощности реактора ВВЭР-С при работе на одном ГЦНА. В таблице 1 выполнено сравнение численного алгоритма и замыкающих соотношений для программ SC-INT и SC-Core.

Таблица 1 – Сравнение характеристик программ SC-INT и SC-Core

Характеристика	SC-INT	SC-Core
Метод дискретизации в пространстве	МКО на 2-ух сетках	МКО на 3-ех сетках
Алгоритм решения СНУ	маршевый, многопроходный	SIMPLE
Схемы интерполяции	против потока 1-го порядка	против потока 1-го и 2-го порядков; QUICK
Параллельный расчет набора независимых состояний	да	да
Параллельный расчет единичного состояния	нет	да
Поправка к λ_f по сравнению с круглой трубой	методика Кобзаря Л.Л.	на основании результатов CFD моделирования
Зависимость $\xi(Re)$	нет	да
Учет влияния РИ на параметры теплоносителя и КТП	да	нет
Корреляции для расчета КТП	широкий набор, в том числе и коммерческие корреляции	корреляции Безрукова Ю.А., Олексюка Д.А.

В таблице 2 представлены возможности программ SC-INT и SC-Core применительно к моделированию течения теплоносителя в крупномасштабных фрагментах АЗ ВВЭР и оценки теплотехнических запасов. С использованием разработанного алгоритма программа SC-Core предоставляет уникальные возможности для решения задач, в которых субканальное теплогидравлическое моделирование АЗ в целом или ее крупномасштабных фрагментов является необходимым. При этом по производительности применительно к рассматриваемому классу задач, программа SC-Core занимает лидирующие позиции по сравнению со всеми программами, характеристики которых были рассмотрены при проведении литературного обзора.

Таблица 2 – Сравнение возможностей расчета крупномасштабных фрагментов АЗ ВВЭР по программам SC-INT и SC-Core

Задача	SC-INT	SC-Core
Оценка теплотехнических запасов в смешанной загрузке АЗ ВВЭР-1000 4-го энергоблока Балаковской АЭС	12 часов	1.5 часа в однопоточном режиме; 18 минут при использовании 8 процессов
Определение максимально допустимой тепловой мощности реактора ВВЭР-С при работе на одном ГЦНА	сходимость не достигнута	19 минут при использовании 8 процессов
Оценка теплотехнических запасов в секторе симметрии АЗ ВВЭР-С при блокировке проходного сечения «горячей» ТВС	сходимость не достигнута	15 минут в однопоточном режиме
Моделирование показаний термопар СВРД реактора ВВЭР-1200	крайне затруднительно по причине производительности	выполнена валидация на показаниях с трех энергоблоков
Расчет запаса до кризиса теплоотдачи в АЗ ВВЭР-1200 при протекании аварийного процесса	крайне затруднительно по причине производительности	выполнено сравнение с программным комплексом ATHLET/BIPR-VVER

Программа SC-Core имеет следующую реализацию параллельного расчета единичного состояния. Используется опция библиотеки PETSc «mpi_linear_solver_server», которая позволяет осуществлять параллельное решение СЛАУ с использованием технологии MPI, в то время как весь пользовательский код выполняется нулевым процессом. При этом функции создания матриц, векторов свободных членов, расчета замыкающих соотношений для всей расчетной области имеют параллельную реализацию с использованием технологии OpenMP. Таким образом в программе SC-Core реализован гибридный параллелизм.

В качестве тестовой задачи, на которой демонстрируется эффективность параллельной реализации численного алгоритма, выступает активная зона реактора

ВВЭР-1000, набранная из 163 кассет ТВС-2М. Моделирование выполняется при номинальных режимных параметрах, соответствующих 104 % тепловой мощности. На рисунке 5 представлена зависимость от количества процессов и потоков времени работы программных модулей для:

- решения системы нелинейных уравнений в целом;
- решения СЛАУ для нахождения поправок к давлению;
- расчета замыкающих соотношений как наиболее ресурсоемкого участка из тех, параллельная реализация которых осуществляется через OpenMP.

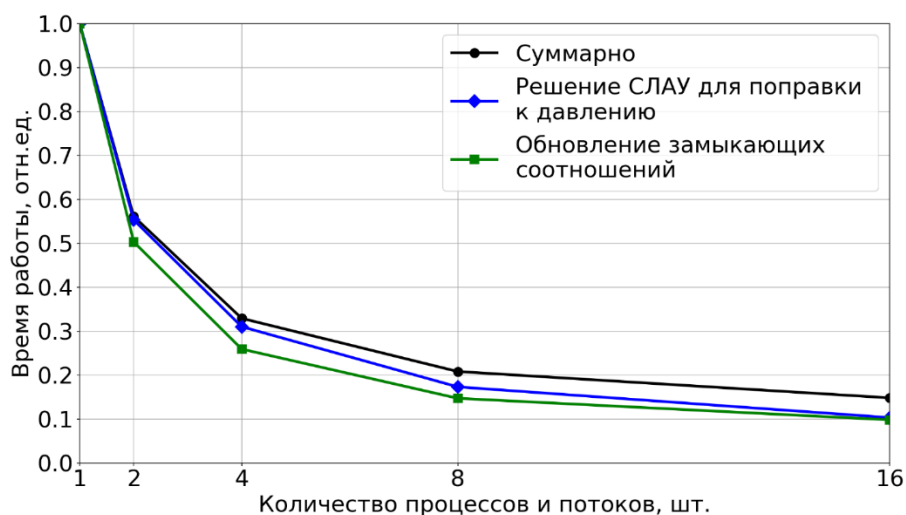


Рисунок 5 – Зависимость времени работы различных программных единиц от количества процессов и потоков

В качестве критерия сходимости задано достижение невязки по поперечным конвективным перетокам в 0.1 %, по аналогии с валидационными расчетами. В данном случае, в абсолютных единицах получено приблизительное время работы программы 100, 56, 33, 21 и 15 минут соответственно для числа N , равного 1, 2, 4, 8 и 16. При этом время решения СЛАУ для нахождения поправок к давлению изменяется от 65 до 45 процентов от суммарного по мере увеличения числа N . Стоит отметить, что указанная невязка в 0.1 % по поперечным конвективным перетокам может быть слишком сильной для проведения большинства теплогидравлических расчетов. Увеличение ее на порядок до 1 % уменьшает время работы программы с использованием $N = 8$ процессов и потоков до ~10 минут с учетом считывания входных и записи выходных файлов.

Заключение

1. Выполнен анализ численных алгоритмов, использующихся для моделирования теплогидравлических процессов в АЗ ядерных реакторов с водой под давлением. Представлено описание субканального приближения как наиболее широко используемого инженерного подхода для определения характеристик течения теплоносителя в пределах

пучков стержней. Кратко отражено место субканальных программ в общей иерархии теплогидравлических расчетных инструментов, включая возможные взаимодействия как с полноконтурными программами, так и с CFD-программами. Для получения актуальной картины текущего состояния субканальных расчетных инструментов проанализировано 19 программ, разрабатываемых и используемых в 8 странах. Отмечено, что одножидкостные программы не только активно используются, но и продолжают развиваться как инструменты, обладающие обширной валидационной базой и хорошей скоростью для проведения инженерных теплогидравлических расчетов, включая полномасштабные АЗ ядерных реакторов с водой под давлением. Для дискретизации в пространстве исходной системы ДУ сохранения массы, движения и энергии, большинство рассмотренных программ использует метод контрольных объемов. При этом алгоритмы SIMPLE и Ньютона, а также их модификации, являются наиболее распространенными способами решения возникающих в результате дискретизации нелинейных систем уравнений.

2. Разработан и реализован численный алгоритм для субканальной теплогидравлической программы SC-Core, предназначенной для проведения стационарных расчетов течения водяного теплоносителя в пределах пучков стержней, включая полномасштабные АЗ ядерных реакторов с водой под давлением. Программа SC-Core основана на одножидкостной модели двухфазного потока. Таким образом, исходная постановка включает в себя четыре уравнения для пароводяной смеси: неразрывности, энергии и движения в аксиальном и поперечном направлениях. Для дискретизации в пространстве используется метод контрольных объемов на разнесенных сетках. Выделяется три сетки: основная для дискретизации уравнений неразрывности и энергии, и смещенные в аксиальном и поперечном направлениях для дискретизации соответствующих уравнений движения. В данном подходе скалярные величины определяются в центрах контрольных объемов основной сетки, в то время как неизвестные, связанные с проекциями вектора скорости, то есть аксиальный массовый расход и поперечные конвективные перетоки, определяются на соответствующих гранях контрольных объемов основной сетки. При этом для вычисления значений параметров, расположенных не в соответствующих узлах, реализованы различные схемы интерполяции: против потока 1-го и 2-го порядка аппроксимации, а также схема QUICK 3-го порядка аппроксимации. Для решения системы нелинейных уравнений программно реализован алгоритм на основании SIMPLE подхода.

3. На основании анализа замыкающих соотношений, используемых в отечественных аттестованных субканальных теплогидравлических программах, выбраны и реализованы в программе SC-Core наиболее представительные из них. Дополнительно, для повышения автономности и обеспечения возможности использования программы SC-Core в составе

мультифизических программных комплексов, реализован «твэльный» модуль. Данный модуль предназначен для экспресс-расчёта теплофизических параметров твэлов при их одномерном рассмотрении с учетом термомеханических процессов, происходящих при эксплуатации в АЗ ядерных реакторов с водой под давлением.

4. Для субканальных теплогидравлических программ разработан набор из четырех верификационных задач, предназначенный для подтверждения корректности реализации основных численных алгоритмов и достижения заявленных порядков аппроксимации при использовании различных схем интерполяции. Первые две задачи предназначены для верификации уравнения энергии: в изолированном канале при заданном профиле энерговыделения, и в случае взаимодействия двух подканалов посредством поперечных турбулентных перетоков. Третья задача предназначена для верификации аксиального уравнения движения: рассматривается изолированный канал с заданным источником массы, имитирующим приток теплоносителя извне. Последняя задача, для создания которой был использован метод искусственных решений, позволяет оценить корректность моделирования гидродинамики потока в системе из двух взаимодействующих подканалов. Применение программы SC-Core для решения разработанного набора верификационных задач позволило продемонстрировать зависимость достигаемых отклонений между численным моделированием и аналитическим решением от используемой схемы интерполяции и высоты контрольных объемов.

5. Выполнено обоснование программы SC-Core для расчета полномасштабных АЗ ядерных реакторов в случае наличия ярко-выраженных поперечных конвективных перетоков. На первом этапе, с использованием экспериментальных данных на моделях НИЦ «Курчатовский институт» и ГНЦ РФ – ФЭИ, программа валидирована для расчета «классических» для субканальных программ параметров: перепада давления, локальных скоростей и температур теплоносителя, а также критического теплового потока. Далее для подтверждения корректности моделирования выравнивания входной неравномерности в распределении расхода по ТВС выполнена валидация программы на экспериментальных данных, полученных специалистами ОКБ «ГИДРОПРЕСС» на кластере из 7 ТВС ВВЭР-1000. Для обоснования возможности применения программы для расчета смешанных АЗ осуществлена валидация на результатах экспериментальных исследований гидродинамики в фрагментах смешанных АЗ реакторов PWR, выполненных компанией Mitsubishi Heavy Industries. И наконец, в качестве последней причины возникновения ярко-выраженных поперечных конвективных перетоков, рассмотрена частичная блокировка проходного сечения ТВС. Выполнена кросс-верификация с программой CFD-класса STAR-CCM+ на задаче о моделировании гидродинамики потока в фрагменте АЗ реактора

ВВЭР-С, состоящей из трех 120° сегментов ТВС-С, в одном из которых блокируется поперечное сечение в месте установки ДР с коэффициентом пористости 25 %.

6. Продемонстрирована эффективность параллельной реализации программы SC-Core с использованием технологий MPI и OpenMP при расчете единичного стационарного состояния полномасштабной АЗ реактора ВВЭР-1000 с номинальными режимными параметрами. С использованием 8 процессов и потоков, время расчета на кластерном процессоре составляет приблизительно 10 минут. Достигнутое время позволяет использовать программу SC-Core в качестве инженерного инструмента для определения теплогидравлических характеристик и теплотехнических запасов АЗ ядерных реакторов с водой под давлением. С использованием программы SC-Core выполнена оценка максимально допустимой тепловой мощности реактора ВВЭР-С при работе на одном ГЦНА.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

1. Олексюк Д.А., **Вертиков Е.А.**, Хамаза В.А., Щербинин А.А. SC-Core v1.3 // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025610629, Российская Федерация. – заявл. 20.12.2024. – опубл. 13.01.2025. – заявитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Публикации в научных журналах:

2. **Вертиков Е.А.**, Зубков А.Г., Олексюк Д.А и др. Отечественные субканальные теплогидравлические программы: современное состояние и тенденции к развитию // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. – 2025. – № 3. – С. 181–205.

3. **Вертиков Е.А.**, Олексюк Д.А., Зубков А.Г., Малютин М.А. К вопросу о валидации поячейковых кодов для расчета активных зон реакторов типа ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. – 2025. – № 1. – С. 232-244.

4. Олексюк Д.А., **Вертиков Е.А.** Подходы к валидации ячейковых расчетных программ, используемых для обоснования теплотехнической надежности активных зон ВВЭР, и проблемы обоснования их погрешностей // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. – 2025. – № 1 (39). – С. 10-26.

5. **Вертиков Е.А.**, Олексюк Д.А., Носков А.С., Малютин М.А., Запоржин К.В., Зубков А.Г. Оценка представительности экспериментальных данных по критическому тепловому потоку с использованием субканального теплогидравлического кода SC-Core // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. – 2025. – № 1 (39). – С. 27-42.