

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНЫХ ЗОНАХ И ОТДЕЛЬНЫХ ТВС ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Семенович О.В. (ОИЭЯИ–Сосны НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь)
E-mail: sov@sosny.bas-net.by

Abstract: *The report made the analysis of methods of simulation of hydrodynamics and heat and mass transfer in the rod fuel assemblies of nuclear power reactors. Considered the subchannel multifield multifluid mathematical model, which is used to study the thermohydraulic processes in the fuel assembly with different operating modes: normal operation, accidents. The report presents the results of computer simulation.*

Keywords: *subchannel model, computer simulation, fuel assembly, nuclear power reactor.*

Одним из основных методов обоснования безопасности ядерной энергетической установки (ЯЭУ) и, в частности, реакторной установки (РУ) является математическое моделирование. В документе МАГАТЭ [1] заявлено, что набор кодов, необходимый для анализа безопасности, может быть классифицирован на 6 групп. Одну из них (группа "С" по классификации [1]) составляют теплогидравлические коды. Они в свою очередь подразделяются на четыре подгруппы: 1) системные коды; 2) субканальные коды; 3) коды, реализующие модель пористого тела; 4) коды, моделирующие детальную структуру потока (CFD-коды). Системные теплогидравлические коды – программные комплексы, предназначенные для моделирования параметров теплоносителя во всей ЯЭУ. При возникновении нештатных и, тем более, аварийных режимов происходит изменение фазового состава теплоносителя. В реакторах с водой под давлением при штатной работе теплоноситель является однофазной жидкостью. При аварийных ситуациях теплоноситель вскипает, превращаясь в парожидкостную смесь. В зависимости от того, как развивается процесс, в теплоносителе реализуются различные режимы течения и теплообмена. Корректно описать такие процессы можно, только моделируя парожидкостную смесь в приближении раздельного течения фаз [2, 3]. Системные коды, в которых теплоноситель описывается в названном приближении, получили название – реалистические. Однако, моделируя поведение теплоносителя во всех элементах установки в их взаимной связи, системные коды весьма грубо детализируют геометрию исследуемого оборудования. Так, например, корпус реактора характеризуется несколькими (как правило, 3–4) точками по радиусу (в поперечном сечении) и несколькими десятками (~ 30) точками по длине. Естественно такой масштаб усреднения не может быть признан удовлетворительным при теплогидравлическом анализе активной зоны. Наиболее широкое применение в практике теплогидравлических расчётов стержневых ТВС нашли коды, основанные на субканальном приближении [4, 5]. Субканальные коды позволяют рассчитывать параметры теплоносителя, усреднённые по площади проходного сечения элементарной ячейки [5]. Соответствующим образом изменяется и аксиальный масштаб. В результате для случая, например, гексагональной сборки из 331 стержня удаётся получить информацию о параметрах потока в 666 точках поперечного сечения и ~100?200 точках по длине пучка. К примеру – реактор содержит активную зону, состоящую из 163 кассет с 331 стержнем гексагональной упаковки. Моделирование такого аппарата в рамках системного реалистического кода, позволяет получить в каждый момент времени усреднённые параметры теплоносителя в активной зоне в $\sim(1?2)\cdot 10^2$ точках. Последующее применение субканального кода позволяет на несколько порядков детализировать пространственное распределение исследуемых величин, усреднённые “субканальные” значения которых вычисляются в $\sim(1?2)\cdot 10^7$ точках активной зоны.

Представляется очевидной необходимость интеграции в единый программный комплекс системного реалистического и субканального кодов. Однако, невозможно непосредственно применять полученную при помощи системного кода информацию в качестве исходных данных для субканального кода. Необходима модель и реализующий её код, позволяющий рассчитывать распределение усреднённых по сечению ТВС параметров теплоносителя (в частности массового расхода). Эта же модель должна учитывать, что в субканальных кодах более детально (большим количеством фаз) и, следовательно, адекватно моделируется структура теплоносителя. Объединяемые системный реалистический и субканальный коды должны использовать одинаковые карты режимов течения.

Ниже представлены некоторые результаты вычислительных экспериментов, выполненных автором, и данные натурных экспериментов [6], использованные для верификации расчётного кода. Моделировались теплофизические процессы, протекающие в охлаждаемой водой сборке «квадратной упаковки» из 9 электрообогреваемых стержней. Для проведения вычислительных экспериментов использовался разработанный автором субканальный расчётный код, математические модели и численные схемы которого рассмотрены, в частности, в работах [7–12]. Схема нумерации субканалов и зазоров между ними представлена на рисунке 1.

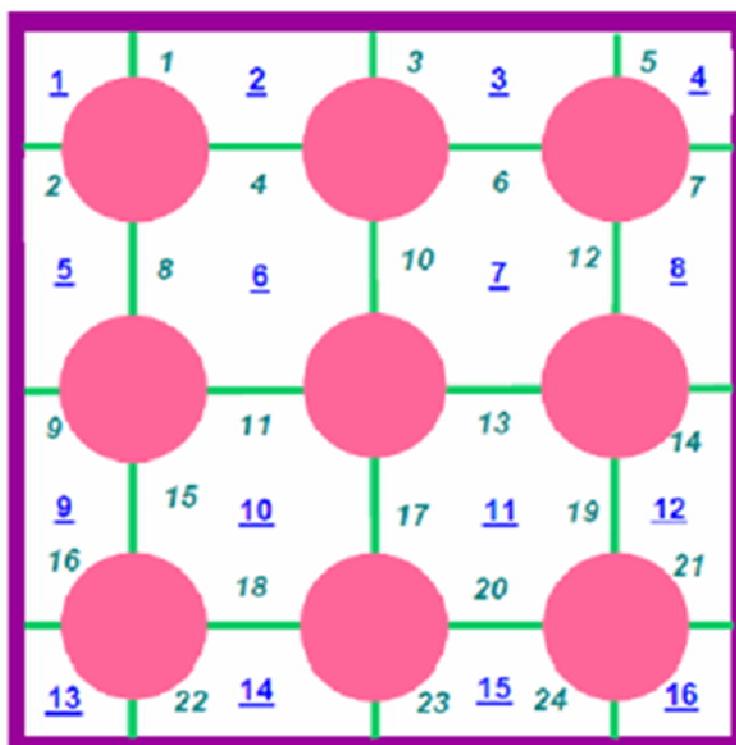


Рис. 1. Схема нумерации субканалов и зазоров квадратного пучка стержней 9 стержней – 16 субканалов и 24 зазора

На рисунке 2 представлено сравнение расчетных и натурных данных для трёх экспериментов. Варианты «1», «2», «3» – варианты «2D3», «2E3», «2G2» согласно классификации таблицы 1 из [6]; там же можно найти сведения о параметрах сборки и режимах, моделируемых в натурных экспериментах. Таким образом, можно отметить хорошее совпадение результатов расчёта и данных натурных экспериментов для всех рассмотренных вариантов.

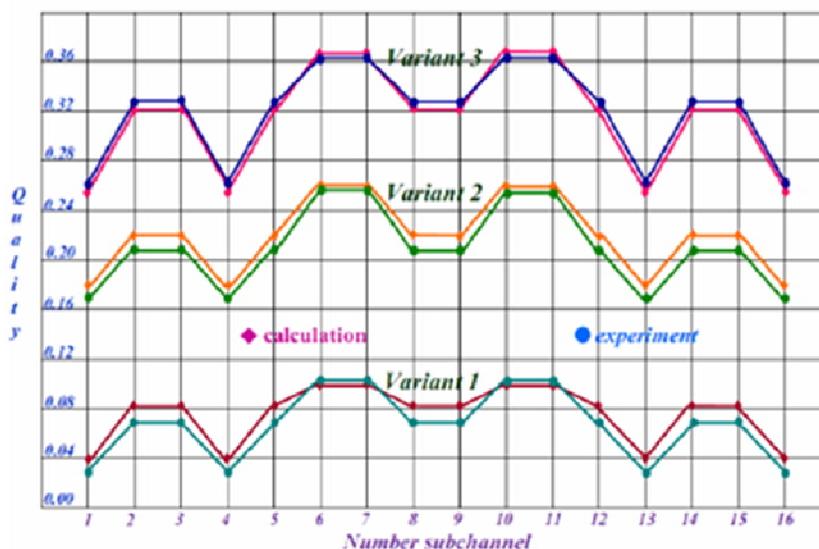


Рис. 2. Сравнение результатов вычислительных и натуральных экспериментов

В качестве связующего звена между системным и субканальным кодом используется компьютерная программа, реализующая математическую модель, в которой параметры теплоносителя рассматриваются усреднёнными по поперечному сечению ТВС, составляющих активную зону (АЗ) реактора. Расчётные теплогидравлические коды такого класса называют «канальными» или «кассетными». Часто такие программы используют модели, основанные на приближении пористого тела. Автор в качестве «кассетной» предложил применять математическую модель, являющуюся упрощением субканальной: ТВС рассматривается как субканал, не взаимодействующий со смежными [13]. То есть вся АЗ представляется совокупностью невзаимосвязанных параллельных каналов с общим входным и выходным коллекторами. Опыт показал, что такая модель требует доработки. Был разработана и проходит тестирование компьютерная программа, в которой реализована «макросубканальная» (суть термина поясняет рисунок 3) модель, в которой роль «больших» субканалов (макросубканалов) выполняют группы смежных в достаточной мере гидравлически эквивалентных субканалов.

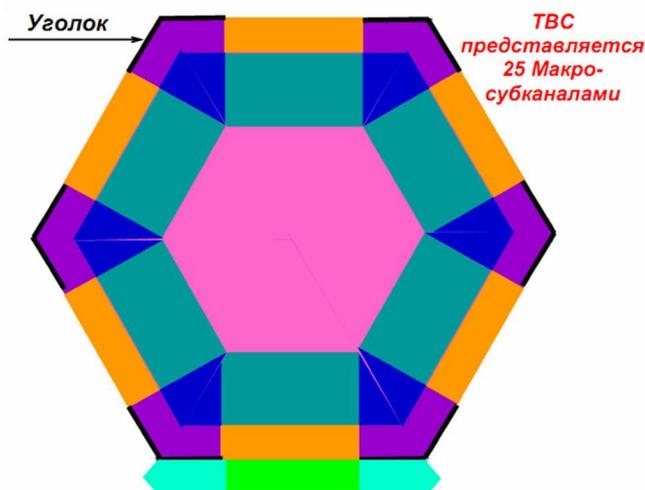


Рис. 3. Схема разбивки гексагональной ТВС на микросубканалы

Такой подход позволяет рассчитывать всю АЗ, учитывая при этом тепломассоперенос между ТВС и, как следствие моделировать, бесчехловые сборки.

Список литературы: 1. Accident Analysis for Nuclear Power Plants / Safety Reports Series, No. 23. – Vienna: IAEA, 2002. – 121 p. 2. Ishii, M. Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow / M. Ishii. – Paris: Eyrolles, 1975. – 284 p. 3. Семенович О.В. К проблеме термогидродинамического расчёта стержневых тепловыделяющих сборок. Уравнения модели раздельного течения фаз / О.В. Семенович. – Минск, 1999. – 75 с. – (Препринт / НАН Беларуси. Ин-т проблем энергетики; ИПЭ-50). 4. Семенович, О.В. К проблеме термогидродинамического расчёта стержневых тепловыделяющих сборок. Субканальные математические модели. Системы решаемых уравнений / О.В. Семенович. – Минск, 2001. – 48 с. – (Препринт / НАН Беларуси. Ин-т проблем энергетики; ИПЭ-68). 5. Семенович, О.В. Анализ субканальных моделей термогидродинамического расчёта стержневых ТВС: классификация и тенденции развития / О.В. Семенович. – Минск, 2009. – 36 с. – (Препринт / НАН Беларуси. Объединенный ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны; ОИЭЯИ–Сосны-40). 6. Kronenberg, J. COBRA-TF – A Core thermal-hydraulic code: validation against GE 3×3 experiment / J. Kronenberg [et al] // Jahrestagung kerntechnik 2003: Annual meeting on nuclear technology 2003. – P. 105–109. 7. Семенович О.В. Расчётный анализ теплогидравлических процессов в твэльных сборках // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 17–22 сентября 2012 г. В 3-х т. – Донецк: ДонНТУ, 2012. – Т. 2. – С. 311–314. 8. Семенович О.В. Моделирование термомеханических процессов в стержневых тепловыделяющих элементах водоохлаждаемых ядерных реакторов // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16–21 сентября 2013 г. В 3-х т. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – Т. 3. – С. 17–20. 9. Семенович, О.В. Математическое моделирование теплогидравлических процессов в стержневых тепловыделяющих сборках // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэх. навук. – 2014. – № 1. – С. 82–89. 10. Semenovich, O.V. A Numerical Simulation of the Parameters of the Coolant in the Cores of Nuclear Power Reactors / O.V. Semenovich // Nonlinear Dynamics and Applications. – 2014. – V. 20. – P. 196–204. 11. Семенович, О.В. Моделирование термогидродинамических процессов в стержневых топливных сборках водоохлаждаемых ядерных реакторов / О.В. Семенович // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XXI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 15–20 сентября 2014 г. – Донецк: МСМ, 2014. – С. 236–239. 12. Semenovich, O.V. Modeling of Thermohydrodynamic Processes in Fuel Rod Assemblies of Water Cooled Reactors / O.V. Semenovich // Proceedings of the twenty-fourth Symposium of AER, Sochi (Russian Federation), 14–19 October, 2014. In 2 parts. – MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest (ISBN 978–963–7351–23–5 ISBN 978–963–7351–24–2). – Part 2. – P. 649–665.