

## Модернизация субканальной теплогидравлической программы SC-INT

Е.А. Вертиков<sup>1</sup>, К.В. Запоржин<sup>1</sup>, Д.А. Олексюк<sup>1</sup>, В.А. Хамаза<sup>1</sup>, А.М. Худыкин<sup>1</sup>,  
М.А. Глазов<sup>2</sup>, О.Н. Морозкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт»,  
123182 Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

<sup>2</sup> АО «ТВЭЛ»,  
115409 Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 49

**Реферат.** Представлены основные результаты цикла работ по модернизации исходного кода программы для ЭВМ SC-INT, предназначенной для проведения субканальных (поячечковых) теплогидравлических расчетов активных зон водоохлаждаемых ядерных реакторов. Кратко приводится математический аппарат программы, включая способ выделения элементарных объемов в пространстве, дискретный аналог основных законов сохранения, образующих систему нелинейных уравнений, а также способ ее решения. Детально описывается пройденный путь по внутренней модернизации программы – отказ от устаревших конструкций языка программирования Fortran, переход к структурно-ориентированному подходу написания исходного кода, разработка модульной архитектуры, а также реализация альтернативного численного алгоритма решения основной системы нелинейных уравнений с использованием библиотеки PETSc. В качестве примера возможностей программы SC-INT, появившихся после вышеописанных модернизаций, приводятся результаты теплогидравлического расчета в мелкосетчатом приближении полномасштабной активной зоны реактора ВВЭР-1000, набранной из тепловыделяющих сборок различного конструктивного исполнения – с установленными решетками-интенсификаторами типа «Вихрь» и «Прогонка» и без них. Демонстрируется, что достигнутые в ходе моделирования полномасштабной активной зоны невязки по основным параметрам теплоносителя совпадают по порядку с соответствующими величинами, характерными для расчетов малостержневых экспериментальных моделей ТВС. Проведение теплогидравлических расчетов полномасштабных активных зон в субканальном приближении открывает возможность для разработки связанных программных комплексов, предназначенных для улучшенной оценки хода протекания мультифизических процессов в активных зонах водоохлаждаемых ядерных реакторов.

**Ключевые слова:** программная архитектура, субканальный метод, метод контрольных объемов, теплогидравлический расчет, активная зона, ВВЭР.

**Для цитирования:** Вертиков Е.А., Запоржин К.В., Олексюк Д.А., Хамаза В.А., Худыкин А.М., Глазов М.А., Морозкин О.Н. Модернизация субканальной теплогидравлической программы SC-INT. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;4:29–43. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.03>

## Введение

На протяжении всей истории развития атомной энергетики осуществлялось непрерывное совершенствование программных средств, используемых для моделирования мультифизических процессов, происходящих в реакторных установках. Несмотря на низкую популярность языка программирования (ЯП) Fortran в сфере разработки коммерческого программного обеспечения (ПО), данный язык программирования является основным инструментом для разработки новых и поддержки уже существующих приложений для высокопроизводительных вычислений в академической среде, а также в различных промышленных сферах. Стоит отметить, что проводимую с течением времени модернизацию рассматриваемого класса ПО в большинстве случаев можно отнести к категории внешних изменений, расширяющих предоставляемый функционал (к примеру, путем добавления новых физических моделей), нежели к категории внутренних изменений, затрагивающих исключительно архитектуру исходного кода. В результате архитектура ПО может не соответствовать современным практикам программирования, принятым в коммерческой разработке.

В рамках настоящей статьи представлены результаты цикла работ, выполненных специалистами отдела теплофизических исследований НИЦ «Курчатовский институт» с 2020 г. по модернизации исходного кода программы SC-INT на ЯП Fortran. Расчетная программа SC-INT (правообладатель АО «ТВЭЛ») предназначена для выполнения стационарных субканальных (поячейковых) теплогидравлических расчетов активных зон (АЗ) водоохлаждаемых ядерных реакторов. Программа SC-INT является развитием программы SC-1 [1]: основное направление модернизации заключалось в расширении физической области применимости программы путем добавления моделей, учитывающих влияние установленных решеток-интенсификаторов тепломассообмена на параметры теплоносителя [2]. В 2023 г. была успешно завершена процедура аттестации программы SC-INT в Ростехнадзоре с получением аттестационного паспорта программы для ЭВМ [3].

Однако настоящая статья концентрируется не на обосновании области применимости программы SC-INT, а на значительных изменениях внутренней структуры исходного кода, повлекших за собой ускорение рассматриваемого ПО, а также удобство его использования в качестве научно-исследовательского инструмента специалистами, не являющимися основными разработчиками программы. Первая часть статьи посвящена математическому описанию программы, далее излагается хронология модернизации ее исходного кода и в завершение приводятся результаты расчета демонстрационной задачи, в качестве которой служит полномасштабная активная зона реактора ВВЭР-1000 со смешанной загрузкой.

Результаты цикла работ, представленные в настоящей статье, получены в рамках выполнения договора с АО «ТВЭЛ».

## Общее описание программы SC-INT

Программа SC-INT основана на одножидкостном приближении, в соответствии с которым рассматриваются законы сохранения не для каждой из фаз по отдельности (жидкой, газообразной и др.), а для некоторого гомогенизированного флюида, характеристики которого зависят от массовых и объемных долей каждой из фаз. Уравнения для моделирования поведения двухфазного теплоносителя в одножидкостном приближении получаются исходя из комбинирования уравнений сохранения, записанных в отдельности для каждой из фаз [4], которые, в частности, представлены в приближении равенства давлений фаз в работе [5]. При комбинировании и дальнейшей дискретизации дифференциальных уравнений, записанных в двухжидкостной постановке, естественным путем получаются величины, характеризующие течение и параметры рассматриваемого гомогенизированного флюида.

Математическая модель программы SC-INT обладает следующими допущениями.

1. Рассматриваются исключительно стационарные течения.

2. Вызванный турбулентными пульсациями обмен энергией и импульсом между соседними элементарными объемами рассчитывается стандартным для субканальных программ подходом, описанным, в частности, в обзорной работе [6]. В соответствии с данным подходом вводится коэффициент турбулентной диффузии как отношение средней амплитуды флуктуаций массовой скорости в поперечном направлении к средней массовой скорости в аксиальном направлении. Для вычисления данного коэффициента используются эмпирические корреляции в зависимости от геометрических характеристик пучков стержней.

3. Турбулентные напряжения сдвига не рассчитываются напрямую.

4. Вязкое трение на границах жидкость-жидкость не рассчитывается напрямую.

Для дискретизации исходной системы дифференциальных уравнений используется метод контрольных объемов – в поперечном направлении расчетная область разбивается на подканалы, в аксиальном – на слои. Пересечения подканалов и аксиальных слоев создают множество элементарных объемов. На рисунке 1 представлено трехмерное изображение двух соседних элементарных объемов, располо-

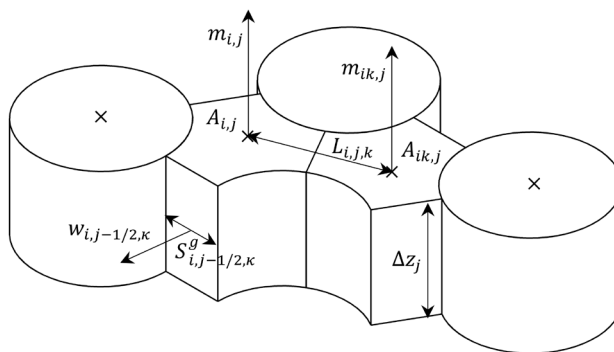


Рис. 1. Два соседних регулярных элементарных объема:  $A$  – площадь проходного сечения,  $m^2$ ;  $\Delta z$  – высота аксиального слоя,  $m$ ;  $L$  – межцентровое расстояние,  $m$ ;  $m$  – массовый расход в аксиальном направлении,  $кг/с$ ;  $S^g$  – межстержневой зазор,  $m$ ;  $w$  – поперечный конвективный переток на единицу длины,  $кг/(м \cdot с)$

женных в  $j$ -ом аксиальном слое и имеющих индексы подканалов  $i$  и  $ik$  (индексом  $ik$  обозначается подканал, который является соседним для  $i$ -го подканала через его  $k$ -ую гидравлическую связь).

В результате интегрирования дифференциальных уравнений по введенным элементарным объемам получается следующая система нелинейных уравнений:

дискретный аналог уравнения баланса массы

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

дискретный аналог уравнения баланса энергии

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

где  $h$  – удельная энтальпия, Дж/кг;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $q^l$  – линейный тепловой поток, Вт/м;  $\tilde{R}$  – усредненный коэффициент теплопередачи через необогреваемую стенку, находящуюся между двумя объемами, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T$  – температура, К;  $w^T$  – турбулентный поперечный переток на единицу длины, кг/(м·с).

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.

Дискретный аналог уравнения движения в аксиальном направлении:

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

где  $d_{hy}$  – гидравлический диаметр, м;  $\lambda_f$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения, отн. ед.;  $K^T$  – эмпирический коэффициент, ответственный за подобие турбулентного обмена импульсом и энергией, отн.ед. (в статье принимается равным

1,0);  $p$  – давление, Па;  $v$  – удельный объем,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $\xi^{loc}$  – местный коэффициент гидравлического сопротивления, отн.ед.

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

Дискретный аналог уравнения движения в поперечном направлении, полученный в результате интегрирования по элементарным объемам поперечных гидравлических связей:

$$\left[ L \cdot w \cdot \frac{m \cdot v}{A} \right]_{i,j,k} - \left[ L \cdot w \cdot \frac{m \cdot v}{A} \right]_{i,j-1,k} =$$

$$= -V_{i,j,k} \cdot \frac{p_{ik,j-1/2} - p_{i,j-1/2}}{L_{i,j-1/2,k}} - V_{i,j,k} \cdot \frac{\xi_{i,j-1/2,k}^w}{L_{i,j-1/2,k}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{w \cdot |w| \cdot v}{(S^g)^2} \right]_{i,j-1/2,k}, \quad (4)$$

где  $\xi^w$  – коэффициент гидравлического сопротивления поперечному перетоку, отн.ед.

## Алгоритм численного решения программы SC-INT

Полученная система уравнений (1)–(4) является нелинейной относительно вектора неизвестных, состоящего из значений расхода в аксиальном направлении, энтальпии, давления, а также поперечных конвективных перетоков. Стоит отметить, что в вышеприведенной системе уравнений содержатся значения основных переменных в промежуточных узлах по отношению к основной расчетной сетке. Для их нахождения в программе SC-INT используются соответствующие схемы интерполяции.

Необходимые геометрические характеристики  $A$ ,  $S^g$ ,  $d_{hyr}$ ,  $L$ ,  $\Delta z$  задаются пользователем программы во входном файле.

Для замыкания вышеописанной системы уравнений необходимы выражения для определения теплофизических свойств теплоносителя (уравнения состояния), коэффициентов трения, коэффициентов гидравлических потерь на местных сопротивлениях, коэффициентов гидравлического сопротивления поперечным перетокам, турбулентных поперечных перетоков, коэффициентов теплоотдачи и др. Сравнение наборов эмпирических корреляций, используемых в различных субканальных программах, в том числе и в SC-INT, для вычисления вышеперечисленных замыкающих соотношений представлено в статье [7].

Представленная система нелинейных уравнений в программе SC-INT решается итерационно. На каждой итерации последовательно находятся неизвестные величины для каждого аксиального слоя.

При переходе на очередной аксиальный слой первоначально рассчитываются по соответствующим корреляциям турбулентные поперечные перетоки на единицу длины. Далее осуществляется решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для нахождения распределения энтальпий теплоносителя в пределах данного аксиального слоя. После чего для каждого элементарного объема в пределах данного

аксиального слоя обновляются теплофизические свойства теплоносителя, а также осуществляется расчет иных замыкающих соотношений. Следующим этапом является решение СЛАУ для нахождения поперечных конвективных перетоков на единицу длины. Данная СЛАУ получается путем комбинирования уравнения неразрывности (1) и уравнений движения (3)–(4). Далее с помощью полученных значений перетоков корректируются значения аксиальных расходов теплоносителя. Завершающим этапом является корректировка с использованием найденных значений перетоков перепадов давления в поперечном направлении на предыдущем аксиальном слое.

Для сходимости внешнего итерационного цикла должны быть выполнены условия по невязкам энтальпии, расхода в аксиальном направлении и поперечному конвективному перетоку на единицу длины. В последующих версиях программы SC-INT предполагается добавление возможности отслеживания изменения в процессе итераций значений заданных пользователем величин – теплотехнических запасов, локальных параметров теплоносителя в конкретной пространственной точке расчетной модели и др.

В качестве вариантов решения СЛАУ присутствует либо итерационный алгоритм Гаусса – Зейделя, исторически реализованный в программах SC-1 и SC-INT, либо алгоритм с использованием библиотеки PETSc [8], который по сравнению с исходным обладает следующими преимуществами:

- позволяет осуществлять расчет с неравномерным аксиальным разбиением;
- позволяет осуществлять расчет с повышенным до шести максимально допустимым количеством гидравлических связей у подканала;
- показывает лучшую скорость сходимости и устойчивость при проведении расчетов крупных фрагментов активных зон (кластер из семи смежных кассет, 60-градусный сектор симметрии) с использованием мелкосетчатого разбиения.

## Разработка модульной архитектуры программы SC-INT

В предыдущих разделах было дано краткое математическое описание программы SC-INT и используемого численного алгоритма для решения основной системы нелинейных уравнений. Выполненный авторами статьи цикл работ преследовал следующие цели:

- повышение быстродействия при проведении как многовариантных валидационных расчетов, так и расчетов крупномасштабных фрагментов АЗ ядерных реакторов;
- повышение скорости и удобства дальнейшей модификации программы при выполнении научно-исследовательских работ (реализация новых корреляций для вычисления значений замыкающих соотношений или альтернативных численных алгоритмов).

На первом этапе данного цикла работ был осуществлен отказ от использования «common blocks» путем переноса соответствующих переменных в единый модуль. Однако стоит отметить, что данное изменение носило исключительно «косметический» характер, так как с точки зрения наличия в ПО глобального состояния ничего не поменялось – отдельные подпрограммы и функции все так же работали с единым набором глобальных переменных, изменение которых могло осуществляться где и когда угодно. Наличие глобального состояния с современной точки зрения является

примером плохой архитектуры ПО, так как не позволяет с точки зрения как транслятора ЯП, так и разработчика разделить программу на конечное число отдельных сущностей, способных изолированно выполнять конкретный заданный функционал. В первом случае (с точки зрения транслятора ЯП) это приводит к невозможности использования некоторых оптимизирующих свойств. Во втором случае (с точки зрения разработчика ПО) это приводит к уже упомянутым во введении сложностям с модернизацией и тестированием программы.

Второй этап модификации исходного кода предполагал более значительные изменения по сравнению с вышеописанными, а именно, переход к структурно-ориентированному подходу и модульной архитектуре программы SC-INT. По этой причине на предварительном этапе было выполнено следующее. Во-первых, была подключена система контроля версий Git, а версия программы SC-INT на текущем этапе была обозначена за «v1.0». Во-вторых, был разработан тестовый набор, покрывающий значительную часть функционала программы SC-INT. В него вошли верификационные и валидационные тесты (подробнее о валидации субканальных программ написано в работах [7, 9]), а также научно-исследовательские и проектные задачи, выполненные в прошлом с использованием более старых версий программ SC-INT и SC-1.

Отказ от глобального состояния проходил в несколько стадий. Первоначально в приблизительном дереве вызовов программы искали так называемые «листья», т.е. программные единицы, из которых не происходит вызовов иных подпрограмм или функций. В случае программы SC-INT такими «листьями» являлись функции расчета замыкающих соотношений (истинных массового и объемного паросодержаний, теплофизических свойств воды и водяного пара, коэффициентов гидравлического сопротивления трения и др.) по конкретным эмпирическим корреляциям. Исходный код данных функций модернизировался, чтобы удовлетворять критериям так называемой чистоты (ключевое слово «pure» в ЯП Fortran). Чистые функции должны быть детерминированными, т.е. получать одинаковые результаты при получении одинаковых аргументов и не обладать побочными эффектами, к числу которых относятся модификация глобальных переменных, операции ввода и вывода и др. Параллельно осуществлялся отказ от языковых конструкций стандарта Fortran-77, признанных устаревшими в более новых стандартах (90/95 и 2003). Далее на основании разработанных функций проектировались структуры данных, предназначенные для удобного обмена информацией между различными программными единицами.

На следующих стадиях вышеописанная процедура применялась уже не к «листьям» дерева, а к «ветвям», на которых они располагаются, и так далее к «корню», которым является головная программа. На каждой стадии адаптировались структуры данных, по причине чего необходимо было корректировать код, разработанный ранее.

Второй этап был завершен выпуском версии «v1.3». Разработанная модульная структура позволила выполнять в параллельном режиме многовариантные расчеты, в частности, при проведении валидации параллельно рассчитывать различные экспериментальные состояния.

В качестве демонстрации достигнутого ускорения далее представлены времена расчета 167-ми экспериментальных состояний, в которых был зафиксирован кризис теплоотдачи на экспериментальной модели 37СТ-1.3-BASE [10], по двум версиям программы. В обеих версиях программы в качестве критерия сходимости внешнего итерационного цикла по поперечным конвективным перетокам было принято значение



0,1%. В однопоточном режиме для версии «v1.0» время составило ~260 секунд, а для «v1.3» ~125 секунд. Для версии «v1.3» в многопоточном режиме времена составили соответственно 70, 45 и 30 секунд для 2, 4 и 8 потоков. Расчеты выполнены на персональном компьютере с процессором «Intel Core i5-10600KF».

Как видно из представленных времен, наблюдаются отклонения от «идеального» сценария, при котором использование  $N$  потоков приводит к  $N$ -кратному ускорению работы программы. Данное отклонение связано с тем, что параллельной является исключительно область программы, в пределах которой происходит решение основной системы нелинейных уравнений, в то время как область чтения данных из входного файла программы, а также, что наиболее важно в рамках рассматриваемой задачи, область записи результатов расчета в выходной файл работают в однопоточном режиме. В рассматриваемом варианте суммарное количество времени, затрачиваемое программой на запись результатов расчета, составляет приблизительно 10 секунд. Учет данного времени приводит к приблизительно шестикратному ускорению при использовании восьми потоков по сравнению с изначальным четырехкратным.

В качестве третьего этапа модернизации программы SC-INT служила реализация модуля решения основной системы нелинейных уравнений с использованием библиотеки PETSc, предоставляющей широкий набор методов решения систем линейных алгебраических уравнений и предобусловливателей. Основной причиной необходимости разработки альтернативного численного алгоритма являлась его неудовлетворительная скорость сходимости в задачах с большой пространственной размерностью (60-градусные секторы симметрии и полномасштабные активные зоны реакторов типа ВВЭР большой мощности). К примеру, разбиение поперечного сечения полномасштабной активной зоны реактора ВВЭР-1000 состоит из 107580 подканалов, по которым течет теплоноситель, непосредственно участвующий в эффективном охлаждении тепловыделяющих элементов. При этом данное количество может быть увеличено путем добавления подканалов, моделирующих протечки теплоносителя между периферийным рядом ТВС и выгородкой реактора, а также протечки через направляющие и измерительные каналы. В аксиальном же направлении обычно выделяется от 60-ти до 100 слоев. Таким образом, суммарное количество элементарных объемов основной расчетной сетки в подобного рода задачах составляет порядка  $10^7$ . Версия программы SC-INT, в которой впервые был реализован численный алгоритм с использованием библиотеки PETSc, получила название «v2.0».

## **Демонстрационный расчет полномасштабной АЗ реактора ВВЭР-1000**

В качестве тестовой задачи, результаты расчета которой представлены для демонстрации возможностей программы SC-INT в плане моделирования течения теплоносителя в пределах крупномасштабных фрагментов АЗ, является активная зона реактора ВВЭР-1000 четвертого энергоблока Балаковской АЭС в начальный момент времени 18-ой топливной кампании. Данная кампания характерна тем, что в пределах активной зоны располагаются ТВС различного конструктивного исполнения.

Покассетная картограмма активной зоны представлена на рис. 2. На данном рисунке для каждой кассеты отмечены ее номер, относительный расход на входе



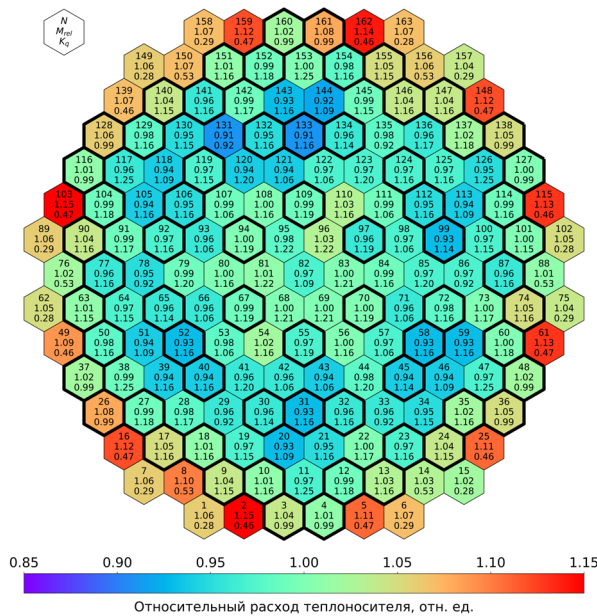


Рис. 2. Покассетная картограмма АЗ реактора ВВЭР-1000 четвертого энергоблока Балаковской АЭС в начальный момент времени 18-ой топливной кампании

в соответствии с CFD-расчетом (моделирование неравномерности распределения расхода теплоносителя на входе в АЗ осуществляется, в частности, в работе [11]), а также ее относительная мощность в соответствии с нейтронно-физическим расчетом по комплексу программ КАСКАД [12]. Также на данной картограмме жирными границами отмечены кассеты ТВС-2М с установленными решетками-интенсификаторами теплообмена типа «Вихрь» и «Прогонка» конструкции ОКБ «ГИДРОПРЕСС» [13]. Все кассеты данного типа являются свежими.

Рассматриваемая задача характеризуется присутствием в ней конвективных поперечных перетоков значительной величины по причине наличия входной неравномерности в распределении расхода и гидравлически неравноценных тепловыделяющих сборок.

Расчеты выполнены при номинальных режимных параметрах реактора. Использовались реалистичные потвзельные профили энерговыделения, полученные из комплекса программ КАСКАД. В аксиальном направлении расчетная модель разбивается на 60 участков, что совпадает со степенью детализации потвзельных аксиальных профилей энерговыделения.

Для демонстрации эффективности численного алгоритма, реализованного на третьем этапе модернизации программы, было выполнено два расчета – с использованием алгоритма, основанного на библиотеке PETSc, и с использованием алгоритма из программы SC-1.

На рисунке 3 для обоих расчетов изображены изменения в процессе внешнего итерационного цикла, завершившегося по достижении заданного максимально допустимого количества итераций 2500, значений трех основных невязок – по энтальпии,

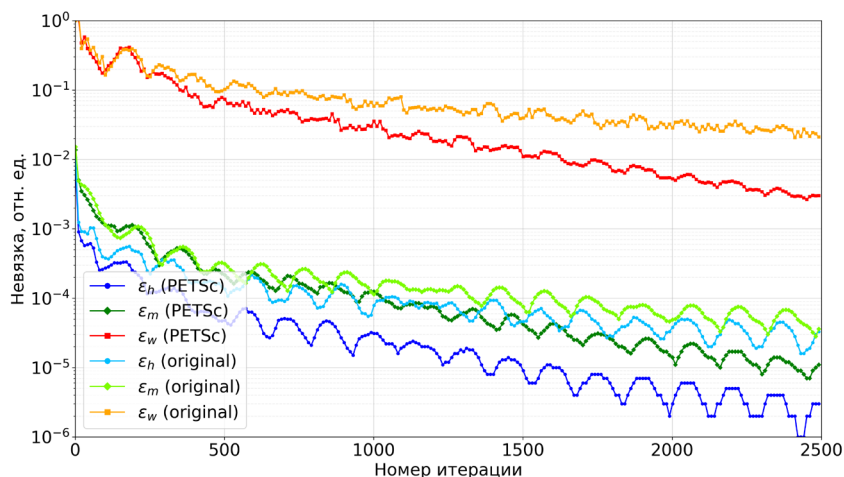


Рис. 3. Изменение значений невязок в процессе внешнего итерационного цикла

аксиальному расходу и поперечным конвективным перетокам. Как видно из данного рисунка, реализованный численный алгоритм демонстрирует значительно лучшую скорость сходимости – невязка по поперечным конвективным перетокам приблизилась вплотную к соответствующему значению, заданному при демонстрации эффективности параллельных расчетов на малостержневых моделях ТВС. Использовались следующие опции библиотеки PETSc: методом решения СЛАУ был «conjugate residuals method», предобусловливателем служил «successive over relaxation preconditioning». Расчет с применением PETSc проходил на уже описанном персональном компьютере в течение приблизительно 12-ти часов.

Стоит отметить, что набор подобного рода задач, например, моментов топливной кампании, также может решаться параллельно с использованием программы SC-INT. Однако в данном случае следует иметь в виду, что основным ограничением в задачах решения СЛАУ больших размерностей является не частота процессора, а пропускная способность взаимодействия с оперативной памятью. Таким образом, в случае недостаточности пропускной способности параллельный запуск нескольких расчетов крупномасштабных фрагментов может приводить к замедлению скорости расчета.

На рисунке 4 для семи ТВС, расположенных в горизонтальный ряд (см. рис. 2), представлены аксиальные зависимости усредненного по ним расхода теплоносителя. В нижней части АЗ наблюдается выравнивание входной неравномерности, а в верхней части АЗ – следствие наличия в некоторых кассетах решеток-интенсификаторов. Данное изображение демонстрирует сложность происходящих в АЗ теплогидравлических процессов, для корректного моделирования которых после осуществленной модернизации может использоваться программа SC-INT.

## Заключение

Описанная в работе программная модернизация субканального теплогидравлического кода SC-INT позволила одновременно как повысить удобство работы с исходным кодом, так и улучшить быстродействие программы в целом. В результате выполненного цикла работ осуществлен переход к структурно-ориентированному

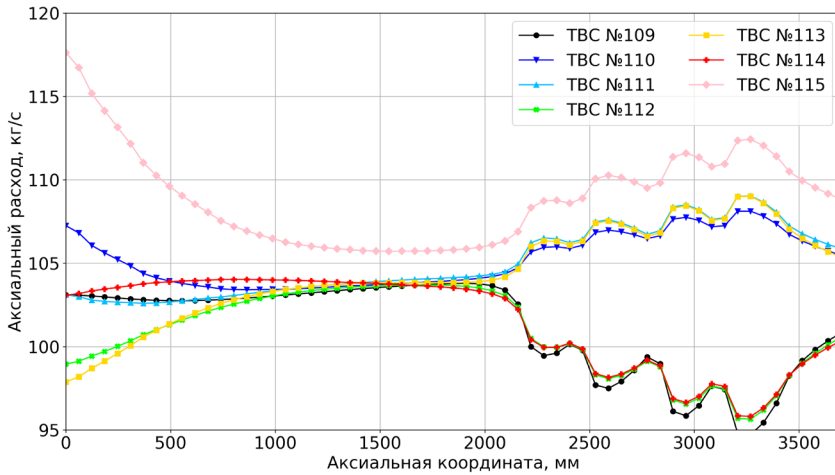


Рис. 4. Зависимость усредненного по ТВС расхода теплоносителя от аксиальной координаты

подходу, разработана и реализована модульная архитектура ПО, а также осуществлен отказ от устаревших языковых конструкций ЯП Fortran.

Достигнутое удобство работы с исходным кодом позволит ускорить дальнейшую модернизацию программы, например, реализацию возможности расчета динамических процессов или же реализацию двухжидкостной модели для более прецизионного моделирования течения двухфазных потоков. Более того, уже на данном этапе сотрудники, не являющиеся основными разработчиками программы, могут эффективно модернизировать отдельные участки исходного кода в рамках проведения научно-исследовательских работ, например, при реализации механистических моделей возникновения кризиса теплоотдачи [14].

Достигнутая с использованием численного алгоритма на основании библиотеки PETSc возможность осуществления теплогидравлических расчетов полномасштабных активных зон водоохлаждаемых ядерных реакторов позволяет получать реалистичную картину течения теплоносителя в АЗ и соответствующее распределение теплотехнических запасов. В дальнейшем на основании результатов моделирования полномасштабных АЗ возможна разработка методики обоснования теплотехнической надежности со значительно меньшим количеством допущений и со значительно большим пространством для обоснованного снижения консерватизма по сравнению с используемыми в настоящее время подходами. Также результаты подобного рода расчетов могут использоваться для интерпретации показаний термопар системы внутриреакторного контроля. Для дальнейшего увеличения быстродействия программы SC-INT при моделировании крупномасштабных фрагментов АЗ необходима реализация численного алгоритма, позволяющего осуществлять единичный расчет в параллельном режиме.

### Литература

1. Олексюк Д.А. Разработка и экспериментальное обоснование программы для пояечикового теплогидравлического расчета активных зон реакторов типа ВВЭР (диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 05.14.03). Москва, 2002, 194 с.

2. Kobzar L.L., Oleksyuk D.A., Semchenkov Y.M. Experimental and computational investigations of heat and mass transfer of intensifier grids. *Kerntechnik*. 2015;80(4):349–358. DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110508>

3. SC-INT. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин № 578 от 31.03.2023.

4. Теплопередача в двухфазном потоке (Под ред. Д. Баттерворса и Г. Хьюитта). М.: Энергия, 1980, 328 с.

5. Avramova M.N., Salko R.K. et al. CTF theory manual. ORNL/TM-2016/430, USA, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2172/1340446>

6. Liu A., Yang B. W., Han B., Zhu X. Turbulent mixing models and other mixing coefficients in subchannel codes – a review part A: single phase. *Nuclear Technology*. 2020;206(9):1253–1295. DOI: <https://doi.org/10.1080/00295450.2020.1792753>

7. Вертиков Е.А., Олексюк Д.А., Зубков А.Г., Малютин М.А. К вопросу о валидации ячейковых кодов для расчета активных зон реакторов типа ВВЭР. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2025;1:232–244. EDN: MSMICP.

8. Balay S. et al. PETSc/TAO Users Manual Revision 3.19. Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States), 2023, № ANL-21/39.

9. Олексюк Д.А., Вертиков Е.А. Подходы к валидации ячейковых расчетных программ, используемых для обоснования теплотехнической надежности АЗ ВВЭР, и проблемы обоснования их погрешностей. *Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок*. 2025;1(39):10–26. EDN: RDPYPX.

10. Кобзарь Л.Л., Олексюк Д.А. Экспериментальные исследования эффективности дистанционирующих решеток-интенсификаторов теплообмена. *Атомная энергия*. 2018;125(5):258–263. EDN: YPLNDF.

11. Крапивцев В.Г., Солонин В.И. Модельные исследования гидродинамики потока теплоносителя на входе в активную зону ВВЭР-1000. *Атомная энергия*. 2021;130(1):14–20. EDN: KRTCHT.

12. Lizorkin M.P., Gordienko P.V., Kalugin M.A., Kotsarev A.V., Oleksyuk D.A. Development of codes and KASKAD complex. *Kerntechnik*. 2015;80(4):314–320. EDN: UZZKIV. DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110503>

13. Перепелица Н.И. Решетки со смесительными элементами для ТВС ВВЭР. *Атомная энергия*. 2020;128(3):123–130. EDN: BVECDM.

14. Зубков А.Г., Олексюк Д.А., Вертиков Е.А., Носков А.С. Методики расчета величины КТП в реакторах с водой под давлением и оценка возможности ее определения с помощью феноменологических моделей кризиса теплоотдачи. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2025;2:317–353. EDN: WLPLCW.

Поступила в редакцию 15.07.2025

После доработки 11.11.2025

Принята к опубликованию 27.11.2025

## Авторы

Вертиков Евгений Андреевич, младший научный сотрудник,

E-mail: [Vertikov@nrcki.ru](mailto:Vertikov@nrcki.ru)

Запоржин Кирилл Вениаминович, младший научный сотрудник,

E-mail: [Zaporzhin\\_KV@nrcki.ru](mailto:Zaporzhin_KV@nrcki.ru)

Олексюк Дмитрий Анатольевич, начальник отдела, к.т.н.,

E-mail: [Oleksyuk\\_DA@nrcki.ru](mailto:Oleksyuk_DA@nrcki.ru)

Хамаз Владислав Александрович, старший научный сотрудник,

E-mail: Hamaza\_VA@nrcki.ru

Худыкин Алексей Михайлович, главный специалист,

E-mail: Khudykin\_AM@nrcki.ru

Глазов Максим Алексеевич, ведущий специалист,

E-mail: MAGlazov@tvel.ru

Морозкин Олег Николаевич, руководитель проекта,

E-mail: OlnMorozkin@tvel.ru

UDC 621.039.534...23

## Modernization of Subchannel Thermal-Hydraulic Code SC-INT

**Vertikov E.A.<sup>1</sup>, Zaporzhin K.V.<sup>1</sup>, Oleksyuk D.A.<sup>1</sup>, Khamaza V.A.<sup>1</sup>, Khudykin A.M.<sup>1</sup>,  
Glazov M.A.<sup>2</sup>, Morozkin O.N.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> NRC "Kurchatov Institute",

1 Akad. Kurchatov Sq., 123182 Moscow, Russia

<sup>2</sup> JSC "TVEL",

49 Kashirskoye Sh., 115409 Moscow, Russia

### Abstract

The article presents the main results of the cycle of works on modernization of the source code of the SC-INT computer program designed for subchannel thermal-hydraulic calculations of the cores of water-cooled nuclear reactors. The mathematical description of the program is briefly given, including the method of allocation of elementary volumes in space, the discrete analog of the basic conservation laws forming the system of nonlinear equations, as well as the method of its solution. The path passed on the internal modernization of the program is described in detail: ejection of obsolete Fortran programming language constructions, transition to the structure-oriented approach of writing the source code, development of modular architecture, as well as the implementation of an alternative numerical algorithm for solving the basic system of nonlinear equations using the PETSc library. As an example of SC-INT program capabilities, which appeared after the above described modernizations, the results of thermal-hydraulic calculation in the fine mesh approximation of a full-scale core of VVER-1000 reactor, assembled from fuel assemblies of different design: with and without installed grids-intensifiers of "Vikhr" and "Progonka" type. It is demonstrated that the residuals on the main coolant parameters achieved in the simulation of full-scale core modeling match in order with the corresponding values characteristic for the calculations of small-scale experimental models of fuel assemblies. Thermal-hydraulic calculations of full-scale cores in the subchannel approximation opens the possibility for the development of coupled program complexes designed for improved estimation of the parameters of multiphysics processes in the cores of water-cooled nuclear reactors.

**Keywords:** program architecture, subchannel analysis, control volume method, thermal-hydraulic calculation, core, VVER

**For citation:** Vertikov E.A., Zaporzhin K.V., Oleksyuk D.A., Khamaza V.A., Khudykin A.M., Glazov M.A., Morozkin O.N. Modernization of Subchannel Thermal-Hydraulic Code SC-INT. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;4:29–43. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.03> (in Russian).

## References

1. Oleksyuk D.A. Development and experimental substantiation of the program for the sub-channel thermal-hydraulic calculation of VVER-type reactor cores. Dr. Sci. diss. Moscow, 2002, 194 p. (in Russian).
2. Kobzar L.L., Oleksyuk D.A., Semchenkov Y.M. Experimental and computational investigations of heat and mass transfer of intensifier grids. *Kerntechnik*. 2015;80(4):349–358. DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110508>
3. SC-INT. Certification passport of the computer program № 578, Mar. 31, 2023 (in Russian).
4. Butterworth D., Hewitt G.F. Two-phase flow and heat transfer. Oxford University Press, 1977, 514 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.4440020408>
5. Avramova M.N., Salko R.K. et al. CTF theory manual. ORNL/TM-2016/430, USA, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2172/1340446>
6. Liu A., Yang B. W., Han B., Zhu X. Turbulent mixing models and other mixing coefficients in subchannel codes – a review part A: single phase. *Nuclear Technology*. 2020;206(9):1253–1295. DOI: <https://doi.org/10.1080/00295450.2020.1792753>
7. Vertikov E.A., Oleksyuk D.A., Zubkov A.G., Malyutin M.A. On the issue of validation of subchannel codes for calculating of the VVER type reactors core. *Problems of atomic science and technology. Series: nuclear and reactor constants*. 2025;1:232–244. EDN: MSMICP (in Russian).
8. Balay S. et al. PETSc/TAO Users Manual Revision 3.19. Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States), 2023, № ANL-21/39.
9. Oleksyuk D.A., Vertikov E.A. Approaches to validation of subchannel computer codes used to analyze the thermal behavior of the VVER reactor cores. Problems of code bias estimation. *Nuclear propulsion reactor plants. Life cycle management technologies*. 2025;1(39):10–26. EDN: RDPYPX (in Russian).
10. Kobzar L.L., Oleksyuk D.A. Experimental studies of the efficiency of heat-and-mass transfer intensifier spacer-grids. *Atomic energy*. 2019;125:290–296. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00483-8>
11. Krapivtsev V.G., Solonin V.I. Model studies of coolant flow hydrodynamics at VVER-1000 core entry. *Atomic energy*. 2021;130:13–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00766-z>
12. Lizorkin M.P., Gordienko P.V., Kalugin M.A., Kotsarev A.V., Oleksyuk D.A. Development of codes and KASKAD complex. *Kerntechnik*. 2015;80(4):314–320. EDN: UZZKIV. DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110503>
13. Perepelitsa N.I. Grids with mixing elements for VVER fuel assemblies. *Atomic energy*. 2020;128:129–135. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00663-x>
14. Zubkov A.G., Oleksyuk D.A., Vertikov E.A., Noskov A.S. Computational Methodologies for Critical Heat Flux Prediction in Pressurized Water Reactors and Feasibility Assessment of Phenomenological DNB Models. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear and reactor constants*. 2025;2:317–353. EDN: WLPLCW (in Russian).

## Authors

Evgeny A. Vertikov, junior researcher,

E-mail: [Vertikov@nrcki.ru](mailto:Vertikov@nrcki.ru)

Kirill V. Zaporzhin, junior researcher,

E-mail: [Zaporzhin\\_KV@nrcki.ru](mailto:Zaporzhin_KV@nrcki.ru)

Dmitry A. Oleksyuk, head of department, Cand. Sci. (Engineering),



E-mail: Oleksyuk\_DA@nrcki.ru

Vladislav A. Khamaza, senior researcher,

E-mail: Hamaza\_VA@nrcki.ru

Alexey M. Khudykin, chief specialist,

E-mail: Khudykin\_AM@nrcki.ru

Maxim A. Glazov, leading specialist,

E-mail: MAGlazov@tvel.ru

Oleg N. Morozkin, project manager,

E-mail: OLNMorozkin@tvel.ru