

УДК 519.63: 621.039.534...23

РАЗРАБОТКА СУБКАНАЛЬНОГО ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО КОДА SC-CORE ДЛЯ РАСЧЕТА ПОЛНОМАСШТАБНЫХ АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРОВ С ВОДОЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Е. А. Вертиков¹, Д. А. Олексюк¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

Аннотация. В работе представлено математическое описание программы SC-Core, предназначенной для проведения стационарных теплогидравлических расчетов в субканальном (ячейковом) приближении активных зон ядерных реакторов с водой под давлением. Приведена система дискретных уравнений, описывающая течение двухфазного теплоносителя в одножидкостном приближении, полученная методом контрольных объемов с использованием смещенных сеток. Приведено описание реализованного в программе SC-Core алгоритма параллельного расчета полномасштабных активных зон, а также результаты тестовых расчетов с его применением. Показано преимущество предложенного алгоритма по сравнению с традиционными методами теплогидравлического расчета активных зон.

Ключевые слова: теплогидравлический расчет, субканальное приближение, активная зона, ВВЭР, метод контрольных объемов

Введение

Значительный объем материалов, обосновывающих безопасность реакторных установок, занимают теплогидравлические расчеты. Одним из способов проведения теплогидравлических расчетов активных зон является субканальный (ячейковый) метод, при котором исследуемая область пространства разбивается на множество параллельных подканалов, взаимодействующих между собой посредством турбулентного и конвективного поперечного перемешивания теплоносителя. Программные средства, использующие данный метод, широко распространены в России и за рубежом и применяются для обоснования теплотехнической надежности активных зон ядерных реакторов, так как с одной стороны, в отличие от одномерных «системных» кодов, позволяют учитывать неоднородность параметров теплоносителя в пределах поперечного сечения тепловыделяющих сборок, а с другой стороны обладают приемлемым, по сравнению с CFD-кодами, временем счета. Наличие значительного количества работ, посвященных разработке новых и развитию уже созданных субканальных кодов как в России, так и за рубежом, подтверждает актуальность данного метода моделирования. Некоторая обзорная информация, касающаяся различий в способах расчета конвективных поперечных перетоков, способов моделирования потока двухфазного теплоносителя и иных особенностей различных субканальных кодов, представлена в обзорных работах [1-3]. В России наиболее известными представителями данного класса расчетных кодов являются такие программы как SC-1 [4] и SC-INT [5] (НИЦ «Курчатовский институт»), ВЯЗ-М [6] (ГНЦ РФ ФЭИ) и ТИГРСП [7] (ОКБ «ГИДРОПРЕСС»), КАНАЛ [8] («ОКБМ Африкантов»).

Одним из важнейших преимуществ теплогидравлических кодов, использующих субканальный метод моделирования, является возможность проведения их валидации на экспериментальных данных, полученных на теплофизических стендах России и мира. Большинство вышеперечисленных кодов имеют действующие аттестационные паспорта, позволяющие осуществлять расчеты локальных температур теплоносителя, температур оболочек тепловыделяющих элементов и величин критического теплового потока в пределах стержневыхборок. Программа SC-INT также позволяет учитывать влияние наличия в

потоке теплоносителя решеток-интенсификаторов тепломассообмена на вышеперечисленные характеристики [9]. В то время как экспериментальная проверка локальных структур течения теплоносителя, получаемых с использованием CFD-кодов, применительно к реакторным условиям на текущий момент фактически невозможна.

Особенности расчета полномасштабных активных зон

При проведении обоснования теплотехнической надежности активной зоны одной из определяющих величин является запас до кризиса теплоотдачи. Для определения минимального значения величины DNBR в отечественной практике для стационарных условий эксплуатации реакторов типа ВВЭР осуществляется расчет единичной ТВС с использованием консервативных режимных параметров и профилей энерговыделения.

Однако стоит отметить, что при проектировании новых реакторных установок становится актуальной задача реалистичной оценки запаса до кризиса теплоотдачи для каждого момента разрабатываемой топливной кампании. Для выполнения данной задачи могут использоваться различные подходы.

Первый подход заключается в расчете наиболее энергонапряженной ТВС с использованием «мелкого» разбиения и установлении связи данной ТВС с отдельным каналом, моделирующим всю оставшуюся часть активной зоны. Данный подход, благодаря наличию в нем перераспределения расхода между данной ТВС и активной зоной, позволяет получить для «горячей» ТВС перепад давления, равный перепаду давления на полной АЗ. Однако стоит отметить, что корректность вышеуказанного перераспределения требует экспериментального обоснования, так как на его характеристики оказывает влияние местоположение исследуемой ТВС в АЗ и характеристики окружающих кассет.

Второй подход заключается в моделировании всей активной зоны в целом. Для «горячей» ТВС используется «мелкое» разбиение, а по мере отдаления от нее характерный размер взаимосвязанных каналов увеличивается. Стоит отметить, что данный подход использовался за рубежом для моделирования активных зон реакторов типа PWR и BWR с квадратной упаковкой твэлов [10]. Для треугольной упаковки тепловыделяющих элементов существует несколько вариантов «укрупненного» разбиения ТВС:

1) Первый вариант заключается в разбиении ТВС на шесть секторов симметрии. Однако в данном случае отсутствует взаимообмен между противолежащими в пределах ТВС каналами, что может привести при определенных радиальных профилях энерговыделения к некорректному распределению расхода теплоносителя между каналами. Данное разбиение использовалось в программе Кедр-А [11] для выделения зон, которые на первой итерации численного алгоритма предполагаются независимыми, а на второй итерации рассчитываются с учетом взаимодействия друг с другом.

2) Второй вариант заключается в разбиении ТВС на восемь трапециевидных каналов, вследствие чего он лишен вышеописанного недостатка по причине наличия каналов, моделирующих центральную область ТВС. Данное разбиение использовалось в программном комплексе PERMAK-3D/SC-1 [12], предназначенном для проведения связанных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов с целью определения детального распределения энерговыделения по поперечному сечению и высоте АЗ в стационарных условиях эксплуатации.

3) Третий вариант заключается в разбиении ТВС на шесть секторов симметрии с последующим разбиением каждого из них на четыре треугольных канала. Данное разбиение использовалось в программном комплексе SC-REACTOR [13], предназначенном для проведения теплогидравлического расчёта ядерного реактора с совмещением трёхмерного и субканального подходов для различных участков реактора.

Пример комбинирования некоторых вышеописанных вариантов представлен на рисунке 1. Стоит отметить, что в случае моделирования асимметричных ТВС (к примеру ТВС-2М реактора ВВЭР-1200) могут появляться дополнительные типы подканалов, обладающие индивидуальными геометрическими характеристиками. Использование данного

подхода к проведению теплогидравлических расчетов активных зон исторически связано с существовавшими ограничениями в вычислительных ресурсах.

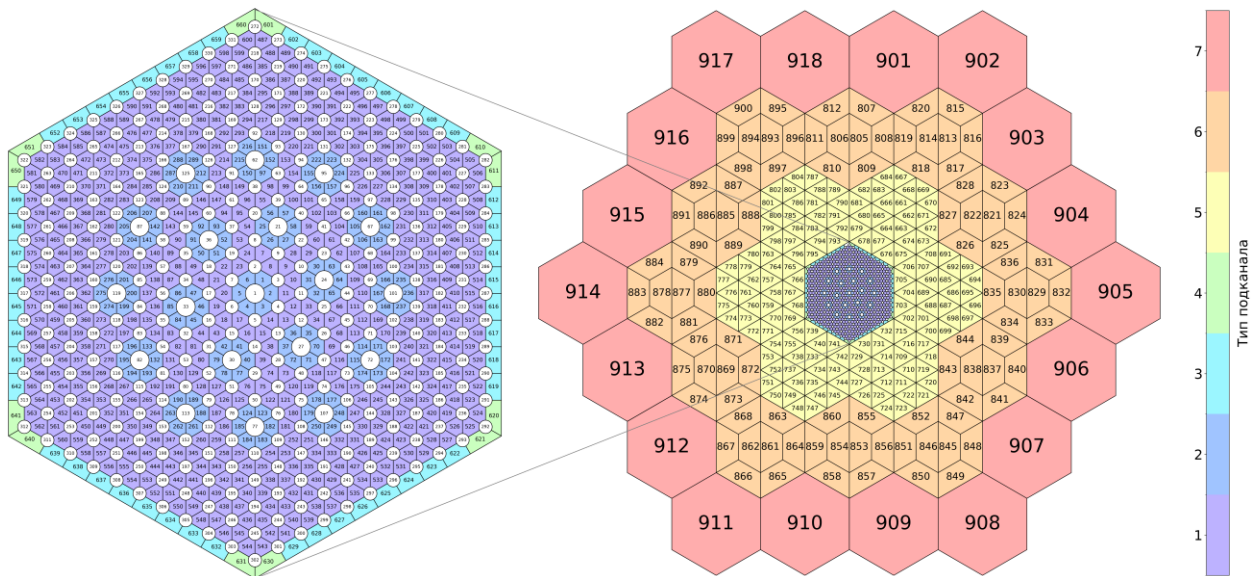


Рисунок 1 – Разбиение фрагмента активной зоны с использованием «мелкого» разбиения для «горячей» ТВС и последующим увеличением характерного размера каналов по мере отдаления от нее

Третий подход заключается в моделировании полномасштабной активной зоны в «мелком» разбиении. Данный вариант позволяет получить детализированное радиальное и аксиальное распределения параметров теплоносителя и твэлов в пределах АЗ. Данные параметры могут использоваться не только для вычисления величины DNBR, но и для передачи в различные нейтронно-физические коды. При связке такой модели с диффузионными кодами возможно повысить качество создаваемых топливных кампаний, а также избавиться от составляющей инженерного коэффициента по тепловому потоку, связанной с неравномерностью распределения параметров теплоносителя по поперечному сечению ТВС. При реализации связки с нейтронно-физическим кодом, основанным на методе Монте-Карло возможно получить прецизионный программный комплекс для создания бенчмарков для верификации инженерных программных кодов. Подобному мультифизическому моделированию с использованием в качестве теплогидравлического модуля субканального кода посвящены следующие работы [14-18]. Более того, данный вариант, по сравнению с двумя предыдущими, обладает следующими преимуществами:

- возможность моделирования при минимальном количестве допущений (к примеру, отсутствует необходимость в предположении о корректности использования различных замыкающих соотношений для укрупненных каналов);
- возможность моделирования смешанных активных зон, в которых существует гидравлическая неравноценность различных ТВС;
- возможность учета неравномерности расхода и температуры теплоносителя между ТВС на входе в активную зону.

Описание программы SC-Core

Для возможности проведения теплогидравлических расчетов полномасштабных активных зон в субканальном приближении, сотрудники отдела теплофизических исследований НИЦ «Курчатовский институт» разработали субканальный теплогидравлический код SC-Core, математическое описание которого приводится в настоящей работе.

В программе заложена одножидкостная модель течения двухфазного теплоносителя, которая получается исходя из комбинирования уравнений сохранения, записанных для

жидкой и паровой фаз в отдельности, и последующего ввода характеристик гомогенизированной смеси.

Для дискретизации в пространстве используется метод конечных объемов [19]. В данном методе расчетную область разбивают на некоторое число элементарных объемов, содержащих узловые точки. По выделенным элементарным объемам затем проводят интегрирование соответствующих дифференциальных уравнений. Для вычисления интегралов необходимо предположение о характере изменения искомых физических величин между узловыми точками. Полученный в результате интегрирования дискретный аналог выражает закон сохранения некоторой физической величины (массы, энергии или количества движения) для конечного элементарного объема точно так же, как дифференциальное уравнение выражает закон сохранения для бесконечно малого элементарного объема, что является одним из важнейших свойств данного подхода.

В поперечном направлении расчетная область разбивается на подканалы, для идентификации которых в дальнейшем используется индекс $i = 1, \dots, N_{sc}$. В аксиальном направлении расчетная область разбивается на непересекающиеся участки произвольной высоты таким образом, чтобы центры первого и последнего участков имели соответственно координаты 0 и H , где H – высота расчетной области. Для идентификации аксиальных участков в дальнейшем используется индекс $j = 1, \dots, N_z$. Пересечения подканалов и аксиальных участков создают множество элементарных объемов $\{V_{i,j}\}$, центры которых являются узлами основной расчетной сетки.

В практике конечно-разностной аппроксимации уравнений теплогидравлики используется, как правило, так называемая гибридная расчетная сетка с «шахматным» расположением узлов. В соответствии с данным подходом, помимо множества элементарных объемов $\{V_{i,j}\}$, в центрах которых определяются все скалярные теплогидравлические величины (энтальпия, плотность, давление и т.д.), выделяются множества вспомогательных объемов, смещенных относительно основных. В случае использования данного подхода в субканальном приближении образуется два дополнительных множества $\{V_{i,j+1/2}\}$ и $\{V_{i,j,k}\}$. Относительное расположение введенных множеств элементарных расчетных объемов представлено на рисунке 2. На данном рисунке центры объемов $\{V_{i,j}\}$ обозначены черными точками, а вспомогательные объемы заштрихованы серым цветом. В левой части рисунка показано смещение в аксиальном направлении объемов $\{V_{i,j+1/2}\}$, в правой части – смещение в поперечном направлении объемов $\{V_{i,j,k}\}$.

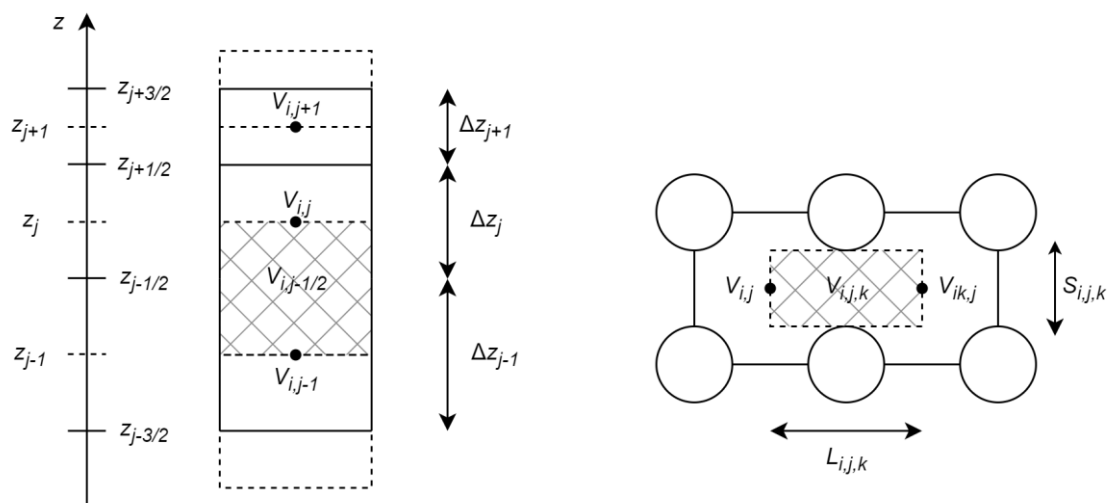


Рисунок 2 – Взаимное расположение элементарных расчетных объемов в пространстве

Интегрирование дифференциальных уравнений по соответствующим элементарным объемам позволяет получить следующую систему нелинейных уравнений.

Уравнение сохранения массы:

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

Уравнение сохранения энергии:

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

Уравнение сохранения проекции вектора импульса на аксиальное направление:

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

Уравнение сохранения проекции вектора импульса на поперечное направление:

$$\begin{aligned} & \left[L \cdot w \cdot \frac{m \cdot v}{A} \right]_{i,j+1/2,k} - \left[L \cdot w \cdot \frac{m \cdot v}{A} \right]_{i,j-1/2,k} = \\ & = \Delta z_j \cdot S_{i,j,k}^g \cdot (p_{i,j} - p_{ik,j}) - \Delta z_j \cdot \xi_{i,j,k}^{sw} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{|w| \cdot w \cdot v}{S^g} \right]_{i,j,k} \end{aligned} \quad (4)$$

В системе уравнений (1) – (4) основными неизвестными являются следующие величины: $h_{i,j}$, $p_{i,j}$, $m_{i,j+1/2}$ и $w_{i,j,k}$. В качестве граничных условий выступают значения массового расхода и энтальпии теплоносителя на входе в каждый подканал ($m_{i,1}$ и $h_{i,1}$) и значение давления теплоносителя на выходе из расчетной области p_{out} . Для переменных, расположенных в иных узлах расчетной сетки используются соответствующие схемы интерполяции (схема против потока, центральная разность, или же схемы более высоких порядков точности). Параметры A , d_{hy} , Δz , L , S^g полагаются известными геометрическими характеристиками расчетной области и задаются пользователем программы в качестве входных данных. Для вычисления λ , λ_f , ρ , T , v , w^T , ξ^{loc} , ξ^{sw} используются соответствующие замыкающие соотношения. Так как обоснование использования конкретных корреляционных соотношений для расчета вышеперечисленных величин не является целью настоящей работы, в таблице 1 приводится их перечисление со ссылками на соответствующие литературные источники.

Таблица 1

Замыкающие соотношения для программы SC-Core

Замыкающее соотношение	Название корреляции и литературный источник
Теплофизические свойства недогретой до температуры насыщения воды	Бикубические сплайны (по давлению и энтальпии) на основании [20]
Теплофизические свойства воды и водяного пара на линии насыщения	Кубические сплайны (по давлению) на основании [20]
Истинное массовое паросодержание (учет наличия поверхностного кипения)	Корреляция Осмачкина В.С. [21]

Истинное объемное паросодержание (учет наличия проскальзывания паровой фазы относительно жидкой)	Корреляция Осмачкина В.С. [21]
Коэффициент гидравлического сопротивления трения	Для однофазной области: Корреляция Альтшуля А.Д. [22] для шероховатых труб с поправкой Кобзаря Л.Л. [23] на геометрические характеристики подканала Для двухфазной области: Поправка Осмачкина В.С. [21]
Коэффициент местных гидравлических сопротивлений	Методика Кобзаря Л.Л. [24]
Поперечный турбулентный переток	Для однофазной области: Корреляция Rowe D.S. [25] Для двухфазной области: Методика Veus S.G. [26]

В программе SC-Core реализован метод Ньютона, позволяющий находить решение системы вида (5) при условии, что компоненты векторной функции могут быть как линейными, так и нелинейными скалярными функциями.

$$\vec{F}(\vec{X}) = 0 \quad (5)$$

Данный метод основан на разложении нелинейных функций, образующих систему (5), в ряд Тейлора. После отбрасывания членов высокого порядка малости, образуется система линейных алгебраических уравнений:

$$\vec{F}(\vec{X}_n) = -\mathbf{J}(\vec{X}_n) \cdot \delta \vec{X}_n \quad (6)$$

где $\mathbf{J}(\vec{X}_n)$ – матрица Якоби.

Таким образом, итерационный процесс решения системы уравнений методом Ньютона состоит в определении приращений $\delta \vec{X}_n$ к значениям неизвестных на каждой итерации путем решения системы линейных алгебраических уравнений (5).

Применительно к рассматриваемой задаче множество компонент векторной функции можно получить путем переноса правых частей уравнений (1-4) в их левые части и можно представить в следующем виде:

$$\{F\} = \left\{ F_{i,j}^{mass} \right\}_{j=1,N_z}^{i=1,N_{sc}} \cup \left\{ F_{i,j}^{energy} \right\}_{j=1,N_z}^{i=1,N_{sc}} \cup \left\{ F_{i,j+1/2}^{axial} \right\}_{j=1,N_z}^{i=1,N_{sc}} \cup \left\{ F_{n,j}^{cross} \right\}_{j=1,N_z}^{n=1,N_{hc}} \quad (7)$$

где N_{hc} – суммарное количество гидравлических связей подканалов друг с другом.

Матрицу Якоби для рассматриваемой системы удобно представить в блочном виде, в котором каждый из блоков является матрицей, отвечающей за дифференцирование соответствующих компонент векторной функции (верхний индекс) по соответствующей переменной (нижней индекс):

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_m^{mass} & 0 & 0 & \mathbf{J}_w^{mass} \\ \mathbf{J}_m^{energy} & \mathbf{J}_h^{energy} & 0 & \mathbf{J}_w^{energy} \\ \mathbf{J}_m^{axial} & 0 & \mathbf{J}_p^{axial} & \mathbf{J}_w^{axial} \\ \mathbf{J}_m^{cross} & 0 & \mathbf{J}_p^{cross} & \mathbf{J}_w^{cross} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Численная реализация описанного алгоритма осуществлена в программе SC-Core с использованием библиотеки для параллельного решения линейных и нелинейных систем уравнений PETSc [27].

Описание алгоритма параллельного расчета активной зоны

Для повышения устойчивости и скорости сходимости программы SC-Core при моделировании полномасштабных активных зон сотрудниками отдела теплофизических исследований разработан алгоритм, позволяющий эффективно решать подобного рода задачи с применением многопроцессорных вычислительных кластеров.

Основная идея разработанного алгоритма заключается в проведении предварительного расчета активной зоны с использованием крупносетчатого разбиения, в результате которого будут получены поперечные конвективные перетоки через границы тепловыделяющих сборок. Использование данных перетоков в качестве граничных условий позволит разделить задачу расчета полномасштабной зоны на N_{FA} задач расчета тепловыделяющих сборок, где N_{FA} – полное количество ТВС в АЗ. Так как каждая задача из данного множества является независимой от всех остальных, в этом случае возможна легкая и эффективная реализация параллельных вычислений. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.

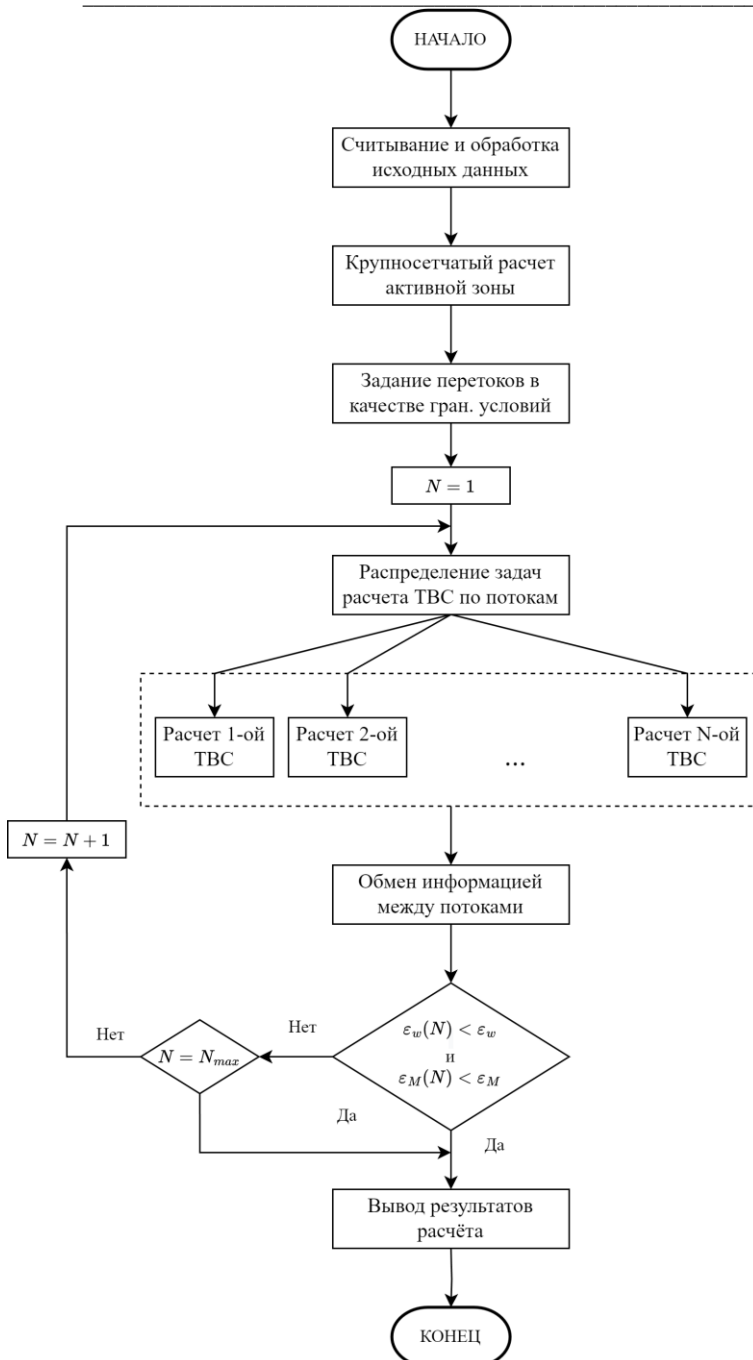


Рисунок 3 Блок-схема разработанного алгоритма для параллельного расчета полномасштабных активных зон ядерных реакторов (параллельный участок выделен пунктиром)

В качестве основных исходных данных выступают названия кассет (ТВС-2М, ТВСА, РКЗ+ и т.д.), из которых набирается активная зона, а также схема их расположения в ее пределах. Препроцессор к программе SC-Core создает на основании заданной информации детальные геометрические характеристики кассет и их гидравлических связей друг с другом. Здесь стоит акцентировать внимание на способе осуществления сквозной нумерации гидравлических связей подканалов друг с другом. К примеру, в программе SC-INT нумерация идет в порядке возрастания номера подканала и для каждого подканала – в порядке возрастания номеров его соседей. Однако в программе SC-Core для эффективного распределения памяти между различными потоками сначала нумеруются все связи в пределах ТВС и лишь затем нумеруются гидравлические связи подканалов, принадлежащих разным ТВС. Кроме детализированного разбиения тепловыделяющих сборок препроцессор генерирует крупносетчатое разбиение на основании одного из вышеуказанных способов. Кроме расчета геометрических характеристик каналов для крупносетчатого разбиения препроцессор также осуществляет создание тепловых структур, обладающих усредненными по соответствующим областям характеристиками.

В конце каждой итерации представленного на рисунке 3 цикла осуществляется взаимобмен между потоками информацией о характеристиках теплоносителя в периферийных подканалах. Данная информация необходима для расчета величин, переносимых как конвективными, так и турбулентными перетоками через границы ТВС. В качестве условий выхода из цикла используется либо факт достижения максимально допустимого количества итераций, либо факт достижения сходимости по величине аксиального расхода в контрольных объемах и по величине конвективных перетоков между ними.

Стоит отметить, что данный алгоритм, представленный в обобщенном виде, не накладывает никаких ограничения на способ расчета программой единичной тепловыделяющей сборки.

Результаты тестового расчета

Для тестирования и оценки эффективности разработанного алгоритма было осуществлено моделирование активной зоны реактора ВВЭР-1000, набранной из кассет ТВС-2М. В данном случае мелкосетчатое разбиение полномасштабной активной зоны содержит в себе 107580 подканалов. Моделирование проведено с реальными профилями энерговыделения, полученными исходя из нейтронно-физического расчета топливной кампании, при номинальных режимных параметрах. Стоит отметить, что пространство между выгородкой и периферийным рядом ТВС не моделировалось: соответствующая доля расхода учитывалась в протечках теплоносителя мимо обогреваемой части АЗ.

Для крупносетчатого моделирования использовалось разбиение на 24 треугольника (внутренний ряд кассет на рисунке 1), при котором общее количество каналов в активной зоне составляет 3912. Данное разбиение, в отличие от других (также представленных на рисунке 1), разбивает грани ТВС на две части и позволяет таким образом учитывать профиль поперечных конвективных перетоков вдоль границы между ТВС.

Расчеты проведены с использованием одного, двух и четырех потоков. Во всех расчетах получены идентичные распределения локальных параметров теплоносителя в пределах АЗ, что подтверждает корректность программной реализации блока алгоритма, ответственного за проведение параллельных вычислений. При использовании процессоров Intel Core i5-10600KF CPU временные затраты приблизительно составили:

- для одного потока: 90 минут;
- для двух потоков: 50 минут;
- для четырех потоков: 30 минут.

Непропорциональная зависимость между количеством потоков и затраченным на моделирование временем связана с наличием в программе блоков считывания входной информации, расчета АЗ в крупносетчатом приближении, записи выходной информации.

В результате проведения тестового расчета показано, что разработанный алгоритм позволяет осуществлять теплогидравлический расчет стационарных состояний полномасштабных активных зон на персональных компьютерах за приемлемое время.

Обозначения

A – площадь торцевой грани расчетной ячейки, м^2 ; d_{hy} – гидравлический диаметр, м ; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; h – удельная энтальпия, $\text{Дж}/\text{кг}$; L – межцентровое расстояние, м ; m – расход в аксиальном направлении, $\text{кг}/\text{с}$; подканала; N_k – количество гидравлических связей подканала; N_r – количество тепловых связей подканала; p – давление, Па ; q^l – линейная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; S^g – ширина зазора между подканалами, м ; T – температура, К ; v – удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$; w – поперечный конвективный поток на единицу длины, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$; w^T – поперечный турбулентный поток на единицу длины, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$; Δz – высота контрольного объема, м ; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; λ_f – коэффициент трения, отн. ед.; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; ζ^{loc} – коэффициент гидравлических потерь на местных сопротивлениях, отн. ед.; ζ^w – коэффициент гидравлического сопротивления поперечному перетоку, отн. ед.

Литература

1. Семенович О.В. Анализ субканальных моделей термогидродинамического расчёта стержневых ТВС: классификация и тенденции развития // Препринт ОИЭЯИ-Сосны-40 НАН Беларуси. – Минск, 2009. – 36 с.
2. Moorthi A., Sharma A. K., Velusamy K. A review of sub-channel thermal hydraulic codes for nuclear reactor core and future directions // Nuclear Engineering and Design. – 2018. – Т. 332. – С. 329-344.
3. Yang B. W. et al. Subchannel analysis–Current practice and development for the future // Nuclear Engineering and Design. – 2021. – Т. 385. – С. 111477.
4. Олексюк Д.А. Разработка и экспериментальное обоснование программы для поячеикового теплогидравлического расчета активных зон реакторов типа ВВЭР, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.03. – Москва, 2002. – 194 с.
5. Kireeva D. R., Oleksyuk D. A. Validation of the SC-INT code using experimental data on coolant mixing in a 37-rod fuel assembly with heat exchange intensifying spacer grids // International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering M&C. – Jeju, Korea, 2017.
6. Гуцин Е. В., Колмаков А. П. Программа поканального теплогидравлического расчета ВЯЗ-М и некоторые результаты расчетов // Теплофизика-2001. Отраслевая конференция «Теплогидравлические коды для энергетических реакторов (разработка и верификация)». – Обнинск, 2001. – С. 29-31.
7. Степанов О. Е и др. Кроссверификация модели поячеистого расчета ТВС кода ТИГРСП с применением CFD кода на примере 7-стержневой сборки // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2016. – №. 2. – С. 54-66.
8. Самойлов О. Б. и др. Экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик на моделях ТВСА ВВЭР-1000 // Четвертая Международная научно-технической конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск, 2005. – С. 23-27.
9. Вертиков Е. А., Олексюк Д. А. Разработка и валидация субканального теплогидравлического кода SC-INT для расчета активных зон реакторов типа ВВЭР // XXII научная школа молодых ученых ИБРАЭ РАН. – Москва, 2023. – С. 18.
10. Lloyd M. W., Feltus M. A. Statistical core design methodology using the VIPRE thermal-hydraulics code // Annals of Nuclear Energy. – 1995. – Т. 22. – №. 8. – С. 523-531.

11. Закиров С. Ю. Расчет теплогидравлических параметров активной зоны, составленной из бесчехловых ТВС // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107. – №. 6. – С. 312-316.
12. Bolobov P.A., Oleksyuk D.A. The development of the code package PERMAK-3D/SC-1 // 21st Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety. – Dresden, Germany, 2011.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660375 Российская Федерация. Инженерный код SC-REACTOR : № 2020619126 : заявл. 14.08.2020 : опубл. 02.09.2020 / Д. А. Олексюк, Л. Л. Кобзарь, В. А. Хамаза и др.
14. Atkinson S. et al. A Comparison of Advanced Boiling Water Reactor Simulations between Serpent/CTF and Polaris/DYN3D: Steady State Operational Characteristics and Burnup Evolution // Energies. – 2021. – Т. 14. – №. 4. – С. 838.
15. Magedanz J. et al. High-fidelity multi-physics system TORT-TD/CTF/FRAPTRAN for light water reactor analysis // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – Т. 84. – С. 234-243.
16. Basualdo J. R. et al. Integration of the subchannel thermal-hydraulic code SubChanFlow into the reactor dynamics code PARCS: Development and testing based on a computational benchmark // Progress in Nuclear Energy. – 2020. – Т. 119. – С. 103138.
17. Faghihi F. et al. Neutronics and sub-channel thermal-hydraulics analysis of the Iranian VVER-1000 fuel bundle // Progress in Nuclear Energy. – 2016. – Т. 87. – С. 39-46.
18. García M. et al. Validation of Serpent-SUBCHANFLOW-TRANSURANUS pin-by-pin burnup calculations using experimental data from the Temelín II VVER-1000 reactor // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – Т. 53. – №. 10. – С. 3133-3150.
19. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
20. Linstrom P. J., Mallard W. G. The NIST Chemistry WebBook: A chemical data resource on the internet // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2001. – Т. 46. – № 5. – С. 1059-1063.
21. Осмачкин ВС Б. В. Д. Гидравлическое сопротивление пучков тепловыделяющих стержней в потоке кипящей воды // Препринт ИАЭ-1957. – Москва, 1970. – 24 с.
22. Альтшуль А.Д. и др. Гидравлические потери в водоводах электростанций. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 104 с.
23. Ибрагимов М.Х. и др. Расчет коэффициентов гидравлического сопротивления при турбулентном течении жидкости в каналах некруглого поперечного сечения // Атомная Энергия. – 1967. – Т. 23. – № 4. – С. 300-305.
24. Иванов В.К., Кобзарь Л.Л. Расчет гидравлического сопротивления пучков стержней с решетками-интенсификаторами теплообмена // Атомная энергия. – 1980. – Т. 49. – № 3. – С. 163-165.
25. Борисов В.Д. Поперечное перемешивание теплоносителя в пучках стержней. – Препринт ИАЭ-3269/5. – Москва, 1980. – 28 с.
26. Weisman J., Bowring R. W. Methods for detailed thermal and hydraulic analysis of water-cooled reactors // Nuclear Science and Engineering. – 1975. – Т. 57. – №. 4. – С. 255-276.
27. Balay S. et al. PETSc/TAO Users Manual Revision 3.19. – Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), 2023. – №. ANL-21/39.