

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Экспериментальная физика реакторов. Учебное пос. М.: Энергоатомиздат, 1994.
2. Типовые программы и методики проведения физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. РД ЭО 0150—2004. М., Росэнергоатом, 2005.
3. Номенклатура эксплуатационных нейтронно-физических расчетов и измерений для топливных загрузок ВВЭР-1000. Требования. РД ЭО 1.1.2.25.05.01—2015. М., Росэнергоатом, 2015.
4. Положение о рекомендациях по сопоставлению рассчитанной и измеренной реактивности при обосновании ядерной безопасности реакторных установок с ВВЭР. РБ-074—12. М., Росэнергоатом, 2012.
5. Куликов В.И., Жылмаганбетов Н.М., Попыкин А.И., Смирнова А.А. Использование решений сопряженных задач для расчета и расчетного моделирования измерений больших реактивностей. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 1, с. 4—20.
6. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций НП-001—15. М., Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2015.
7. Куликов В.И., Куракин К.Ю., Семенова Т.В. и др. Расчетное моделирование измерений на этапе физического пуска энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 1, с. 55—60.
8. Куликов В.И., Жылмаганбетов Н.М., Попыкин А.И., и др. Сравнение результатов расчетного моделирования измерений эффективности аварийной защиты и измерений, проведенных на этапе физических пусков энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2 и энергоблока № 1 Ленинградской АЭС-2. — Там же. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2020, вып. 3, с. 80—87.
9. Терешонок В.А., Кряквин Л.В., Питилимов В.А. и др. Сопоставление измеренного и рассчитанного токов ионизационной камеры при измерении эффективности аварийной защиты на этапе физпуска энергоблока № 3 Калининской АЭС. — Там же. Сер. Физика ядерных реакторов, 2010, вып. 3, с. 37—42.
10. Куликов В.И., Семенова Т.В., Жылмаганбетов Н.М., и др. Сравнение коэффициентов влияния для расчетов токов ионизационных камер для реактора РУ В-392-М (ВВЭР-1200), рассчитанных различными способами. — Там же. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2019, вып. 2, с. 234—242.
11. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ ПРОКЕР (версия 3.1) № 467 от 30.05.2019. М., ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2019.
12. Кавун О.Ю., Таранов Г.С. Программный комплекс РАДУГА с трехмерной двухгрупповой моделью активной зоны, моделирующий динамические процессы в РУ ВВЭР, и результаты верификации нейтронно-физического модуля. — В сб.: Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов (Нейтроника-95). 24—26 октября 1995 г. Обнинск, 1997, с. 41—47.
13. Жылмаганбетов Н.М., Попыкин А.И., Смирнова А.А. О требованиях и рекомендациях регулирующего органа к определению погрешности нейтронно-физического расчета. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2019, вып. 2, с. 127—135.
14. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ NOSTRA-EXP (версия 2.0) от 06.04.2021 № 502. М., ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2021.
15. Пинегин А.А., Шумский Б.Е. Экспериментальные погрешности и возможность их компенсации при определении эффективности аварийной защиты и дифференциальной эффективности группы ОР СУЗ в реакторе ВВЭР-1000. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2007, вып. 1, с. 76—89.
16. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ WCR (программное обеспечение реактиметра реактора БН-600) № 305 от 02.04.2012. М., ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2012.
17. Казанский Ю.А., Матвеев И.П., Тютюнников П.Л., Шокодько А.Г. К учету пространственных эффектов при измерении реактивности методом обращенного уравнения кинетики. — Атомная энергия, 1981, т. 51, вып. 6 с. 387—389.

Поступила в Редакцию 18.05.22

УДК 621.039.51

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФУНКЦИИ ЦЕННОСТИ НЕЙТРОНОВ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЛИ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ И ВРЕМЕНИ ГЕНЕРАЦИИ МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ПО ПРОГРАММЕ MCSU

Гуревич М.И., Дайченкова Ю.С., Калугин М.А., Олейник Д.С., Шкаровский Д.А.

(НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

e-mail: daychenkova_ys@nrcki.ru

Программы метода Монте-Карло все чаще используются для нейтронно-физических расче-

тов ядерных реакторов, так как позволяют определять нейтронно-физические характеристики

реактора без использования приближений в ядерных данных и геометрии рассчитываемых систем. С развитием параллельных вычислений трудоемкость расчетов сократилась во много раз. Так, программа MCU обеспечивает близкую к единице эффективность параллельных вычислений при расчете на тысяче и более вычислительных ядер [1].

В кинетике реакторов эффективная доля запаздывающих нейтронов является базовой величиной, поскольку служит единицей измерения реактивности. Параметры — эффективная доля запаздывающих $\beta_{\text{эф}}$ и время генерации мгновенных нейтронов Λ входят в качестве коэффициентов в уравнения нейтронной кинетики [2]. Экспериментальное определение $\beta_{\text{эф}}$ является сложной задачей, поэтому на стадии проектирования конкретного реактора $\beta_{\text{эф}}$ определяется расчетным путем. При расчете $\beta_{\text{эф}}$ скорость генерации запаздывающих нейтронов взвешивается по сопряженной функции (функции ценности), следовательно, необходимо рассчитывать сопряженную функцию [2].

В настоящей работе изложены исследования влияния учета пространственного распределения функции ценности на параметры нейтронной кинетики в сравнении с приближением, в котором предполагается, что функция ценности является константой. Вычисления проведены согласно методике, реализованной в программе MCU [3] с поточечным представлением сечений взаимодействия нейтронов с ядрами среды во всей области энергии по данным библиотеки РОСФОНД [3, 4]. Результаты сравнены с экспериментальными данными из сборника ICSBER.

Расчет параметров кинетики. Методика расчета $\beta_{\text{эф}}$ и Λ с использованием сопряженной функции изложена в работе [3]. Расчет проводится в два этапа. На первом этапе вычисляется сопряженная функция, на втором $\beta_{\text{эф}}$ и Λ с использованием сопряженной функции, полученной на первом этапе. Метод расчета сопряженной функции основан на использовании матрицы делений [5, 6]. Совокупность точек в фазовом пространстве, показывающих содержание топлива, делится на некоторое число зон. Тогда уравнение критичности можно представить в виде

$$k_{\text{эф}} \psi = T\psi,$$

где $k_{\text{эф}}$ — эффективный коэффициент размножения; ψ — вектор, i -й компонент которого соответствует скорости реакции генерации нейтронов в i -й зоне; T — матрица, в которой T_{ij} — среднее число нейтронов, родившихся в зоне j при условии, что реакцию деления вызвал нейтрон, родившийся в зоне i .

В данном случае сопряженное уравнение будет иметь следующий вид:

$$k_{\text{эф}} \psi^+ = T^T \psi^+,$$

где T^T — транспонированная матрица, имеющая смысл сопряженного оператора; ψ^+ — сопряженная функция (дискретная функция ценности).

Матричные элементы вычисляются методом Монте-Карло при моделировании переноса нейтронов — расчетная модель разбивается на конечное число регистрационных объектов (совокупность точек в фазовом пространстве), в которых регистрируются искомые функции, главная сопряженная функция вычисляется методом простых итераций. Точность расчета сопряженной функции указанным методом зависит от детальности разбиения, которое можно бесконечно увеличивать, но при этом будет возрастать нагрузка на вычислительные ресурсы.

После расчета сопряженной функции на втором этапе рассчитываются параметры Λ и $\beta_{\text{эф}}$:

$$\Lambda = (\psi^+, \tau T \psi) / (\psi^+, T \psi);$$

$$\beta_{\text{эф}} = (\psi^+, B \psi) / (\psi^+, T \psi),$$

где τ — время жизни нейтрона; B — оператор генерации запаздывающих нейтронов.

Рассчитываемые системы. Для исследования влияния учета функции ценности на точность расчета эффективной доли запаздывающих и времени генерации мгновенных нейтронов по MCU были рассчитаны 19 экспериментов из сборника ICSBER [7—13]. Для некоторых экспериментов в качестве результата приведен параметр α , определяемый как

$$\alpha = -\beta_{\text{эф}} / \Lambda.$$

Обзор литературы по экспериментальному определению параметров нейтронной кинетики приведен в работе [14].

По программе MCU были рассчитаны параметры нейтронной кинетики для следующих экспериментов:

сфера из металлического урана (94% ^{235}U) HMF001 [7];

сфера из металлического плутония (95% ^{239}Pu) PMF001 [7];

сфера из металлического ^{233}U (98% ^{233}U) U3MF001 [7];

сфера из металлического урана (93% ^{235}U) с отражателем из природного урана HMF028 [7];

сфера из металлического плутония (94% ^{239}Pu) с отражателем из природного урана PMF006 [7];

сфера из металлического ^{233}U (98% ^{233}U) с отражателем из природного урана U3MF006 [7];

критические сборки цилиндрической формы со средним обогащением 53, 37,5, 16, 10 % ^{235}U соответственно, набранные из урановых пластин (пластины из высокообогащенного урана чередуются с пластинами из природного урана) IMF001-2, IMF001-4, IMF002, IMF007 [7, 8];

эксперименты на критической сборке STACY с водным раствором уранил-нитрата (обогащение 10% по ^{235}U) LST004, LST007, LST016, LST021];

критическая сборка TCA (решетка стержней из низкообогащенного урана с водным замедлителем) LCT006m;

критическая сборка SHEBA с водным раствором UO_2F_2 (обогащение 5% по ^{235}U) LST001;

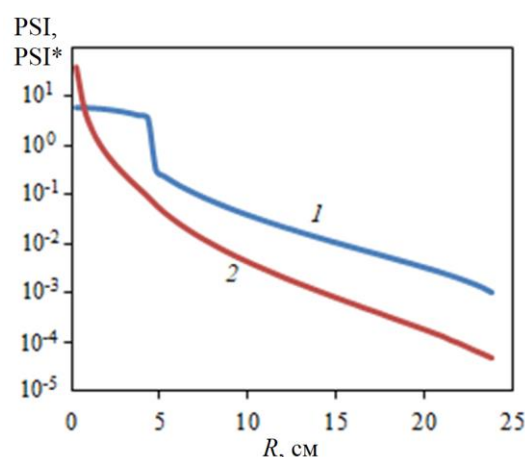
критическая сборка WINCO с водным раствором UO_2F_2 (обогащение 93% по ^{235}U) HST038 [7—12].

Результаты расчетов. Отношение расчетных значений (P) к экспериментальным (Θ) приведено в таблице. Результаты расчетов по MCU с учетом функции ценности отмечены индексом *adj*. Измеренные значения $\beta_{\text{эф}}$ для бенчмарк-экспериментов IMF001, IMF002 и IMF007 оценены расчетным путем [7, 8], погрешность экспериментального значения Λ вычислялась по формуле

$$(\sigma_{\Lambda} / \Lambda)^2 = (\sigma_{\beta} / \beta)^2 + (\sigma_{\alpha} / \alpha)^2.$$

Статистическая погрешность расчетов по MCU кинетических параметров составила менее 0,1%.

Для анализа результатов рассмотрим зависимость скорости генерации нейтронов и сопряженной к ней функции от радиуса для варианта PMF006. На рис. 1 видно, что функция ценности по мере удаления от центра системы спадает существенно быстрее, так как ψ — источник нейтронов деления в радиальной зоне (PSI), функция ценности — число нейтронов от делений, вызванных этим источником (PSI*). Такое отличие приводит к значительной погрешности расчета для времени генерации мгновенных нейтронов: расчет без учета функции ценности завышает время генерации на 20% по сравнению с экспериментом, с учетом функции ценности нейтронов — почти совпадает с экспериментом (см. таблицу).

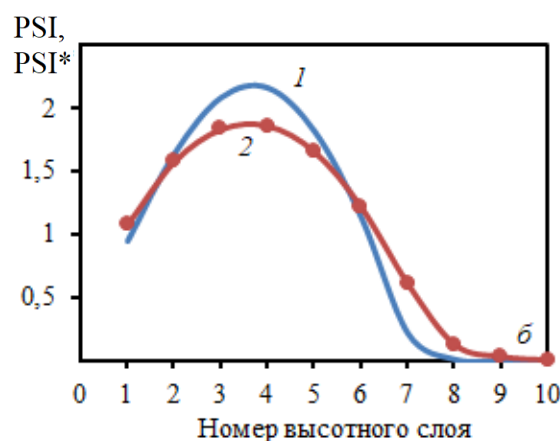
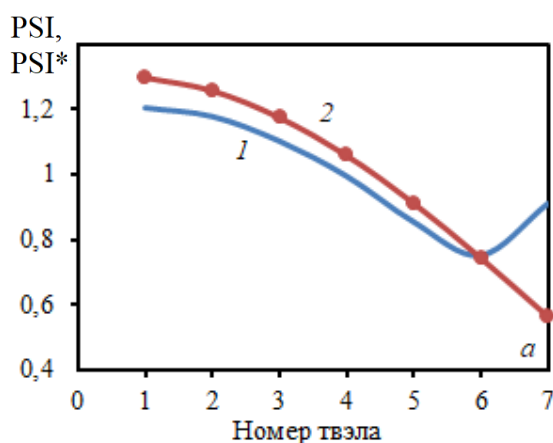


Р и с. 1. Источник делений PSI (1) и функция ценности PSI* (2) в зависимости от радиуса для эксперимента PMF006

Рассмотрим зависимость скорости генерации нейтронов и сопряженной функции от радиуса и высоты для эксперимента LCT006m. На рис. 2 использованы функции, которые вычислены для твэлов, расположенных на главной диагонали системы. Нумерация твэлов, для которых выполнялись вычисления, показана на рис. 3. Топливный столб во всех твэлах системы разбит на 10 высотных слоев (слой 1 — нижний).

Сравнение расчетных и экспериментальных данных

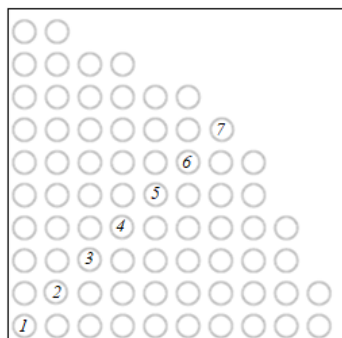
Эксперимент	$\beta_{\text{эф}}$			Λ			$-\alpha$		
	$\Xi, 10^{-5}$	P/Ξ	P_{adj}/Ξ	$\Xi, 10^{-9} \text{ с}$	P/Ξ	P_{adj}/Ξ	$\Xi, \text{ с}^{-1}$	P/Ξ	P_{adj}/Ξ
HMF001	645±13	0,98	0,99	5,8±0,16	0,99	0,99	(1,11±0,02)10 ⁶	0,99	1,0
PMF001	190±4	0,99	1,0	3,0±0,08	0,96	0,94	(0,64±0,01)10 ⁶	1,03	1,05
U3MF001	289±7	1,0	1,01	2,9±0,08	1,0	0,98	(1,00±0,01)10 ⁶	1,0	1,02
HMF028	665±13	0,93	1,03	17,5±0,57	1,08	1,01	(0,38±0,01)10 ⁶	0,86	1,02
PMF006	276±7	0,97	1,04	12,9±0,44	1,20	1,01	(0,214±0,005)10 ⁶	0,81	1,03
U3MF006	360±9	0,95	1,04	13,5±0,42	1,12	0,95	(0,267±0,005)10 ⁶	0,84	1,09
IMF001-2	700±14	0,98	0,99	11,0±0,28	1,01	1,01	(0,63±0,01)10 ⁶	0,98	0,99
IMF001-4	730±15	0,97	0,98	16,0±0,47	0,96	0,97	(0,46±0,01)10 ⁶	1,0	1,0
IMF002	750±15	0,96	0,99	43,0±2,37	0,97	0,97	(0,175±0,009)10 ⁶	0,99	1,02
IMF007	720±6	0,98	1,0	61,5±0,74	1,0	1,02	(0,117±0,001)10 ⁶	0,98	0,99
LCT006m	771±17	1,01	1,02	(3,84±0,10)10 ⁴	1,11	1,0	201±3	0,92	1,02
LST004-029	—	—	—	—	—	—	122,7±4,1	0,98	1,01
LST004-033	—	—	—	—	—	—	116,7±3,9	0,98	1,01
LST004-046	—	—	—	—	—	—	106,2±3,7	0,99	1,01
LST007-030	—	—	—	—	—	—	126,8±2,9	1,01	1,01
LST016-125	—	—	—	—	—	—	152,8±2,6	1,01	1,01
LST021-215	—	—	—	—	—	—	109,2±1,8	0,96	0,98
LST001	—	—	—	—	—	—	195,8±3,6	0,98	0,98
HST038	—	—	—	—	—	—	1109,3±0,3	1,02	1,01
Среднее значение	—	0,97	1,01	—	1,04	0,99	—	0,96	1,01
Среднеквадратичное отклонение	—	0,02	0,02	—	0,08	0,03	—	0,06	0,03



Р и с. 2. Источник делений PSI (1) и функция ценности PSI* (2) в зависимости от радиуса (а) и высоты (б) для эксперимента LCT006m

В твэле № 7, который граничит с массивным водяным отражателем, скорость генерации нейтронов претерпевает всплеск источника

нейтронов деления, вызванный увеличением водно-уранового отношения вблизи отражателя. Характер зависимости от радиуса сопряженной



Р и с. 3. Картограмма расположения твэлов в сборке LCT-006m с углом симметрии 90°

функции, напротив, имеет монотонный характер. Такое отличие приводит к тому, что расчет без учета функции ценности завышает время генерации Λ на 11% по сравнению с экспериментом, с учетом функции ценности совпадает с экспериментом (см. таблицу).

Следует отметить, что различие в пространственном поведении распределения скорости генерации нейтронов и сопряженной функции оказывает слабое влияние на точность расчета $\beta_{\text{эф}}$. Это объясняется тем, что эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эф}}$ определяется через β_0 — долю запаздывающих нейтронов, рождающихся при делении ядра. Значения β_0 измерены почти для всех делящихся изотопов и содержатся в библиотеках ядерных данных. Отличие этих двух величин, в свою очередь, определяется разницей в энергии рождения мгновенных и запаздывающих нейтронов, что моделируется в программе MCU напрямую. В библиотеке для делящихся изотопов имеются данные об энергетических спектрах как мгновенных, так и запаздывающих нейтронов.

Для тепловых реакторов $\beta_{\text{эф}}/\beta_0 \sim 1,2$ [15]. Поскольку средняя энергия мгновенных нейтронов составляет 2, запаздывающих $\sim 0,5$ МэВ, то для замедления до тепловой энергии запаздывающему нейтрону необходимо испытать меньше столкновений, чем мгновенному.

Иная ситуация наблюдается для реакторов с быстрым спектром нейтронов, в топливе которых имеется значительное количество четных изотопов. Эти изотопы имеют пороговое сечение деления. Например, сечение деления ядра ^{238}U нейтронами энергией менее 1 МэВ почти равно нулю. Поэтому в быстрых реакторах $\beta_{\text{эф}}/\beta_0 \sim 0,8$.

Таким образом, на основе анализа можно сделать следующие выводы:

при расчете доли запаздывающих и времени генерации мгновенных нейтронов с учетом функции ценности полученные результаты близки к экспериментальным, особенно для водных систем с тепловым спектром нейтронов (LCT, LST, HST), для которых $\langle \alpha_p/\alpha_s \rangle = 1,005 \pm \pm 0,015$;

расчет с учетом функции ценности согласуется с экспериментом даже для сильно неоднородных систем;

расчеты по программе MCU с использованием стандартной опции без учета функции ценности дают приемлемые результаты ($\langle \beta_p/\beta_s \rangle = 0,97 \pm 0,02$), поскольку экспериментальная погрешность определения $\beta_{\text{эф}}$ составляет $\sim 2,5\%$;

учет функции ценности существенно уточняет расчет времени генерации мгновенных нейтронов, особенно для сильно неоднородных систем: максимальное уточнение 17% наблюдается для варианта PMF006, средняя погрешность расчета уменьшается с 8 до 3% ($\langle \Lambda_p/\Lambda_s \rangle = 0,99 \pm 0,03$).

Заключение. В настоящей работе исследовано влияние функции ценности нейтронов на точность расчета эффективной доли запаздывающих $\beta_{\text{эф}}$ и времени генерации мгновенных нейтронов Λ . Выполнены расчеты 19 критических экспериментов из сборника ICSBER.

Анализ показал, что учет функции ценности уточняет расчет параметров нейтронной кинетики. Погрешность расчета эффективной доли запаздывающих $\beta_{\text{эф}}$ и времени генерации мгновенных нейтронов Λ с учетом функции ценности почти совпадает с экспериментальной погрешностью измерения этих величин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A. Overview of the MCU Monte Carlo software package. — Ann. Nucl. Energy, 2015, v.82, p. 54—62.
2. Кипин Дж. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1967. 428 с
3. Gurevich M.I., Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A. Estimation of some neutron physics characteristics by Monte Carlo method using the importance function. — Ann. Nucl. Energy, 2019, v. 130, p. 388—393.
4. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кошечев В.Н. и др. РОСФОНД — российская национальная библиотека

- нейтронных данных. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 2007, вып.1—2, с. 3—21.
5. **Oleynik D.S.** Monte Carlo calculation of weakly coupled systems. — Atomic Energy, 2005, v. 99, №4, p. 694—701.
 6. **Brown F., Carney S., Kiedrowski B., Martin W.** Fission matrix capability for MCNP. Part I. Theory. — Intern. Conf.: Math. & Comp. Appl. Sci. Engng, 2013, p. 15—20.
 7. **Paxton H.** Fast critical experiments. — Progress Nucl. Energy, 1981, v. 7, p. 151—174.
 8. **Hansen G., Paxton H.** A critical assembly of uranium enriched to 10% in Uranium-235. — Nucl. Sci. Engng, 1979, v. 72, № 2, p. 230—236.
 9. **Tonoike K., Miyoshi Y., Kikuchi T., Yamamoto T.** Kinetic parameter β_{eff}/ℓ measurement on low enriched uranyl nitrate solution with single unit cores (600 ϕ , 280 T, 800 ϕ) of STACY. — J. Nucl. Sci. Technol., 2002, v. 39, № 11, p. 1227—1236.
 10. **Nakajima K.** Re-evaluation of the effective delayed neutron fraction measured by the substitution technique for a light water moderated low-enriched uranium core. — Ibid., 2001, v. 38, № 12, p. 1120—1125.
 11. **Sanchez R., Jaegers P.** Prompt neutron decay constants in SHEBA. — Trans. Am. Nucl. Soc., 1997, v. 76, p. 363—364.
 12. **Spriggs G.** A measurement of the effective delayed neutron fraction of the Westinghouse Idaho nuclear company Slab tank assembly using Rossi- α techniques. — Nucl. Sci. Engng, 1993, v. 115, p. 76—80.
 13. **International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments.** NEA/NSC/DOC(95)03. Nuclear Energy Agency, 2002.
 14. **Meulekamp R., Marck S.** Calculating the effective delayed neutron fraction with Monte Carlo. — Nucl. Sci. Engng, 2006, v. 152, p. 142—148.
 15. **Белл Д., Глестон С.** Теория ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974. 494 с.

Поступила в Редакцию 11.05.21

УДК 621.039.51+621.039.514+621.039.51...17

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС MCU—RELAP ДЛЯ АНАЛИЗА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ И АВАРИЙ В РЕАКТОРЕ ПИК

*Апресов А.А., Дегтярев А.М., Калугин М.А., Кузнецов А.Н., Мясников А.А., Пылев С.С.,
Шкаровский Д.А. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)
e-mail: degtyarev_am@nrcki.ru*

Расчет переходных процессов в реакторе ПИК при проектных и запроектных авариях является одним из этапов обоснования безопасности [1]. Реактор характеризуется сложной геометрической структурой со значительной пространственной зависимостью спектра нейтронов, что требует корректного описания поля энерговыделения. Высокая средняя энергонапряженность активной зоны ~ 2 МВт/л предъявляет повышенные требования к точности расчетного моделирования. Вместе с тем малый объем активной зоны ~ 50 л обуславливает умеренное проявление пространственных эффектов в переходных режимах. В этих условиях для моделирования переходных режимов был разработан программный комплекс MCU—RELAP, основанный на адиабатическом приближении нейтронной кинетики.

Расчет изменения мощности реактора в обшечонтурной теплогидравлической программе RELAP5/MOD3.2 основан на модели точечной кинетики, которая не позволяет учесть изменение формы поля энерговыделения [2]. Метод

Монте-Карло, реализованный в программе MCU, позволяет повысить точность моделирования переходных процессов, уточняя поле энерговыделения и реактивность системы, рассчитанные по программе RELAP5/MOD3.2 [3].

С помощью программы RELAP5/MOD3.2 рассчитываются положение стержней регулирования и пространственное распределение температуры топлива, температуры и плотности теплоносителя. Полученные значения используются при расчете по программе MCU реактивности и энерговыделения, которые затем передаются в программу RELAP5/MOD3.2 для продолжения счета.

Одной из основных проблем взаимосвязанных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов является согласование разных подходов к созданию моделей. При объединении MCU и RELAP5/MOD3.2 в единый программный комплекс использовалось согласованное описание реактора ПИК отдельно для каждого кода с обменом данными с помощью задаваемых таблиц соответствия. Для MCU задается