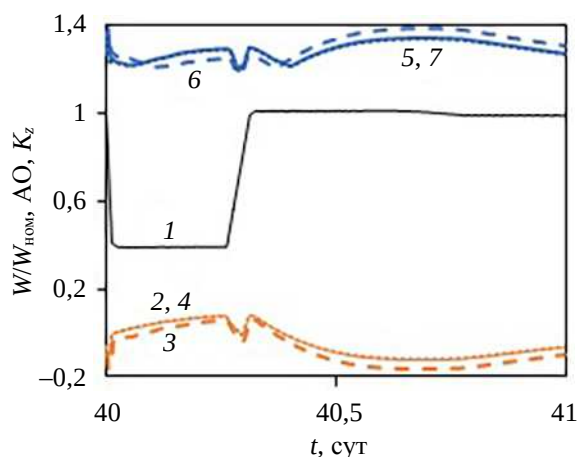




Р и с. 2. То же, что на рис. 1, для аксиального офсета в реакторной (2), расчетной модели с гармонической функцией $\varphi(E)$ (3) и нейросетевым уточнением (4) соответственно; 5, 6, 7 — то же для коэффициента высотной неравномерности K_z

тельских установок мегакласса» НИЦ «Курчатовский институт» (субсидия Минобрнауки, идентификатор работ RFMEFI62117X0016), <http://ckp.nrcki.ru/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бенджо И., Гудфеллоу Я., Курвилль А. Глубокое обучение. М.: ДМК-Пресс, 2018.
2. Николенко С.И., Кадурин А.А., Архангельская Е.О. Глубокое обучение. СПб: Питер, 2021.
3. Увакин М.А., Николаев А.Л., Антипов М.В. и др. Развитие методики расчетного обоснования безопасности ВВЭР в маневренных режимах посредством использования нейронной сети. — Атомная энергия, 2024, т. 136, вып. 3—4, с. 102—106.
4. Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М.: Энергоатомиздат, 1990.

Поступила в Редакцию 20.12.24

УДК 621.039.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОСОЛЕВЫХ РЕАКТОРАХ

Колобовников И.П., Куприянов К.С., Фейнберг О.С., Игнатьев В.В.

(НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

e-mail: kolobovnikov_ip@nrcki.ru

В жидкосольевом ядерном реакторе (ЖСР) топливная соль в виде расплава солей фторидов или хлоридов металлов принудительно циркулирует в замкнутом контуре, где нагревается в результате энерговыделения в активной зоне и охлаждается в промежуточном теплообменнике жидкосольевым теплоносителем. ЖСР имеет преимущества в безопасности и надежности эксплуатации, включая отсутствие тяжелых аварий с плавлением топлива, низкое давление паров топливной соли и промежуточного теплоносителя, возможность корректирования состава топливной соли без останова реактора, что позволяет минимизировать запас реактивности на выгорание, большой мгновенный отрицательный температурный коэффициент реактивности и инерционность переходных процессов. Циркуляция жидкого топлива обуславливает некоторые явления, которые отсутствуют в твердо-топливных реакторных установках, в частности, перенос ядер-предшественников запаздывающих нейтронов потоком топливной соли, их перераспределение в активной зоне и выход во внешнюю часть реакторного контура.

В настоящее время в разработанных программных средствах мультифизического моделирования ЖСР, как правило, использовалось трехмерное или осесимметричное двумерное геометрическое представление активной зоны, что в той или иной степени приводит к высоким вычислительным затратам [1—3]. Такие подходы крайне требовательны к времени моделирования длительных переходных процессов, что затрудняет анализ чувствительности системы к изменению ее параметров или оптимизацию конструкции при инженерных расчетах ЖСР. Более низкий порядок представления геометрии, например, одномерный позволяет значительно сократить время вычислений, но результаты должны быть проверены на корректность в эксперименте или на более точных расчетных моделях. В результате такой проверки формулируются выводы о границах применения одномерной модели для исследования переходных процессов и целесообразности ее использования при обосновании конкретного проекта ЖСР.

Для моделирования стационарных и переходных процессов в ЖСР в НИЦ «Курчатовский

институт» был создан расчетный комплекс MULTIMSR, который представляет собой набор расчетных программ, объединенных единой структурой. В частности, MULTIMSR позволяет проводить прецизионные трехмерные мультифизические расчеты переходных процессов, используя Serpent-2 для подготовки нейтронно-физических констант и библиотеку вычислительной гидродинамики OpenFOAM для решения теплогидравлической задачи [4]. Альтернативным способом мультифизического моделирования переходных процессов в ЖСП может быть программное средство MSR-NODES, также входящее в состав MULTIMSR и реализующее упрощенные точечные и одномерные уравнения для описания нейтронной физики и теплогидравлики. Объединение расчетных инструментов в единый комплекс позволяет проводить верификационные расчеты с помощью трехмерных мультифизических решателей и упрощенных одномерных моделей.

СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ

Трехмерное представление. Гидродинамика, теплофизика и нейтронная физика объекта исследования описываются набором дифференциальных уравнений. За основу взята мультифизическая система уравнений, в которой приближение пористого тела было включено в теплогидравлическую часть задачи [5]. Гидродинамическая модель была упрощена в результате допущения о несжимаемости жидкости. Такой подход позволяет моделировать разные элементы реакторного контура с разным уровнем детализации, что сокращает вычислительные затраты при разрешении областей, где не требуется высокая точность. Гидродинамическая система уравнений, использованная в настоящей работе, формулируется следующим образом:

$$\partial \zeta \gamma / \partial t + \partial \zeta \gamma u_j / \partial x_j = 0; \quad (1)$$

$$\gamma \partial \zeta u_i / \partial t + \gamma u_j \partial \zeta u_i / \partial x_j = -\zeta \partial p / \partial x_j + \partial \left[\mu \partial \zeta u_i / \partial x_j - \gamma \overline{u'_i u'_j} \right] / \partial x_j + \zeta \gamma (g + F_{\text{тр}i}), \quad (2)$$

где ζ — пористость жидкости; γ — плотность жидкости, кг/м³; t — время, с; u_j — компонент вектора скорости, м/с; x_j — компонент вектора

координат, м; p — давление жидкости, Па; μ — динамическая вязкость, Па·с; g — ускорение свободного падения, м/с²; $F_{\text{тр}i} = \lambda_{\text{тр}i} u_i^2 / 2d_g$ — сопротивление трения, м²/с, где $\lambda_{\text{тр}i}$ — коэффициент трения; d_g — гидравлический диаметр, м.

Сила сопротивления трения $F_{\text{тр}i}$ рассчитывается в областях с пористыми телами, где задается коэффициент трения $\lambda_{\text{тр}i}$ в виде функции от числа Рейнольдса или постоянного коэффициента.

Тензор турбулентных напряжений (напряжений Рейнольдса) $\overline{u'_i u'_j}$, входящий в систему (1), (2), рассчитывается согласно выбранной модели турбулентности из доступных в библиотеке OpenFOAM.

Уравнение сохранения энергии для жидкости записано следующим образом:

$$\partial \zeta T / \partial t + \nabla (\zeta \mathbf{U} T) - \Delta \zeta a T = \zeta q_v / \gamma C_p + \zeta A_v h (T - T^*) / \gamma C_p, \quad (3)$$

где T — температура, К; ∇ — оператор набла; $\mathbf{U}$ — поле скорости, м/с; Δ — оператор Лапласа; a — коэффициент температуропроводности, м²/с; q_v — плотность энерговыделения, Вт/м³; C_p — удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); A_v — удельная площадь теплообмена, 1/м; h — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); T^* — температура сопряженного теплообменного элемента, К.

Последнее слагаемое в уравнении (3) описывает источник или сток теплоты в локальной расчетной области и позволяет связывать разные области теплообмена, моделируя тем самым многоконтурные схемы. При этом зависимость плотности жидкости от температуры принята линейной (приближение Буссинеска).

Нейтронно-физическая составляющая задачи сформулирована в диффузионном приближении.

Уравнение для концентрации групп ядер-предшественников запаздывающих нейтронов, учитывающее их конвективный перенос и диффузию в топливной соли, записывается в виде

$$-\nabla (\mathbf{U} C_i) + \nabla (\mathbf{v}_T + \mathbf{v}) / \text{Sc}_T \nabla C_i - \lambda_i C_i + \beta_{0i} \sum_j^m \mathbf{v}_{fj} \Sigma_{fj} \Phi_j = \partial C_i / \partial t,$$

где C_i — концентрация i -й группы ядер-предшественников, см^{-3} ; v_T — кинематическая турбулентная вязкость жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$; ν — кинематическая вязкость жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$; Sc_T — турбулентное число Шмидта; λ_i — постоянная распада для i -й группы ядер-предшественников, с^{-1} ; β_{0i} — доля запаздывающих нейтронов i -й группы; v_{fj} — средний выход нейтронов j -й группы на одно деление; Σ_{fj} — макросечение деления, см^{-1} ; Φ_j — плотность потока нейтронов, $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Изменение нейтронно-физических сечений, обусловленное увеличением или уменьшением плотности, а также эффектом Доплера, учитывается на каждой расчетной итерации. Формула, описывающая зависимость макросечения от изменения плотности и температуры, записывается в виде

$$\Sigma = [\Sigma_0 + \alpha \ln(T/T_0)] \zeta \gamma / \gamma_0, \quad (4)$$

где Σ_0 — макросечение при базовой плотности и температуре; α — коэффициент, учитывающий изменение сечения за счет эффекта Доплера; T_0 , γ_0 — базовая температура и плотность, одинаковые для всех макросечений. Малогрупповые константы для выражения (4) рассчитываются с помощью Serpent-2.

Одномерное представление. В MSR-NODES реализовано одномерное представление трактов циркуляции топливной соли и теплоносителей в контурной схеме ЖСР, при котором реальные каналы произвольных форм сводятся к эквивалентным. Эквивалентные каналы разбиваются на контрольные объемы, для которых задаются граничные условия и составляются уравнения сохранения энергии.

Нейтронно-физические процессы в активной зоне ЖСР описываются в приближении точечной кинетики. Для учета эффекта, возникающего при циркуляции топливной соли вне активной зоны, а именно уменьшения эффективной доли запаздывающих нейтронов, в MSR-NODES предусмотрены два подхода. Первый из них заключается во введении корректирующего фактора для эффективной доли запаздывающих нейтронов [6]. Второй метод учета переноса ядер-предшественников запаздываю-

щих нейтронов заключается во введении в исходную систему уравнений точечной кинетики дополнительных слагаемых и уравнений, описывающих выход ядер-предшественников из активной зоны [7]. Стационарное решение расширенной системы уравнений определяет стационарную реактивность, которую необходимо внести в реактор для компенсации выхода ядер-предшественников запаздывающих нейтронов.

Время жизни мгновенных нейтронов, а также постоянные распада и эффективная доля групп ядер-предшественников запаздывающих нейтронов определяются предварительным расчетом с использованием Serpent-2.

Распределение температуры в каналах рассчитывается по уравнению закона сохранения энергии для жидкости, обменивающейся теплотой со стенкой канала [7].

Решение систем уравнений нейтронной физики и теплофизики в MSR-NODES осуществляется численно с использованием неявной схемы Эйлера.

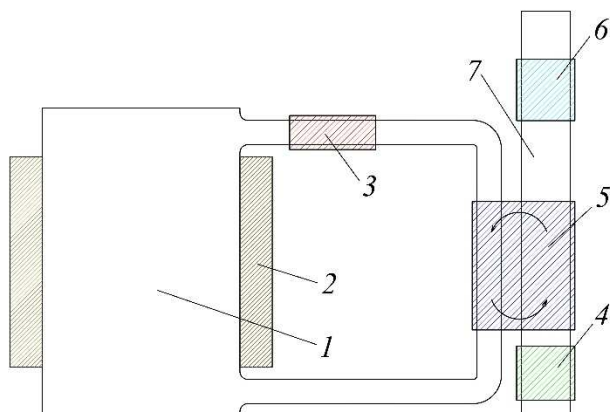
Для определения расхода теплоносителя в элементах контурной схемы перед расчетом шага по времени рассчитывается распределение давления согласно уравнению Бернулли. Потери давления определяются с помощью критериальных гидравлических соотношений, после чего распределение расхода корректируется для обеспечения равенства потери напора между параллельными каналами.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Переходный процесс, связанный с нарушением теплоотвода из-за отказа насоса промежуточного контура в исследовательском ЖСР с активной зоной полостного типа тепловой мощностью 10 МВт, моделировали с помощью трехмерного мультифизического решателя расчетного комплекса MULTIMSR и программного средства MSR-NODES [8]. В исследовательском ЖСР в качестве топливной соли и теплоносителя использован расплав молярного состава $0,73\text{LiF}—0,27\text{BeF}_2 + (\text{PuF}_3 + \text{MAF}_m)$ и $0,66\text{LiF}—0,34\text{BeF}_2$ с температурой плавления 858 и 732 К соответственно. Исследовательский ЖСР имеет цилиндрическую активную зону и однопетлевую систему теплоотвода. Основные характеристики реакторного и промежуточного контуров следующие:

Активная зона:	
диаметр, м . . .	1,22
высота, м . . .	1,65
Отражатель:	
высота, м . . .	1,3
толщина, м . . .	0,2
Диаметр внешнего трубопровода, м . . .	0,15
Тепловая мощность, МВт . . .	10
Расход соли:	
реакторный контур, кг/с . . .	141,6
промежуточный контур, кг/с . . .	285
Температура топливной соли:	
на входе в активную зону, К . . .	937
на выходе из активной зоны, К . . .	973
Температура теплоносителя:	
на входе в теплообменник промежуточного контура, К . . .	853
на выходе из теплообменника промежуточного контура, К . . .	868

Расчетная геометрия включает три зоны: реакторный контур, отражатель и промежуточный контур, который в трехмерном мультифизическом решателе моделировался в одномерном приближении. В контурной схеме на рис. 1 также заданы следующие структурные элементы реакторного контура: центробежный насос, установленный на горячем участке, — область, в которой задан постоянный источник момента импульса, определяющий расход теплообменника промежуточного контура, обеспечивающий теплопередачу между контурами согласно последнему слагаемому в уравнении (3). Промежуточный контур включает в себя насос и идеальный теплообменник, обеспечивающий постоянную температуру теплоносителя на выходе из него.



Р и с. 1. Схема расчетной модели ЖСР: 1 — активная зона; 2 — боковой отражатель; 3, 4 — область насоса реакторного и промежуточного контура соответственно; 5, 6 — область промежуточного контура и идеального теплообменника соответственно; 7 — промежуточный контур

Коэффициенты теплопередачи рассчитывали согласно критериальным формулам для пучка гладких стержней треугольной упаковки, причем в обоих расчетных инструментах коэффициент определялся отдельно для каждого контрольного объема. Температура сопряженной области вычислялась как среднесмешанная по всей зоне. Теплообменник промежуточного контура моделировался в приближении пористого тела, обеспечивающем корректную скорость теплоносителя.

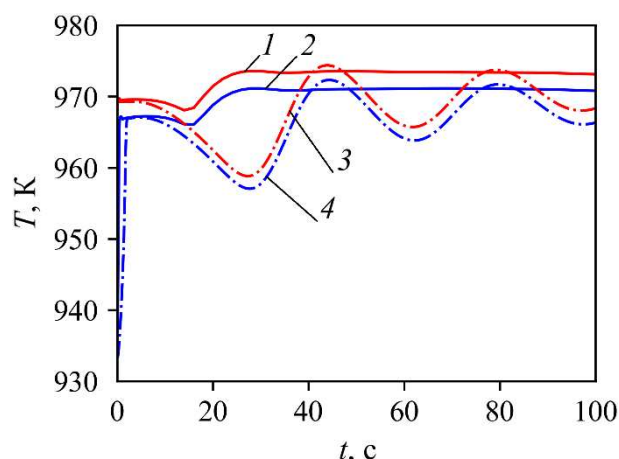
При достижении стационарного состояния системы ее параметры выбирали так, чтобы они соответствовали основным для ЖСР. При задании системы фиксировали температуру теплоносителя на входе в теплообменник промежуточного контура, температуру топливной соли регулировали выбором параметров теплообменника.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

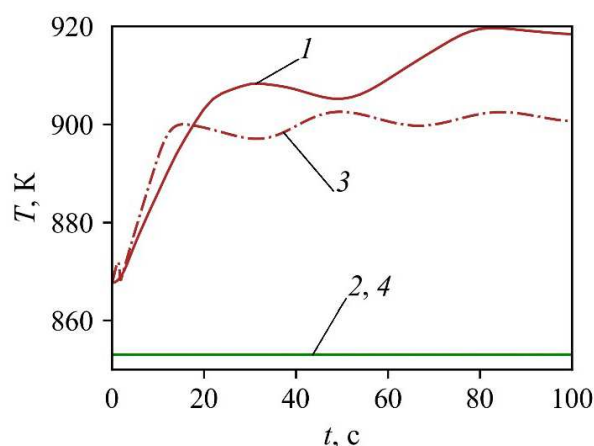
В качестве инициирующего события, вызывающего отклонение от стационарного состояния, рассмотрен мгновенный останов насоса промежуточного контура без учета выбега, нарушающий теплоотвод. В переходном процессе температура теплоносителя на входе в теплообменник принята неизменной 853 К.

Установившийся уровень естественной циркуляции определяли исходя из уравнений (1), (3), тогда как в MSR-NODES динамика изменения расхода задавалась вручную, исходя из результатов трехмерного мультифизического решателя. Результаты расчета температуры с использованием MSR-NODES были получены с применением расширенной системы уравнений точечной кинетики (рис. 2—4).

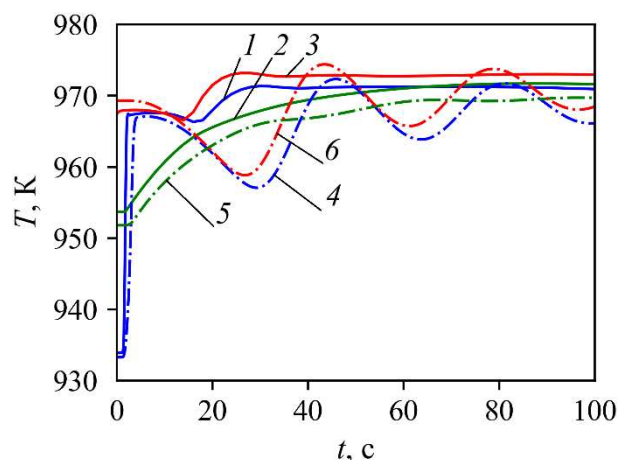
При потере принудительной циркуляции в промежуточном контуре устанавливается режим естественной циркуляции с расходом теплоносителя, равным 1,7% номинального. Такое уменьшение расхода и, следовательно, скорости теплоносителя вызывает ухудшение теплообмена со стороны промежуточного контура, что приводит к росту как температуры топливной соли, так и теплоносителя на выходе из теплообменника.



Р и с. 2. Температура топливной соли в переходном процессе на входе (1, 3) и выходе из теплообменника промежуточного контура (2, 4), рассчитанная с использованием трехмерного мультифизического решателя и MSR-NODES соответственно



Р и с. 3. Температура теплоносителя в переходном процессе на входе (1, 3) и выходе из теплообменника промежуточного контура (2, 4), рассчитанная с использованием трехмерного мультифизического решателя и MSR-NODES соответственно



Р и с. 4. Температура топливной соли в активной зоне при переходном процессе на входе (1, 4), средняя по объему (2, 5) и на выходе (3, 6), рассчитанная с использованием трехмерного мультифизического решателя и MSR-NODES соответственно

На рис. 4 показано изменение температуры топливной соли в активной зоне в ходе переходного процесса. Перегретая топливная соль поступает в активную зону спустя ~ 2 с, смешивается с находящейся в ней холодной солью, что приводит к плавному росту средней температуры и, как следствие, снижению мощности за счет обратных связей.

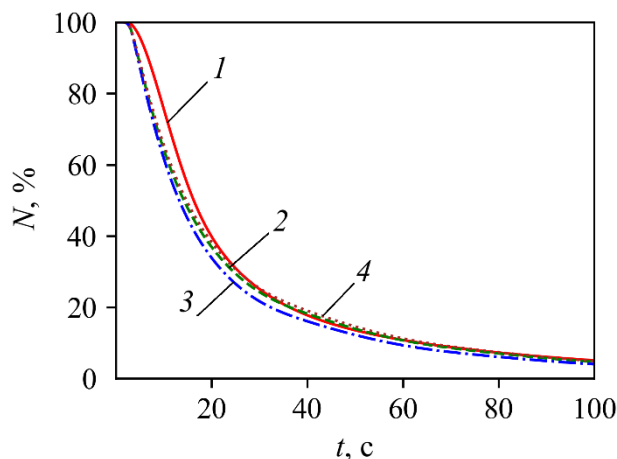
Максимальная температура топливной соли и теплоносителя промежуточного контура в рассматриваемом переходном процессе приведена в таблице. Как видно, максимальная температура топливной соли, рассчитанная с помощью трехмерного мультифизического решателя и MSR-NODES, согласуется. Расхождение температуры теплоносителя обусловлено различием в расходе естественной циркуляции, который варьируется в трехмерном мультифизическом решателе и постоянен при одномерном моделировании.

Максимальная температура топливной соли и теплоносителя промежуточного контура в переходном процессе

Участок контура	Трехмерный мультифизический решатель	MSR-NODES
На входе в активную зону, К	971	972
На выходе из активной зоны, К	973	974
Средняя по активной зоне, К	971	969
Теплоноситель		
На выходе из теплообменника промежуточного контура, К	920	903

Изменение относительной нейтронной мощности реактора показано на рис. 5.

Расчет переходного процесса с помощью MSR-NODES выполнялся трижды: с использованием двух способов учета потери запаздывающих нейтронов, вызванной циркуляцией топлива, и по уравнению точечной кинетики для твердотопливного реактора. Для сравнения на рис. 5 показано изменение относительной нейтронной мощности реактора, полученное тремя способами. При использовании коррек-



Р и с. 5. Изменение относительной нейтронной мощности в переходном процессе, рассчитанное с использованием трехмерного мультифизического решателя (1), MSR-NODES с расширенной системой точечной кинетики (2), MSR-NODES с корректирующим фактором (3), MSR-NODES с системой точечной кинетики для статического топлива (4)

тирующего фактора расчеты показывают наибольшее расхождение с трехмерным мультифизическим решателем, что обусловлено в первую очередь различием начальной реактивности: $11,4\% \beta_{\text{эф } \Sigma}$ по корректирующему фактору и $4,4\% \beta_{\text{эф } \Sigma}$ по расширенной системе. При использовании уравнения точечной кинетики для твердотопливного реактора отклонение мощности от трехмерного мультифизического решателя сопоставимо с расширенной системой, что объясняется малым объемом внешней части реакторного контура (7% полного объема) и слабым изменением скорости топливной соли в рассматриваемом переходном процессе.

Из полученных результатов следует, что останов насоса промежуточного контура в исследовательском ЖСР вызывает колебания температуры в реакторном контуре с запаздыванием, равным времени прохождения топливной соли от выхода из теплообменника промежуточного контура до входа в активную зону. В случае трехмерного расчета система обладает большей демпфирующей способностью за счет корректного моделирования перераспределения энергии при перемешивании жидкости, благодаря чему колебания затухают уже после ~ 30 с от начала переходного процесса. В одномерном расчете данный эффект не может быть учтен, поэтому колебания температуры продолжают даже после 100 с. При этом следует отметить совпадение изменения среднеинтегральных ха-

рактеристик, а именно нейтронной мощности и средней температуры топливной соли в активной зоне. Максимальная разница между расчетами нейтронной мощности составила около 12%, средней температуры топливной соли в активной зоне — менее 4 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные два инструмента позволяют моделировать переходные процессы в ЖСР с разной степенью детализации расчетной модели. В трехмерном мультифизическом решателе реализовано диффузионное приближение для расчета плотности потока нейтронов, теплогидравлическая часть мультифизической системы уравнений модифицирована для возможности задания в расчете пористости тел и локальных стоков и источников тепла. MSR-NODES реализует одномерное представление расчетных объектов, нейтронная мощность рассчитывается в приближении точечной кинетики с учетом эффектов, вызванных переносом продуктов деления, теплогидравлические процессы описываются интегральными формами законов сохранения энергии.

На примере переходного процесса, вызванного остановом насоса промежуточного контура, показаны возможности расчетных инструментов. Из анализа результатов можно сделать следующие выводы:

рассматриваемый переходный процесс имеет колебательный характер как при трехмерном, так и при одномерном моделировании. В одномерном приближении колебательный характер процесса более выражен, поскольку в нем не учитываются реальные процессы перераспределения теплоты между потоками жидкости. При трехмерном моделировании угасание температурного возмущения и стабилизация параметров реакторной установки наступают быстрее;

использование одномерного моделирования может быть применимо для оценки изменения интегральных параметров ЖСР, таких, как нейтронная мощность и средняя температура активной зоны. При этом для каждого конкретного иницирующего события следует проводить верификацию с трехмерным расчетом, чтобы удостовериться в корректности используемых упрощений;

результаты, полученные с применением уравнения точечной кинетики для твердотопливного реактора, согласуются как с расширенной системой, так и с результатами трехмерного решателя, что обусловлено незначительным изменением скорости топливной соли в рассмотренном переходном процессе. Однако при рассмотрении переходных процессов, сопровождающихся изменением скорости топливной соли, твердотопливная модель нейтронной кинетики может давать значительные расхождения результатов, поэтому необходимо использовать методы учета потери ядер-предшественников запаздывающих нейтронов [9];

результаты расчета подтверждают высокую степень инерционности рассмотренного переходного процесса для исследовательского ЖСР тепловой мощностью 10 МВт с активной зоной полостного типа. За первые 100 с переходного процесса относительная нейтронная мощность уменьшается до 10%, увеличение температуры топливной соли не превышает 10 К, теплоносителя промежуточного контура — 60 К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fiorina C., Lathouwers D., Aufiero M. e.a. Modelling and analysis of the MSFR transient behavior. — *Ann. Nucl. Energy*, 2014, v. 64, p. 485—498.
2. Aufiero M., Cammi A., Geoffroy O. e.a. Development of an OpenFOAM model for the molten salt fast reactor transient analysis. — *Chem. Engng Sci.*, 2014, v. 111, p. 390—401.
3. Cervi E., Lorenzi S., Cammi A., Luzzi L. Development of a multiphysics model for the study of fuel compressibility effects in the molten salt fast reactor. — *Ibid.*, 2019 v. 193, p. 379—393.
4. Leppänen J. Serpent — a continuous-energy Monte Carlo reactor physics burnup calculation code. — *VTT Techn. Research Centre of Finland*, 2013, v. 4, № 455, p. 2023—09.
5. Muhammad R., Sandesh B., Devshibhai Z. e.a. Preliminary design and analysis of liquid fuel molten salt reactor using multi-physics code GeN-Foam. — *Nucl. Engng Des.*, 2020, v. 369, p. 110826.
6. Куприянов К.С., Фейнберг О.С., Игнатьев В.В. Эффективная доля запаздывающих нейтронов в реакторе с циркулирующим жидкосолевым топливом. — *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов*, 2022, вып. 2, с. 97—106.
7. Luo R., Liu C., Macián-Juan R. A New uncertainty-based control scheme of the small modular dual fluid reactor and its optimization. — *Energies*, 2021, v. 14, p. 6708.
8. Горячих А.В., Зайко И.В., Клименко Д.С. и др. Результаты разработки эскизного проекта реакторной установки с исследовательским жидкосолевым реактором. Тезисы докл. XXIII Рос. конф. «Безопасность исследовательских ядерных установок». Димитровград, 2023, с. 5—6.
9. Zhang D., Rineiski A., Wang C. e.a. Development of a kinetic model for safety studies of liquid-fuel reactors. — *Progress Nucl. Energy*, 2015, v. 81, p. 104—112.

Поступила в Редакцию 5.03.24

УДК 669.296:621.039.546.3

КОРРОЗИЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СПЛАВА Э110 В РЕАКТОРАХ АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ И АСММ

Кулаков Г.В., Коновалов Ю.В., Ватулин А.В., Косауров А.А., Ершов С.А., Майников Е.В., Козлов А.В.,
Сорокин В.И., Савченко А.М. (АО «ВНИИНМ», г. Москва)
e-mail: gevkulakov@bochvar.ru

Атомные ледоколы и АСММ. Циркониевый сплав Э110 широко применяется в качестве оболочечного материала элементов активной зоны транспортных реакторов [1—3]. Эксплуатация в реакторах атомных ледоколов 10 комплектов активной зоны 14-10-3, 13 — 14-10-3М, четырех — 14-10-3МП успешно завершилась [4]. Однако результаты эксплуатации и послереакторных исследований элементов показывают, что работоспособность ТВЭЛОВ с оболочкой из сплава Э110 в активной зоне транспортных реакторов с повышенными ресурсными характе-

ристиками может быть ограничена в связи с развитием язвенной коррозии при облучении (рис. 1).

Коррозия оболочек ТВЭЛОВ из сплава Э110 при облучении имеет сложный характер и зависит от большого числа факторов. Ее главной особенностью в активной зоне ледоколов является переход с течением времени от равномерной к язвенной. Косвенным свидетельством развития очаговой (язвенной) коррозии оболочек является рост концентрации аммиака в теплоносителе первого контура.