

УДК 621.039.51

# КОД КИР-ТГ ДЛЯ ТЕСТОВОГО ВЗАИМОСВЯЗАННОГО ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО И НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОГО РАСЧЕТА РЕАКТОРА ТИПА ВВЭР-СКД

Белоусов В.И., Давиденко В.Д., Дьячков И.И., Елкин Н.Н., Малков М.Р., Иоаннисиан М.В.,  
Чернецкий М.Г., Черницкая А.А. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),  
Зборовский В.Г., Лиханский В.В., Хоружий О.В. (НИЦ «Курчатовский ин-т»,  
Физический ин-т РАН, г. Москва)  
e-mail: chernitskaya\_aa@nrcki.ru

Программный комплекс КИР-ТГ предназначен для взаимосвязанного расчета параметров теплогидравлики и нейтронной физики и состоит из теплогидравлической программы ТК-СКД [1] и нейтронно-физического кода КИР [2—5]. Связь между программами осуществляется с помощью динамических языков программирования Python и Lua. Программа КИР позволяет находить прецизионное решение на одно- и многоядерных компьютерах стационарного и нестационарного уравнения переноса нейтронов с учетом запаздывающих нейтронов аналоговым методом Монте-Карло [6]. История нейтрона моделируется на основе оцененных ядерных данных в системах с трехмерной геометрией в однородной и неоднородной среде.

Основные прикладные задачи комплекса следующие:

- вычисление эффективного коэффициента размножения нейтронов, распределения энерговыделения и скорости генерации нейтронов деления, скорости реакций;

- расчет эффектов и коэффициентов реактивности;

- моделирование переходных процессов при нормальной эксплуатации и в аварийных режимах работы реактора.

Программа ТК-СКД предназначена для расчета теплофизических параметров твэла и охлаждающего его теплоносителя сверхкритического давления. Теплогидравлический модуль в составе программы решает в стационарном одноканальном приближении уравнения баланса массы, импульса, энергии и определяет скорость, давление и температуру теплоносителя. Твэльный модуль решает стационарную задачу теплопроводности в  $R$ — $Z$ -геометрии. Модули сопрягаются по условиям теплоотдачи на границе. Программа ТК-СКД позволяет задавать различные корреляции для коэффициентов теплоотдачи, для валидации использовались зависимости для воды сверхкритического давле-

ния [7]. К основным прикладным задачам программы относится моделирование экспериментов теплоотдачи, валидация замыкающих соотношений и сопряжение с нейтронно-физическими кодами.

**Расчетная система программного комплекса КИР-ТГ.** В настоящей статье представлена система расчетов высотного профиля температуры и плотности теплоносителя (воды), энерговыделения и температуры топлива. В расчетной системе учитывается зависимость нейтронного поля от локальной плотности и температуры теплоносителя, оболочки и топлива. На распределение мощности влияет нейтронное поле, которое, в свою очередь, зависит от плотности теплоносителя. Расчетный итерационный процесс задан увеличением мощности в диапазоне 0—50 кВт/м с шагом 1 кВт/м и вычислением на каждом шаге теплогидравлических и нейтронно-физических параметров. При этом данные о мощности передаются из нейтронно-физического расчета на следующий шаг теплогидравлического расчета. Соответственно нейтронно-физический расчет проводится с распределенной температурой топлива и теплоносителя. В начале процесса энерговыделение задано константой. Расчет на нулевом уровне мощности служит для определения начальных теплофизических параметров теплоносителя.

Расчетная модель задана бесконечной по радиусу решеткой твэлов с водным теплоносителем, имеющим следующие геометрические характеристики:

|                                                        |                               |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Высота моделируемого топливно-сердечника, см . . .     | 100, 250, 400                 |
| Толщина оболочки, мм . . .                             | 0,65                          |
| Шаг расстановки твэлов в шестигранной модели, мм . . . | 12,75                         |
| Граничное условие шестигранной модели . . .            | Трансляционная инвариантность |

Торцевые отражатели . . . 10-метровые слои теплоносителя с соответствующей температурой на входе (снизу) и выходе (сверху)

Обогащение урана 2,15% для твэла высотой 100 см, 1,92% — 250 и 400 см подбиралось таким образом, чтобы система при нулевой мощности была критической. Выгорание не учитывается.

Концентрация ядер нуклидов топлива приведена в табл. 1. В теплоносителе содержится раствор бора ( $^{10}\text{B}$ ) с концентрацией атомов  $4,7 \cdot 10^{-4}$  на одну молекулу воды. Для учета распределения температуры топлива и теплоносителя модель для нейтронно-физического расчета была разбита на 40 равнообъемных слоев по высоте. В модели теплогидравлической программы заданы геометрические параметры, аналогичные нейтронно-физическим. Граничные условия: температура теплоносителя на входе  $300^\circ\text{C}$ , давление на входе 25 МПа, скорость 1 м/с, что соответствует расходу  $743 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Аналогично нейтронно-физическому расчету число высотных геометрических зон составило 100, 250 и 400 в зависимости от высоты топливного столба, так чтобы высота одной зоны модели твэла составляла 1 см. Твэл был разбит на радиальные ячейки: 20 на топливную таблетку, 1 на зазор, 5 на оболочку. Теплоноситель моделировался в одноканальном приближении.

Т а б л и ц а 1. Концентрация ядер нуклидов топлива,  $10^{24} \text{ см}^{-3}$

| Нуклид                       | Высота твэла, см |          |
|------------------------------|------------------|----------|
|                              | 100              | 250, 400 |
| $^{235}\text{U}$ , $10^{-4}$ | 4,99             | 4,45     |
| $^{238}\text{U}$ , $10^{-2}$ | 2,27             | 2,27     |
| $^{16}\text{O}$ , $10^{-2}$  | 4,64             | 4,64     |

В расчете с распределенной температурой поле температуры нейтронно-физической программы изменяется в соответствии с результатами расчета теплогидравлической программы. Алгоритм моделирования расчета представляет собой последовательность из четырех действий:

расчет энерговыделения по программе КИР при теплогидравлических параметрах нулевой мощности: начальная температура теплоносителя

и топлива  $300^\circ\text{C}$ , постоянная плотность воды, равная начальной плотности  $743 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

в начале итерации по полученным данным из первого действия по программе ТК-СКД рассчитываются новые значения плотности воды, температуры теплоносителя и топлива при заданной новой мощности;

в продолжение итерации рассчитывается энерговыделение с распределенной температурой по программе КИР с использованием данных, поступающих из теплогидравлической программы (второе действие): плотность воды, температура топлива и теплоносителя;

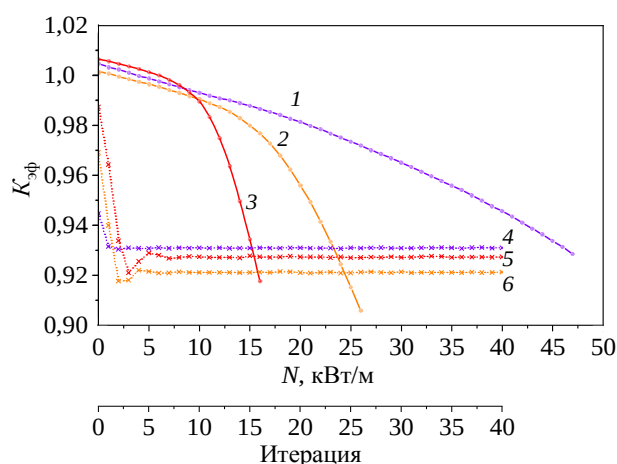
по окончании итерации проводится увеличение мощности на  $1 \text{ кВт}/\text{м}$ , и при условии, что полученная мощность не превышает максимальную  $50 \text{ кВт}/\text{м}$ , выполняется следующая итерация расчета, т.е. происходит переход к второму действию, в противном случае моделирование заканчивается.

**Расчеты.** Изменение коэффициента размножения  $K_{\text{эф}}$  в зависимости от максимальной линейной мощности для трех моделей твэлов приведено в табл. 2. Следует отметить существенное снижение  $K_{\text{эф}}$  при росте мощности для всех твэлов заданной высоты (рис. 1, 1—3).

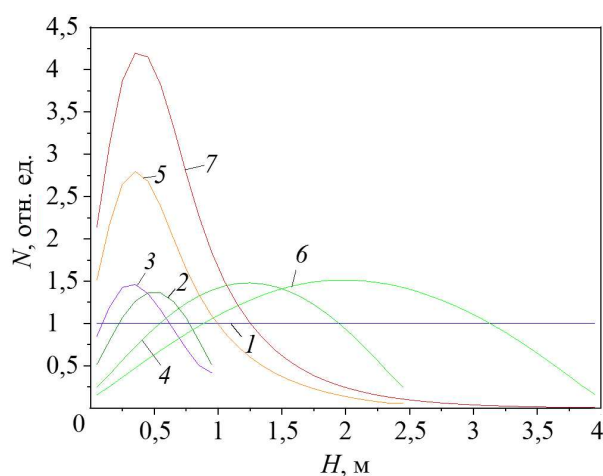
Т а б л и ц а 2. Результаты расчетной модели твэла при максимальной мощности

| Параметр                                                    | Высота твэла, см |         |         |
|-------------------------------------------------------------|------------------|---------|---------|
|                                                             | 100              | 250     | 400     |
| Мощность, кВт/м                                             | 47               | 26      | 16      |
| $T_{\text{макс}}$ , $^\circ\text{C}$ :                      |                  |         |         |
| теплоноситель                                               | 385,05           | 394,99  | 393,09  |
| оболочка                                                    | 1483,55          | 1487,44 | 1306,11 |
| топливо                                                     | 2858,77          | 2864,2  | 2595,35 |
| $\rho_{\text{вода}}^{\text{вода}}$ , $\text{кг}/\text{м}^3$ | 310,7            | 188,81  | 193,57  |
| $K_{\text{эф}}$ :                                           |                  |         |         |
| начальный                                                   | 1,0047           | 1,0016  | 1,0065  |
| конечный                                                    | 0,93             | 0,91    | 0,92    |

Результаты расчета энерговыделения в зависимости от номинальной мощности были получены ранее [7, 8]. Их характер не изменился, несмотря на небольшую модификацию модели, — наблюдалось повышение линейной мощности в нижних слоях, снижение — в средних и верхних, т.е. максимум энерговыделения был смещен в нижние слои (рис. 2). Необходимо отметить, что максимальная мощность, для кото-



Р и с. 1. Изменение коэффициента размножения нейтронов  $K_{эф}$  твэла высотой 100, 250 и 400 см с переменной (1—3) и постоянной мощностью (4—6)



Р и с. 2. Изменение энергосвечения при расчете с увеличением мощности, начиная с нулевой (1), и с номинальной 1 (2), 47 кВт/м (3) для твэлов высотой 100 см, 1 (4), 26 кВт/м (5) для твэлов высотой 250 см, 1 (6), 16 кВт/м (7) для твэлов высотой 400 см

рой было выполнено моделирование заданных твэлов, оказалась ниже принятой 50 кВт/м. В табл. 2 приведены основные характеристики при максимальной мощности для нейтронно-физического и теплогидравлического расчета. Результаты расчета теплогидравлического модуля ТК-СКД для каждого шага линейной мощности 1 кВт/м при изменении плотности, температуры теплоносителя, оболочки и топлива в зависимости от линейной мощности были приведены в [7, 8].

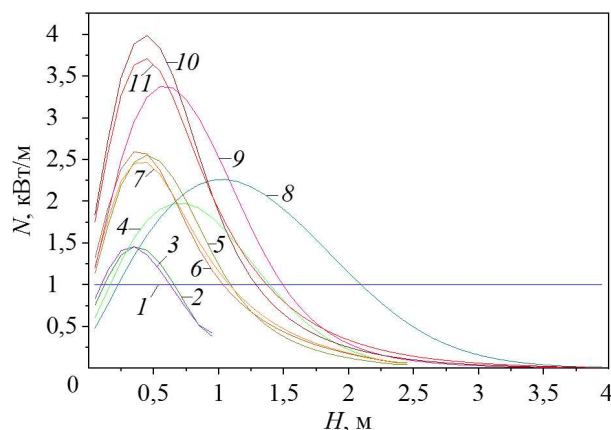
Для всех видов описанных твэлов были проведены итерационные расчеты при поддержании постоянной мощности, близкой к максимально полученной из предыдущего расчета без задания критериев сходимости и с максимальным числом итераций 40, т.е. без увеличения

мощности. Для этого на последнем шаге алгоритма (четвертое действие — окончание итерации) мощность не изменяется, условие изменяется на «если не превышает максимальное число итераций». Цель этого варианта системы расчета — проверить наличие устойчивости сходимости моделируемых функционалов к решению. Изменение  $K_{эф}$  в зависимости от номера итерации при постоянной мощности показано для трех видов моделей твэлов на рис. 1, 4—6, результаты приведены в табл. 3 и на рис. 3, 4. Как видно, с увеличением числа итераций плотность теплоносителя, температура топлива, оболочки, теплоносителя асимптотически стремятся к устойчивому решению.

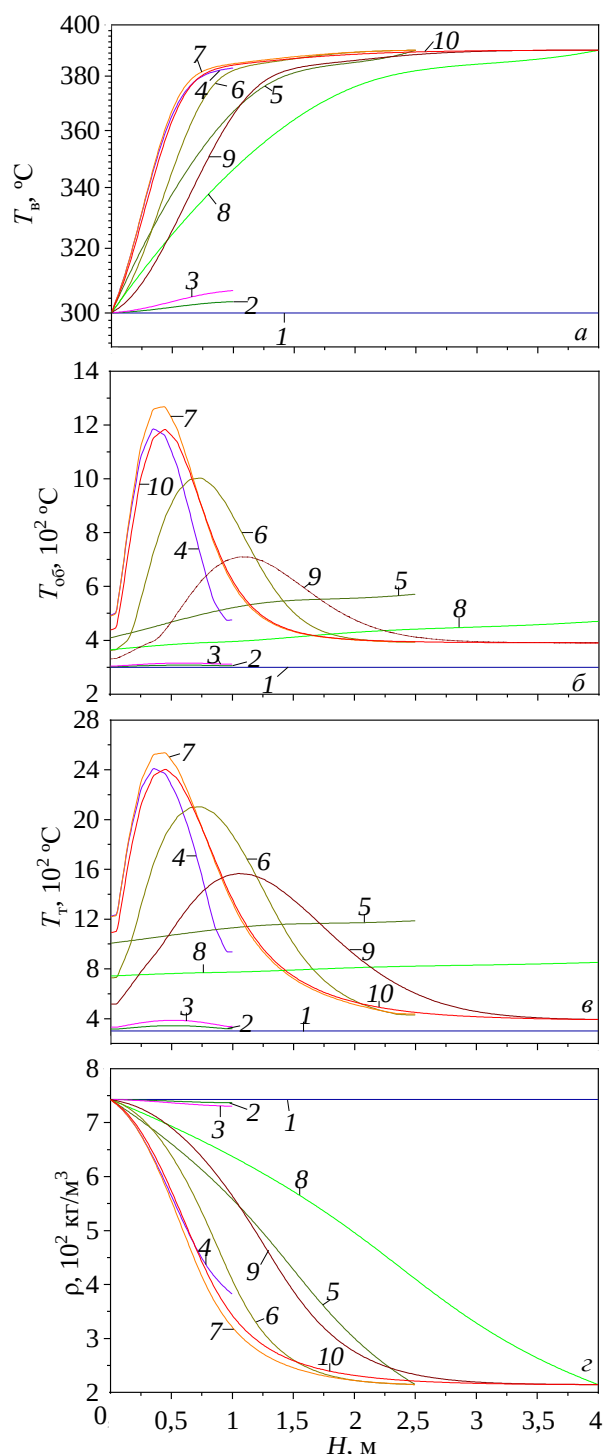
Т а б л и ц а 3. Результаты расчетной модели твэла при постоянной мощности (40-я итерация)

| Параметр                                        | Высота твэла, см |         |         |
|-------------------------------------------------|------------------|---------|---------|
|                                                 | 100              | 250     | 400     |
| Максимальная мощность, кВт/м                    | 46               | 24      | 15      |
| $T_{\max}$ , °C:                                |                  |         |         |
| теплоноситель                                   | 390,06           | 390,06  | 390,06  |
| оболочка                                        | 1446,67          | 1267,84 | 1183,43 |
| топливо                                         | 2804,74          | 2536,59 | 2403,46 |
| $\rho_{\min}^{\text{вода}}$ , кг/м <sup>3</sup> | 214,65           | 214,65  | 214,65  |
| $K_{эф}$ :                                      |                  |         |         |
| начальный                                       | 0,95             | 0,97    | 0,99    |
| конечный                                        | 0,93             | 0,92    | 0,93    |

В полученных результатах наблюдается закономерность — с увеличением мощности максимум температуры топлива и оболочки смеща-



Р и с. 3. Изменение энергосвечения при расчете с постоянной мощностью (нулевая итерация 1) для твэлов высотой 100 см — итерация 1-я (2), 40-я (3), высотой 250 см — итерация 1-я (4), 2-я (5), 3-я (6), 40-я (7), высотой 400 см — итерация 1-я (8), 2-я (9), 3-я (10), 40-я (11)



Р и с. 4. Итерационный процесс расчета, начиная с нулевой итерации (1), температуры теплоносителя (а), оболочки (б), топлива (в) и плотности воды (г) для твэлов высотой 100 см — итерация 1-я (2), 2-я (3), 40-я (4), высотой 250 см — итерация 1-я (5), 2-я (6), 40-я (7), высотой 400 см — итерация 1-я (8), 2-я (9), 40-я (10)

ется из средних в нижние слои. Таким образом, нижние слои топлива твэла нагреваются все больше и с каждым шагом в сторону повышения мощности. Необходимо отметить снижение плотности теплоносителя в зависимости от уве-

личения высоты твэла, и чем выше мощность, тем плотность большего числа высотных слоев снижается до близкой к минимальной. В легководных реакторах типа СКД нагрев теплоносителя существенно выше, чем в ВВЭР. Это приводит к пониженной плотности теплоносителя в верхних слоях твэла. Вследствие этого плотность потока тепловых нейтронов максимальная в нижних слоях твэла, что соответственно приводит к повышению энерговыделения в этой области в отличие от верхних слоев, в которых наблюдается снижение энерговыделения. Таким образом, наблюдаемый эффект приводит к смещению максимума энерговыделения в нижнюю часть активной зоны твэла для выполняемого расчета. Причем максимальное энерговыделение отмечается в слоях немногим выше самых нижних из-за эффекта утечки нейтронов.

Кроме этого, можно отметить, что  $K_{эф}$  первой итерации существенно отличается от полученного при соответствующей мощности в предыдущем алгоритме расчетов с изменением мощности, в то время как на 40-й итерации заметно меньше вследствие учета влияния обратных связей, поскольку в значительном числе верхних слоев системы заметно снижаются плотность теплоносителя и, как следствие, его замедляющие свойства.

**Закключение.** В настоящей статье дано описание взаимосвязанного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета бесконечной решетки твэлов типа ВВЭР-СКД с высотой топливного сердечника 100, 250 и 400 см. Расчет реализован через сопряжение двух программ в рамках программного комплекса КИР-ТГ: КИР обеспечивает нейтронно-физическую, ТК-СКД — теплогидравлическую составляющую расчета.

Для твэлов высотой 100, 250 и 400 см максимальная средняя линейная мощность составила 47, 26 и 16 кВт/м соответственно, и это является пределом расчетных возможностей нейтронно-физического кода (программы для ЭВМ КИР). Также были смоделированы расчеты для твэлов высотой 100, 250 и 400 см с постоянной средней линейной мощностью 46, 24 и 15 кВт/м соответственно. Моделирование при максимально полученной мощности (без ее постепенного повышения) выполнить не удалось при начальной мощности, заданной в виде константы. Вероятнее всего, константный профиль

мощности не позволяет рассчитать теплогидравлические параметры, удовлетворяющие начальным условиям с ненулевой мощностью.

Расчеты показали хорошую сходимость к решению. В дальнейшем планируется развитие программного комплекса взаимосвязанных кодов КИР-ТГ для многоканального нестационарного расчета ВВЭР-СКД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зборовский В.Г., Хоружий О.В., Лиханский В.В. и др. Расчетный модуль для определения физических параметров в канале реактора с теплоносителем закритического давления. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2021, вып. 4, с. 131—146.
2. Давиденко В.Д., Зинченко А.С., Харченко И.К. Интегральные нестационарные уравнения переноса нейтронов для расчетов кинетики ядерных реакторов методом Монте-Карло. — Там же. Сер. Физика ядерных реакторов, 2015, вып. 1, с. 11—16.
3. Гомин Е.А., Давиденко В.Д., Зинченко А.С., Харченко И.К. Расчет функции ценности и эффективной доли запаздывающих нейтронов методом Монте-Карло. — Там же, 2016, вып. 3, с. 22—30.
4. Гомин Е.А., Давиденко В.Д., Зинченко А.С., Харченко И.К. К определению времени жизни мгновенных нейтронов деления методом Монте-Карло. — Там же, с. 16—21.
5. Гомин Е.А., Давиденко В.Д., Зинченко А.С., Харченко И.К. Моделирование кинетики ядерного реактора методом Монте-Карло. — Там же, вып. 5, с. 4—16.
6. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974. 494 с.
7. Зборовский В.Г., Хоружий О.В., Лиханский В.В. и др. Согласованное моделирование тепловых и нейтронно-физических параметров в активной зоне реактора с водяным теплоносителем сверхкритического давления. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2023, вып. 3, с. 100—114.
8. Белоусов В.И., Давиденко В.Д., Дьячков И.И. и др. Связанный нейтронно-физический и теплогидравлический расчет тестовой модели реактора с водой сверхкритического давления с применением метода Монте-Карло. — Там же, вып. 1, с. 24—40.

Поступила в Редакцию 13.12.22

УДК 621.039

#### ОСОБЕННОСТИ ВЫЖИГАНИЯ АМЕРИЦИЯ В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ ТИПА БН-1200М

Тузов А.А. (АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград), Гулевич А.В., Гурская О.С., Декусар В.М.,  
Елисеев В.А., Зарапина Э.М., Троянов В.М. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)  
e-mail: decouss@ippe.ru

Америций, главным образом, его пороговый изотоп  $^{241}\text{Am}$  традиционно относят к наиболее опасным трансурановым актиноидам, неизбежно содержащимся в отработавшем ядерном топливе [1—4]. В основном он образуется при распаде  $^{241}\text{Pu}$ .  $^{241}\text{Am}$  имеет период полураспада 432,2 года, характеризуется высокой радиоактивностью и заметным  $\sim 115$  Вт/кг удельным тепловыделением. При облучении нейтронами он трансмутирует в пороговый  $^{242}\text{Cm}$ . Последний характеризуется высоким тепловыделением 120 кВт/кг и, в свою очередь, при облучении трансмутирует в делящийся  $^{243}\text{Cm}$ . Изотопы кюрия, имеющие в основном короткий период полураспада, следует хранить. Спустя сравнительно небольшое время они распадутся в изотопы плутония, которые можно будет добавлять в топливо.

Изотопы америция и кюрия химически близки к некоторым продуктам деления и выде-

ляются вместе с ними. Практически реализованных промышленных технологий выделения америция и кюрия нет. После выделения плутония и распада кюрия радио- и химическую активность отработавшего ядерного топлива на протяжении многих тысяч лет будет определять именно америций. Поэтому в настоящей работе рассматриваются следующие основные способы трансмутации америция в быстрых натриевых реакторах [1—7]:

- 1) гомогенная в топливе активной зоны;
- 2) гетерогенная в специальных сборках без замедлителя в боковом экране;
- 3) гетерогенная в специальных сборках с замедлителем в боковом экране.

**Нейтронно-физические аспекты трансмутации америция.** Рассмотрение проводится применительно к быстрым натриевым реакторам со смешанным уран-плутониевым топливом.