

ли 12X18H10T. Мощность дозы при малом времени выдержки почти одинакова для всех марок стали. Основными изотопами, вносящими вклад в мощность дозы, являются ^{56}Mn ($T_{1/2}$ 2,58 ч) — продукт активации железа, марганца, хрома, ^{58}Co ($T_{1/2}$ 70 сут) — продукт активации кобальта и никеля. Сталь 03X16H15M3 содержит примерно на 30% больше никеля, чем 12X18H10T, при одинаковом содержании кобальта, что увеличивает мощность эквивалентной дозы при выдержке от недели до нескольких месяцев. При выдержке более года основной вклад в мощность дозы вносит ^{60}Co ($T_{1/2}$ 5,27 года), и здесь уже более эффективно применение стали марок 316L(N) и 316L(N)-IG за счет меньшего содержания кобальта (0,25 и 0,05% соответственно).

Заключение. Непосредственно после окончания работы нейтронного генератора (до 10 ч) значительное влияние на мощность дозы оказывает только его недавняя история. Основной вклад в мощность дозы вносят короткоживущие нуклиды, наработанные непосредственно перед завершением работы (^{56}Mn). Предыдущая история работы начинает сказываться при времени выдержки более 24 ч. К этому времени мощность дозы уменьшается примерно в 50 раз.

Материал фланца начинает оказывать существенное влияние на мощность дозы при

большом времени выдержки — начиная с 1 мес после окончания работы. Наименьшая мощность дозы достигается при изготовлении фланца из стали 316L(N)-IG. Через 24 ч после окончания работы основной вклад в мощность дозы вносят ^{58}Co , ^{54}Mn и ^{60}Co .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирьянов Г.И. Генераторы быстрых нейтронов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 223 с.
2. Важенни А.В., Рыкованов Г.Н. Уральский центр нейтронной терапии: история создания, методология, результаты работы. М.: АНО «Изд-во РАМН», 2008. 144 с.
3. Chen Y., Fischer U. Rigorous MCNP based shutdown dose rate calculations: computational scheme verification calculations and application to ITER. — Fus. Engng Des., 2002, v. 63—64, p. 107—114.
4. Werner C. MCNP Users Manual — Code Version 6.2. LA-UR-17-29981, 2017.
5. Forrest R.A. e.a. FENDL-3 Library-Summary Documentation. INDC(NDS)-628. IAEA Nuclear Data Section, 2012.
6. Flemming M. e.a. The FISPACTII User Manual. UKAEA-R(18)001, February 2018.
7. Fleming M. e.a. Probing Experimental and Systematic Trends of the Neutron Induced TENDL-2014 Nuclear Data Library. UKAEA-R(15)29, October 2015.
8. Сыромуков С.В., Степнов В.В., Добров Р.В. и др. Генератор нейтронов НГ-24 для медицины и термоядерных исследований. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 1, с. 58—60.

Поступила в Редакцию 10.10.19

УДК 621.039.513:621.039.526

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Рогожкин С.А., Осипов С.Л., Салеев А.В., Усынина С.Г. (АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород), Похилко В.И., Сазонова М.Л. (ООО «ТЕСИС», г. Москва)
e-mail: rogozhkin@okbm.nnov.ru

Одним из основных защитных барьеров распространения радиоактивных веществ в реакторе является оболочка твэла, исключаяющая при ее целостном состоянии выход продуктов деления из топлива в теплоноситель. В быстрых реакторах с натриевым теплоносителем функцию контроля герметичности оболочек твэлов выполняет специальная система, одной из подсистем которой является секторная система контроля герметичности оболочек (ССКГО). Принцип ее работы основан на регистрации

излучения предшественников запаздывающих нейтронов — короткоживущих продуктов деления топлива. При разгерметизации твэла по типу «контакт топлива с теплоносителем», помимо газообразных продуктов деления (ксенона, криптона) и летучих (иода, цезия), в омывающий топливо теплоноситель выходят короткоживущие продукты деления. Далее они вместе с потоком натрия переносятся в район входных окон промежуточных теплообменников, напротив которых за корпусом реактора располагают-

ся ионизационные камеры, регистрирующие нейтронное излучение теплоносителя. При достижении предельно допустимой плотности потока запаздывающих нейтронов и скорости ее роста ССКГО выдает аварийные сигналы в систему управления и защиты.

На основе функции отклика показаний ССКГО обнаруживаются и локализуются в активной зоне ТВС с негерметичными по топливу твэлами. Экспериментальное определение функций отклика показаний ионизационных камер требует дорогостоящих исследований на действующих реакторных установках по специальной методике. В то же время качественное проектирование различных систем, оборудования и элементов конструкций необходимо для надежной работы. Современное состояние средств вычислительной техники и численных методов расчета позволяет использовать для решения данной задачи программы численного моделирования.

С учетом отмеченного разработка методики переноса предшественников запаздывающих нейтронов от ТВС до района мониторинга нейтронного излучения является актуальной задачей. Ее корректное решение требует учета особенностей течения жидкого натрия в реакторах с интегральной компоновкой.

Проектная методика. Для расчета нейтронного излучения и оценки показаний ССКГО предназначен детерминистский транспортный код TORT, являющийся одним из главных составляющих пакета кодов DOORS 3.2a (США). Источником нейтронов в коде TORT являются предшественники запаздывающих нейтронов, пространственное распределение которых определяется описанием их переноса с потоком теплоносителя от ТВС до района регистрации излучения. Блоки детектирования ССКГО размещаются в шахте реактора напротив входных окон промежуточных теплообменников. Поэтому при разгерметизации твэла в ТВС активной зоны нейтронное излучение в каждом блоке будет определяться концентрацией предшественников запаздывающих нейтронов в теплоносителе первого контура. Очевидно, что она зависит от местоположения ТВС с дефектным твэлом. Каждому промежуточному теплообменнику соответствует свой сектор активной зоны.

Таким образом, равновесная активность предшественников запаздывающих нейтронов в

теплоносителе первого контура в районе промежуточного теплообменника, который находится в секторе активной зоны, имеющем ТВС с дефектным твэлом, и вне данного сектора, рассчитывается по формулам [1]

$$A_i = A_{0i} \frac{F_i}{V_{Na}} \left(\frac{C_{1i}}{n_1} + \sum_{j=2}^{N_p} \frac{C_{j,i}}{n_j} \right) C;$$

$$A_i = A_{0i} \frac{F_i}{V_{Na}} \sum_{j=2}^{N_p} \frac{C_{j,i}}{n_j} C,$$

где A_{0i} — активность i -го радионуклида в топливе ТВС, Бк; F_i — выход радионуклида из топлива в теплоноситель за счет кинетической энергии; V_{Na} — объем теплоносителя первого контура в топливной части ТВС, см³; C_{1i} — коэффициент, учитывающий изменение активности радионуклида при первом цикле циркуляции; n_1 — число промежуточных теплообменников, в которые поступает теплоноситель, выходящий из ТВС с дефектным твэлом, при первом цикле циркуляции; N_p — число циклов циркуляции, необходимых для достижения равновесной активности в теплоносителе района промежуточного теплообменника; $C_{j,i}$ — коэффициент, учитывающий изменение активности радионуклида в районе промежуточного теплообменника при втором и последующих циклах циркуляции; n_j — число промежуточных теплообменников, в которые поступает теплоноситель, выходящий из ТВС с дефектным твэлом, при втором и последующих циклах циркуляции; C — коэффициент, учитывающий уменьшение концентрации предшественников запаздывающих нейтронов в результате перемешивания теплоносителя, выходящего из ТВС с дефектным твэлом, с теплоносителем, поступающим на один промежуточный теплообменник. Параметры, входящие в формулы, определяются по следующим выражениям:

$$F_i = \frac{S_d I_i}{4V_T}; \quad C = \frac{G_{TBC}}{G_{ПТО}}; \quad V_{Na} = \frac{G_{TBC} t_0}{\gamma_{Na}},$$

где S_d — эффективная площадь контакта топлива с теплоносителем в твэле ТВС, см²; I_i — длина пробега i -го осколка в топливе, см; V_T — объем топлива в ТВС, см³; G_{TBC} , $G_{ПТО}$ — расход теплоносителя через ТВС и один промежуточный теплообменник соответственно, г/с; γ_{Na} — средняя плотность натрия, г/см³; t_0 — время

прохождения теплоносителя через топливную часть ТВС, с.

Проектная методика имеет существенные ограничения:

1. Из всего многообразия «местоположение ТВС с дефектным твэлом — блок детектирования» выделяются три комбинации. Первая комбинация — ТВС с дефектным твэлом находится в середине сектора, и теплоноситель, выходящий из нее, поступает, в основном, в один промежуточный теплообменник, вторая — ТВС с дефектным твэлом находится на границе секторов, и теплоноситель, выходящий из нее, поступает в два, третья — ТВС с дефектным твэлом находится в центральной части активной зоны реактора, и теплоноситель, выходящий из нее, равномерно распределяется по всем промежуточным теплообменникам;

2. Принимается равномерное перемешивание предшественников запаздывающих нейтронов при первом цикле циркуляции в теплоносителе, поступающем на соответствующие рассматриваемой комбинации промежуточные теплообменники. Район других теплообменников предшественники достигают только при втором и последующих циклах циркуляции, при этом их удельная концентрация в теплоносителе, поступающем на все промежуточные теплообменники, для этих циклов циркуляции одинакова;

3. Время прохождения теплоносителя от ТВС с дефектным твэлом до промежуточного теплообменника принимается на основе упрощенных моделей и не учитывает особенности, связанные, например, с несимметричностью расположения внутриреакторного оборудования, распределения полей температуры.

Таким образом, проектная методика позволяет лишь приближенно оценить чувствительность ССКГО и не решает задачи определения положения ТВС с дефектными твэлами.

Численное моделирование. АО «ОКБМ Африкантов» и ООО «ТЕСИС» в рамках программного комплекса FlowVision создан специальный расчетный модуль FV-BN для решения задачи переноса предшественников запаздывающих нейтронов в теплоносителе первого контура с последующей передачей результатов расчета пространственного распределения их концентрации из FlowVision в TORT для расчета излучения на датчики ССКГО. Совместное ис-

пользование программ FlowVision и TORT позволяет провести численный эксперимент, описывающий отклик показаний ионизационных камер разных секторов реактора на заданную степень повреждения оболочки твэла для конкретного пространственного местоположения ТВС в активной зоне реактора. В программном комплексе FlowVision учитываются особенности течения теплоносителя (натрия) в реакторах с интегральной компоновкой [2]. Описывается течение натрия в рамках модели турбулентного течения несжимаемой жидкости с использованием турбулентного теплопереноса в жидких металлах LMS [3].

Рассматривается установившееся течение теплоносителя в верхней смесительной камере при работе реактора на энергетическом уровне мощности. Распространение предшественников запаздывающих нейтронов, выходящих из ТВС с негерметичными твэлами, описывается изменением их массовой концентрации в смесительной камере со временем. Моделирование выполнено с учетом шести групп изотопов с разным периодом полураспада.

Общее число атомов предшественников запаздывающих нейтронов мало по сравнению с числом атомов натрия. Поскольку они представляют собой небольшую примесь, не влияющую на течение и термодинамику теплоносителя, можно предположить, что их свойства идентичны свойствам натрия. В такой постановке массовая концентрация i -го радиоактивного вещества равна его молярной концентрации C_i .

Модуль FV-BN программного комплекса FlowVision рассчитывает массовую долю изотопов C_i в 7-компонентной смеси, состоящей из жидкого натрия и шести групп изотопов:

$$C_{\text{Na}} + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 = 1.$$

При моделировании предшественников запаздывающих нейтронов в потоке натрия их диффузия не учитывается, так как в быстром реакторе она не оказывает значимого влияния на распределение концентрации примесей.

Изменение концентрации i -го изотопа рассчитывается по формуле

$$\frac{\partial(\rho C_i)}{\partial t} + \nabla(\rho V C_i) = \nabla \left[\left(\frac{\mu}{S_c} + \frac{\mu_i}{S_{c_i}} \right) \nabla C_i \right] - \rho C_i \frac{\ln 2}{T_{1/2}},$$

где ρ — плотность натрия, кг/м³; V — скорость течения натрия, м/с; μ , μ_i — молекулярная и

турбулентная динамическая вязкость соответственно, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$; S_C , S_{C_t} — число Шмидта и турбулентное число Шмидта соответственно.

Задание граничных условий:

в начальный момент ($t = 0$) в объеме реактора $C_i = 0$, $i = 1—6$;

на входе чистого натрия в ТВС $C_i = 0$, $i = 1—6$;

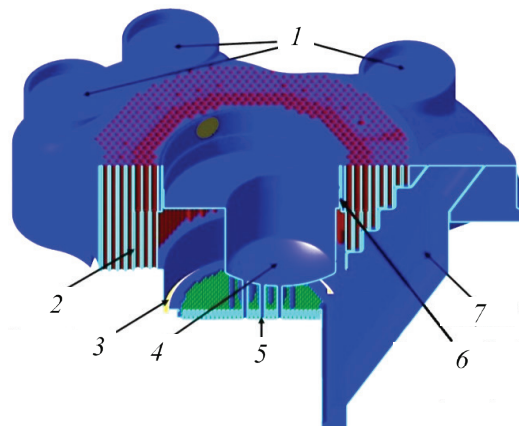
на выходе из ТВС с негерметичным твэлом $C_i = C_{i,0}$, $i = 1—6$, при этом $C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 = 1$.

В такой постановке общая начальная массовая концентрация изотопов искусственно завышается, что необходимо для устойчивого численного интегрирования уравнений массопереноса. Это правомерно в связи с тем, что модельные вещества изотопов идентичны веществу теплоносителя. Концентрация предшественников запаздывающих нейтронов на выходе из ТВС с негерметичным твэлом задается пользователем программы: на выходе $C_i = 0$, $i = 1—6$, на всех остальных границах для концентрации изотопов устанавливается граничное условие «нулевой градиент».

Данные о распределении концентрации предшественников запаздывающих нейтронов и их спектральные характеристики, полученные в программном комплексе FlowVision, передаются в программу TORT по алгоритму, учитывающему специфику пространственных сеток расчетных моделей обеих программ.

Моделирование переноса предшественников запаздывающих нейтронов в теплоносителе первого контура рассматривается в условиях принудительной циркуляции при работе реактора на энергетическом уровне мощности. В частности, рассматривается работа реактора на номинальной мощности, при которой время поступления предшественников запаздывающих нейтронов в область расположения ССКГО наименьшее. Это приводит к более высоким показаниям ССКГО.

Моделирование переноса предшественников запаздывающих нейтронов. Тестирование модуля FV-BN выполнено как на упрощенных расчетных моделях, так и на полномасштабных реакторных задачах (БН-600 и др.). Проиллюстрируем применение разработанной методики на примере расчета переноса предшественников запаздывающих нейтронов при разгерметизации ТВС БН-600 [4].

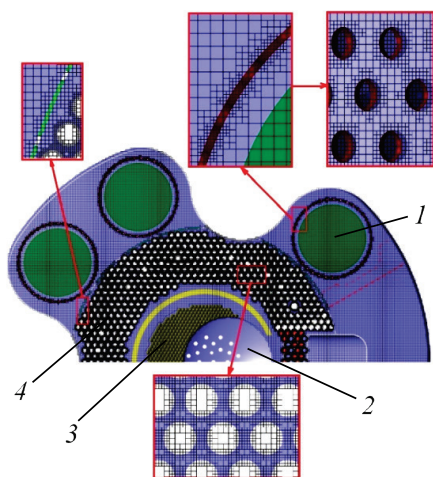


Р и с. 1. Геометрическая модель верхней камеры БН-600: 1 — промежуточный теплообменник; 2 — стержни системы управления и защиты; 3 — кольцевой зазор; 4 — центральная поворотная колонна; 5 — активная зона; 6 — зазор между обечайкой горловины реактора и листами большой поворотной пробки; 7 — элеваторная выгородка

Геометрическая модель проточной части верхней смесительной камеры БН-600 подготовлена с учетом основных конструктивных элементов, в частности, головок ТВС активной зоны и труб внутрикорпусной защиты (рис. 1). Моделирование выполнено для половины проточной части камеры реактора из-за наличия плоскости симметрии.

Расчетная модель для определения полей скоростей, температуры и концентрации предшественников запаздывающих нейтронов построена на неравномерной сетке, позволяющей разрешить течение в основной части конструкции. Для корректного моделирования течения теплоносителя с предшественниками запаздывающих нейтронов в узких каналах расчетная сетка дополнительно локально измельчена (рис. 2). Число расчетных ячеек 53 млн. Исследование проведено с использованием 128 четырехъядерных процессоров.

Для расчета переноса частиц, имитирующих предшественников запаздывающих нейтронов, моделировали разгерметизацию твэла в ТВС с постоянным и импульсным источником. Первый источник характерен для разгерметизации твэла, при которой контакт топлива с теплоносителем сохраняется. Импульсный источник использовали для моделирования относительного изменения показаний ССКГО при разгерметизации твэла в экспериментальной ТВС, облучавшейся в БН-600. Эта разгерметизация характеризовалась кратковременным всплеском показаний ССКГО и, наиболее вероятно, была обусловлена

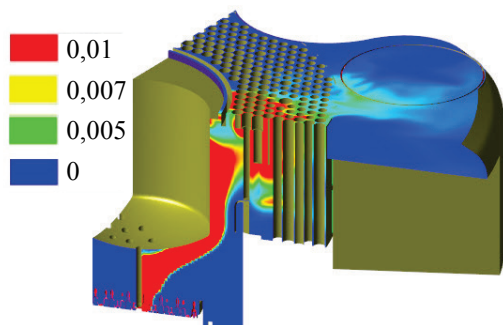


Р и с. 2. Расчетная область с увеличенными фрагментами вблизи входных окон промежуточного теплообменника, отверстий в его опоре и стержней системы управления и защиты: 1 — промежуточный теплообменник; 2 — центральная поворотная колонна; 3 — активная зона; 4 — стержни системы управления и защиты

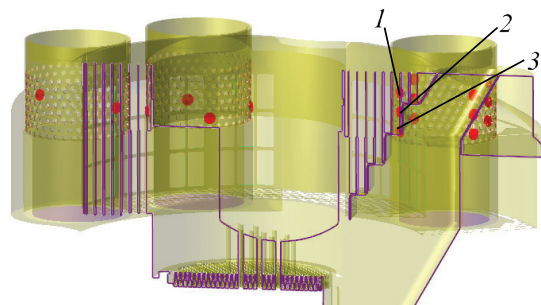
особенностями топлива экспериментальной ТВС. Длительность поступления предшественников запаздывающих нейтронов в теплоноситель при моделировании импульсного источника была принята равной 0,1 с. В качестве источника задана определенная концентрация предшественников запаздывающих нейтронов в месте входа в головку негерметичной ТВС (рис. 3).

Определена зависимость изменения со временем суммарной концентрации предшественников запаздывающих нейтронов, выходящих из негерметичной ТВС, в зонах установки условных датчиков (рис. 4). На рис. 5 видно, что время реакции системы ССКГО на разгерметизацию составляет 5—10 с.

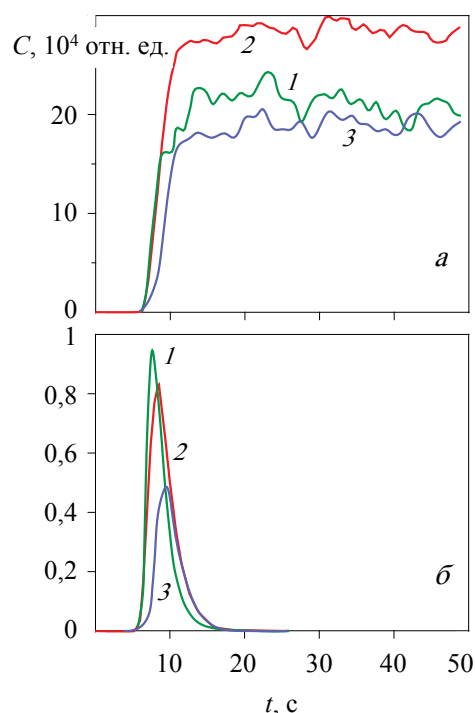
Результаты расчета концентрации предшественников запаздывающих нейтронов из FlowVision в программу TORT передавались для xyz- и rθz-моделей TORT первого контура



Р и с. 3. Распределение концентрации предшественников запаздывающих нейтронов в камере реактора



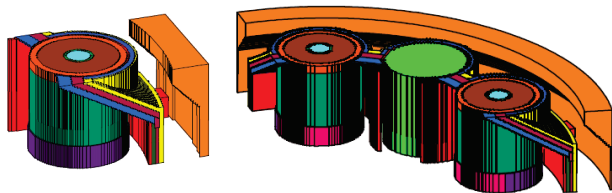
Р и с. 4. Расположение условных 1, 2, 3 датчиков для измерения концентрации предшественников запаздывающих нейтронов



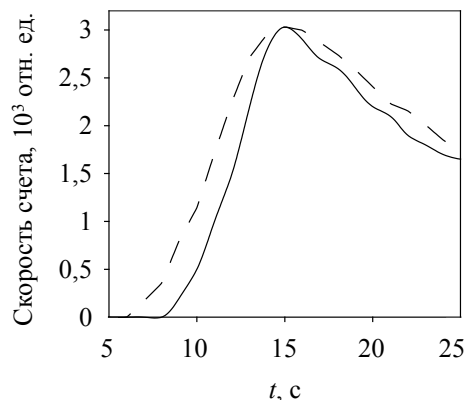
Р и с. 5. Изменение во времени суммарной концентрации предшественников запаздывающих нейтронов с постоянным (а) и импульсным источником (б) для условных датчиков 1, 2, 3

(рис. 6). На базе полученного распределения концентрации предшественников запаздывающих нейтронов в теплоносителе первого контура с импульсным источником с помощью кода TORT была рассчитана плотность потока нейтронов в воздушной полости блока детектирования ССКГО. В расчетах принималось, что показания счетчиков прямо пропорциональны плотности эквивалентного потока тепловых нейтронов.

Сравнение усредненных экспериментальных показаний ССКГО с расчетами с помощью кода TORT при импульсной разгерметизации твэла в ТВС показало их удовлетворительное согласие (рис. 7). Расхождения в ширине ампли-



Р и с. 6. Общий вид xz - и $r\theta z$ -модели TORT первого контура



Р и с. 7. Измеренная (---) и расчетная скорость (—) счета в блоке детектирования ССКГО БН-600

туды импульса, по всей видимости, обусловлены неопределенностями в длительности выхода предшественников запаздывающих нейтронов в теплоноситель. На основании этих данных с учетом неопределенностей и погрешности расчета скорости теплоносителя не более 4% можно сделать вывод о корректности расчета с помощью программ FlowVision и TORT.

Верификация методики численного моделирования переноса предшественников запаздывающих нейтронов. Полномасштабную верификацию совместного использования программ FlowVision и TORT планируется осуществить на основе экспериментальной калибровки ССКГО БН-800 с помощью метрологической сборки, моделирующей негерметичную ТВС. Сборка содержит метрологические элементы на основе уран-никелевого сплава с известной скоростью генерации продуктов деления с последующим их выходом в омывающий теплоноситель. Расход натрия близок к расходу через штатные ТВС, что позволяет воспроизвести течение струй натрия из штатных ТВС. Для калибровки системы ССКГО метрологическую ТВС планируется последовательно устанавливать в некоторые характерные ячейки активной зоны для облучения и получения показаний измерительных каналов ССКГО.

Заключение. Разработанная методика численного моделирования переноса предшественников запаздывающих нейтронов в быстром реакторе позволяет учесть особенности течения жидкометаллического теплоносителя. Совместное использование программ FlowVision и TORT (модуль FV-BN) позволяет проводить:

расчет и анализ перемешивания разнотемпературных потоков в первом контуре реактора;

расчет и анализ переноса предшественников запаздывающих нейтронов, выходящих из ТВС с негерметичными твэлами, с учетом их радиоактивного распада, определять время доставки предшественников запаздывающих нейтронов до входных окон промежуточных теплообменников и их концентрацию в теплоносителе;

передачу файлов с данными о концентрации предшественников запаздывающих нейтронов из FlowVision в программу TORT для последующего моделирования пространственного распределения источников запаздывающих нейтронов и расчета их излучения.

На основе расчетного анализа переноса предшественников запаздывающих нейтронов при разгерметизации твэла БН-600 показана корректность моделирования в программном комплексе FlowVision.

Экспериментальные исследования позволяют получить данные ССКГО для верификации собственно FlowVision и TORT, а также данные о течении теплоносителя в верхней камере реактора, которые могут быть использованы для верификации других CFD-кодов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Olander D. Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements. Department of Nuclear Engineering University of California, Berkley, 1976, с. 299—300.
2. Рогожкин С.А., Осипов С.Л., Фадеев И.Д. и др. Численное моделирование теплогидравлических процессов в верхней камере быстрого реактора. — Атомная энергия, 2013, т. 115, вып. 5, с. 295—298.
3. Рогожкин С.А., Аксенов А.А., Жлуктов С.В. и др. Разработка модели турбулентного теплопереноса для жидкометаллического натриевого теплоносителя и ее верификация. — Вычислительная механика сплошных сред, 2014, т. 7, № 3, с. 306—316.
4. Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Салеев А.В. и др. Применение кода FlowVision для моделирования транспорта предшественников запаздывающих нейтронов в реакторах на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. — В сб.: Научно-технич. сем. «Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике», Нижний Новгород, 19—20 сентября, 2012, с. 893—901.

Поступила в Редакцию 22.10.19