

УДК 621.039.519.4

Расчетно-экспериментальное исследование температурного эффекта реактивности гетерогенных критических сборок с сильно блокированным поглотителем

БАГРЕЦОВ В. И., ЛЕПЕНДИН В. И., МАТВЕЕНКО В. И., МОРОЗОВ В. И.

Расчетно-экспериментальное изучение температурных эффектов реактивности на простых по форме регулярных гетерогенных критических сборках позволяет сделать вывод о наиболее приемлемых методах физического расчета, что обычно практически невозможно сделать при исследовании реальных систем. При этом особый интерес представляет исследование активных зон, содержащих сильно блокированный поглотитель, так как в этом случае в расчете возникают трудности, связанные с необходимостью правильного учета сильной анизотропии углового распределения потока нейтронов. В работе представлены результаты исследований, проведенных в широком диапазоне температур ($T = 2 \div 240^\circ \text{C}$) на критических сборках реактора ТЭС-3М [1], содержащих кадмиевые и гадолиниевые стержни, равномерно размещенные в решетке твэлов.

Характеристика сборок

Высокотемпературные опыты проводили на стенде МАТР-2 в толстостенном сосуде, позволяющем нагревать критические сборки до 300°C [2]. Максимальная температура в измерениях была ограничена технологическими возможностями двухкольцевых твэлов типа К-17 [3], рассчитанных на давление $P \sim 4 \text{ МПа/см}^2$. Твэлы длиной 600 мм с двуокисью урана 17%-ного обогащения, содержащие 3,48 г ^{235}U на 1 см длины, размещали в узлах гексагональной

решетки с шагом $a = 68 \text{ мм}$. Размеры топливных колец с покрытием из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм составляли $41,8 \times 2,9$ и $29,2 \times 2,9 \text{ мм}$. Конструкция стенда предусматривала возможность компенсации обратимых изменений реактивности трехлопастным компенсирующим стержнем (КС) из бористой стали, размещенным в межтвэльном пространстве. Для обеспечения ядерной безопасности между твэлами были размещены четыре стержня СУЗ в герметичных стальных трубах размером $30 \times 3 \text{ мм}$.

Были исследованы три варианта критических сборок, отличающихся числом твэлов, поглотителей и материалом поглотителя. Вместо центрального топливного канала в каждой сборке размещали стальной охлаждаемый канал размером $50 \times 3 \text{ мм}$, в котором находился нейтронный датчик для импульсных измерений реактивности. Одна из исследуемых сборок состояла из твэлов без поглотителей (34 твэла), в двух других в центральной водной полости каждого твэла размещали поглощающие стержни из окиси кадмия (68 стержней) или окиси гадолиния (74 стержня) в смеси с окисью алюминия. Картограммы зон приведены на рис. 1, а, б, в.

Поглощающие стержни из окиси кадмия плотностью $\gamma = 0,5 \text{ г/см}^3$ и окиси гадолиния ($\gamma = 0,65 \text{ г/см}^3$) имели одинаковые размеры (диаметр по поглотителю 10,4 мм, стальное покрытие толщиной 0,3 мм, длина по поглотителю

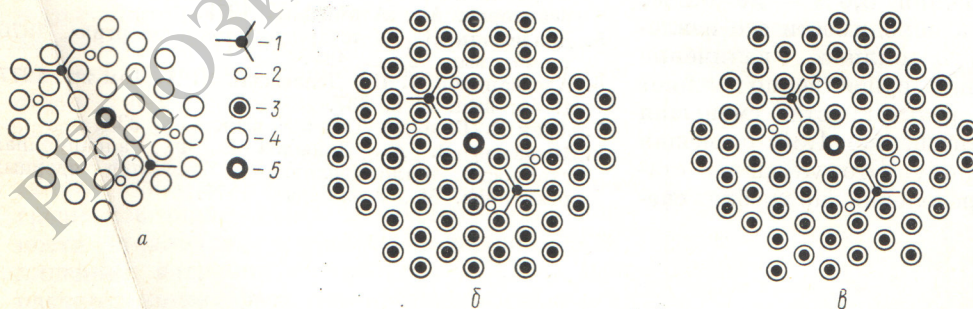


Рис. 1. Картограммы критических сборок без поглотителя (а), с гадолиниевыми (б) и кадмиевыми (в) стержнями:

1 — компенсирующий стержень (КС); 2 — стальные чехлы стержней СУЗ; 3 — поглощающий стержень; 4 — твэл; 5 — охлаждаемый канал со счетчиком СНМ-11.

480 мм) и занимали центральное положение по высоте активной зоны. Во всех экспериментах критические сборки были окружены водяным отражателем толщиной 25—40 см.

Методика эксперимента

В каждом варианте критическое состояние полностью залитых водой сборок при температуре 15—20° С достигалось путем подбора числа твэлов в сборке в зависимости от используемого поглотителя при полностью выведенных из активной зоны органах СУЗ. При разогреве сборок КС либо перемещался, либо находился в каком-то фиксированном положении, в зависимости от метода измерения реактивности. Для сборки с кадмиевым стержнем экспериментальным путем была проведена оценка влияния КС на температурный эффект реактивности сборки в зависимости от положения КС из бористой стали (вверху, в середине, внизу активной зоны). Реактивность системы в экспериментах определяли двумя методами: измерением зависимости $\partial\rho/\partial T = f(T)$ и ее последующим интегрированием в соответствующих пределах; измерением импульсного метода при фиксированном положении КС.

В первом методе необходим вывод системы в надкритическое состояние и измерение надкритичности, при этом температурные изменения реактивности компенсируются перемещением КС. Эффективность КС с большим запасом перекрывала положительный температурный эффект реактивности во всех исследованных сборках и не превышала $2,4\beta_{\text{эф}}$ для чистой сборки и $1,7\beta_{\text{эф}}$ для сборок с поглотителями.

При проведении измерений вторым методом нейтронный генератор размещали с боковой стороны около бака высокого давления, реакция системы на вводимый импульс регистрировалась коронным счетчиком СНМ-11, размещенным в центре активной зоны. Реактивность системы (в единицах $\beta_{\text{кр}}$) определяли по формуле α -метода [4]:

$$\rho/\beta_{\text{кр}} = \alpha\Lambda/\alpha_{\text{кр}}\Lambda_{\text{кр}} - \beta/\beta_{\text{кр}},$$

где $\alpha_{\text{кр}}$ — декремент затухания основной гармонике мгновенных нейтронов; $\Lambda_{\text{кр}}$ — время генерации мгновенных нейтронов; $\beta_{\text{кр}}$ — эффективная доля запаздывающих нейтронов в холодном критическом состоянии при 20° С; α , Λ , β — аналогичные значения при температуре системы $T^\circ \text{С}$.

Значение β достаточно консервативно и, как показывают расчеты в 21-групповом P_1 -приближении по программе 9М [5], ее изменением с температурой можно пренебречь.

Характерная особенность исследуемых сборок — достижение критического состояния при полностью извлеченных органах компенсации и регулирования для двух существенно различных значений температуры сборки, что дает возможность экспериментально определить изменение $\Lambda_{\text{кр}}$ при этих температурах, используя соотношение $\alpha_{\text{кр}} = \beta_{\text{кр}}/\Lambda_{\text{кр}}$ [4]. Для исследованных сборок $\Lambda_{\text{кр}}$ с учетом расчетного значения β в холодном и горячем критических состояниях соответственно равна: в чистой сборке — $4,85 \cdot 10^{-5}$ и $4,67 \cdot 10^{-5}$ с, в сборке с гадолинием — $4,41 \cdot 10^{-5}$ и $4,08 \cdot 10^{-5}$ с, в сборке с кадмием — $4,44 \cdot 10^{-5}$ и $4,08 \cdot 10^{-5}$ с. Обработку результатов импульсных измерений проводили с учетом $\Lambda_{\text{кр}}$ в предположении линейной зависимости изменения времени генерации нейтронов с температурой.

По оценкам, погрешность определения реактивности системы обоими способами не превышала 3—3,5%. При определении температурного эффекта как разности реактивностей эта погрешность удваивается.

Методика расчета

Расчеты физических характеристик сборок проводили по программе Поливанского В. П. [6]. При этом использовали малогрупповое диффузионное приближение и многозонную модель реактора в двумерной (r , z)-геометрии. Реальная геометрия сборок, состоящих из трех основных физических зон (активная зона, центральный измерительный канал, отражатель), в расчетах заменялась многозонной моделью (7—12 зон), отражающей реальные особенности композиции. Наличие в активной зоне стальных чехлов стержней СУЗ учитывалось с помощью теории возмущений.

В расчетах использовали двухгрупповое приближение с границей раздела групп, равной 0,671 эВ, с макроскопическими групповыми константами, определенными путем усреднения по многогрупповым спектрам, полученным в различных приближениях. Усреднение констант надтепловой группы нейтронов проводилось по девятигрупповому спектру замедления гомогенного голого реактора с эквивалентными размерами. При этом константы ^{238}U , Gd и Cd находили с учетом их гетерогенного размещения в активной зоне. Вероятность избежания

резонансного поглощения в ^{238}U определяли с учетом взаимной экранировки твэлов в соответствии с работой [7]. При расчете поглощения надтепловых нейтронов в гадолинии и кадмии использовали данные по разрешенным и неразрешенным параметрам из работ [8, 9]. Макроскопические константы тепловой группы нейтронов для решетки активной зоны и центрального измерительного канала были получены моделированием этих зон ячейками Вигнера — Зейца, расчетом пространственно-энергетических распределений плотности потока тепловых нейтронов в этих ячейках с учетом эффектов термализации и усреднения констант по полученным спектрам нейтронов.

Пространственно-энергетические распределения плотности потока тепловых нейтронов в ячейках рассчитывали в десятигрупповом

приближении по формулам модификации S_n -метода с линейной балансной аппроксимацией [10]. Анизотропию рассеяния нейтронов учитывали в транспортном приближении лишь для тех нейтронов, которые при рассеянии не выходили за пределы энергетической группы. При переходах в другие энергетические группы индикатриса рассеяния нейтронов считалась изотропной. Десятигрупповые макроскопические константы зон и плотности источников тепловых нейтронов в зонах определяли с использованием методики, изложенной в работе [11]. Функцию рассеяния нейтронов на молекулах воды в тепловой области $0 \leq E \leq 0,671$ эВ рассчитывали с использованием аппроксимационных формул работы [11]. При решении десятигрупповой системы кинетических уравнений использовали алгоритм, совпадающий в основном с алгоритмом модуля S_n системы «Ландыш» [12]. Предварительное методическое исследование позволило найти оптимальные параметры десятигруппового расчета плотности потока тепловых нейтронов в ячейке: приближение S_6 и сетку по радиальной переменной r , содержащую 86 узлов с неравномерным шагом в пятизонной ячейке. В поверхностной области зоны поглощающего стержня, соответствующей примерно 6—8 длинам среднего свободного пробега тепловых нейтронов (где в основном происходит депрессия потока), переменный шаг сетки был минимальным (0,001 см).

Результаты исследований

Результаты расчетно-экспериментальных исследований температурных эффектов реактивности для трех сборок приведены на рис. 2, а, б, в. Температурный эффект представлен в виде зависимости разности реактивностей системы от температуры:

$$\Delta\rho(T) = \rho(T) - \rho(20^\circ\text{C}),$$

где $\rho(T)$ и $\rho(20^\circ\text{C})$ — реактивности системы соответственно при заданной температуре и 20°C . Пунктирные кривые получены интегрированием измеренных зависимостей $\partial\rho/\partial T = f(T)$ в соответствующих пределах. Из результатов импульсных измерений для трех положений КС в сборке с кадмиевыми стержнями, представленных на рис. 2, в в виде экспериментальных точек, следует:

1) экспериментальные зависимости, полученные двумя независимыми методами, достаточно хорошо согласуются между собой, что свиде-

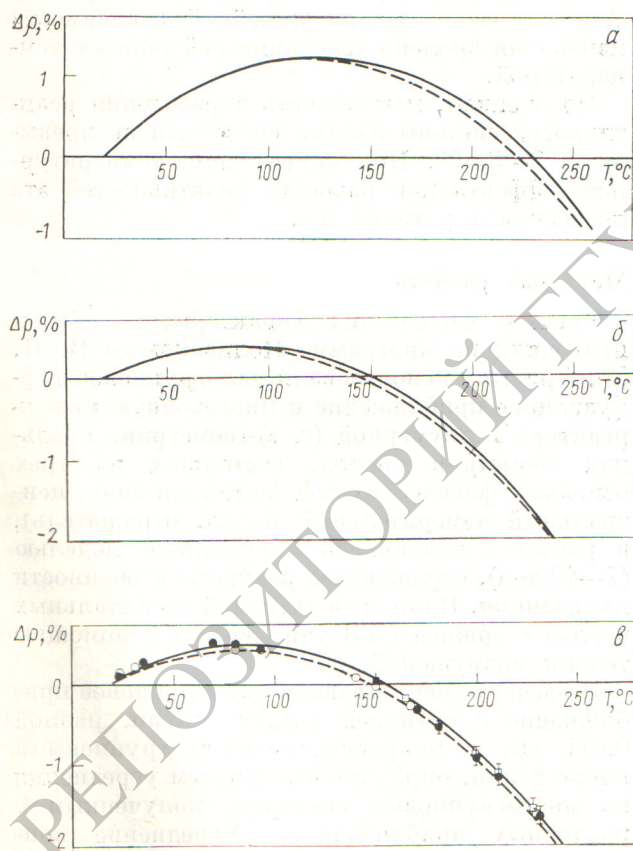


Рис. 2. Зависимость реактивности сборок без поглотителя (а), с гадолиниевыми (б) и кадмиевыми (в) стержнями от температуры. Экспериментальные точки (□) получены импульсным методом при положении КС сверху, (○) — в середине, (●) — внизу

— — — эксперимент с использованием зависимости $\frac{\partial\rho}{\partial T} = f(T)$; — — — расчет

тelleствует о надежности экспериментальных результатов;

2) положение КС практически не влияет на температурный эффект реактивности сборки, так как экспериментальные точки при разных положениях КС совпадают в пределах экспериментальных погрешностей.

Хорошее согласие между расчетными и экспериментальными зависимостями температурного эффекта показано на рис. 2, а, б, в. Расчетное исследование температурного эффекта реактивности с использованием двухгруппового метода с применением S_n -приближения при определении параметров тепловой группы было апробировано также и на строго регулярных и однородных критических сборках, не содержащих поглотители, описание которых приведено в работе [13]. Результаты исследований подробно описаны в работе [14] и представлены на рис. 3, где также наблюдается хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными в широкой области концентраций ^{35}U , ($\rho_n/\rho_s = 50 \div 600$) и температур ($T = 20 \div 250^\circ \text{C}$).

Надежность экспериментальных данных, полученных различными способами, и расчетно-методические исследования, выполненные в ходе этой работы, позволяют сделать заключение о том, что экспериментальная и расчетная методики, представленные в работе, могут быть использованы при изучении регулярныхборок с сильно блокированным поглотителем.

Авторы благодарны М. Н. Ланцову, В. С. Быковскому, Р. К. Гончарову, В. М. Федорову, А. Ф. Золотову, А. Н. Мезенцеву, Р. П. Борозденко, Т. С. Панкратовой за участие в проведении экспериментов и расчетов, В. Н. Гурину и Г. А. Илясовой за полезные замечания при обсуждении полученных результатов.

Поступила в Редакцию 30.I.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Орлов В. В. и др. В кн.: Вопросы физики ядерных реакторов. Вып. 1. Т. 1. Обнинск, изд. ОНТИ ФЭИ, 1968, т. 1 с. 349.
- Сб. «Физико-энергетический институт». М., Атомиздат, 1974, с. 11.
- Инютин Е. И. и др. Труды Третьей международной конференции по использованию атомной энергии в мирных целях. Т. 3, Нью-Йорк, 1965, с. 23.
- Стумбур Э. А. и др. В кн.: Теоретические и экспериментальные проблемы нестационарного переноса нейтронов. М., Атомиздат, 1972, с. 245.

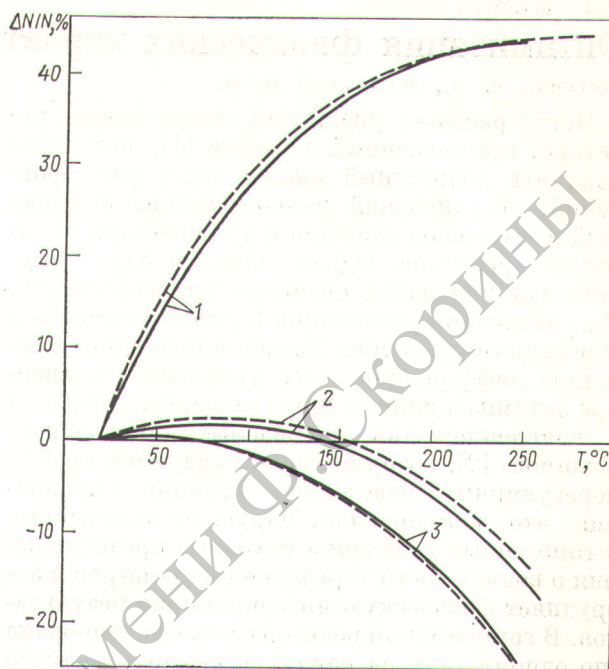


Рис. 3. Температурная зависимость относительного изменения количества топлива в критическом состоянии ($\lambda_{кр}$) для сборки с шагом расположения твэлов 3,15 см (1); 2,36 см (2) и 1,89 см (3):

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{N_{кр}(20^\circ) - N_{кр}(T)}{N_{кр}(20^\circ)};$$

— — — эксперимент [13]; ————— расчет

- Невиница А. И. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Реакторостроение. Методы и алгоритмы расчета ядерных реакторов. Вып. 6(20). Обнинск, изд. ФЭИ, 1977, с. 73.
- Николайшвили Ш. С. и др. В кн.: Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Т. 2. Обнинск, изд. ОНТИ ФЭИ, 1967, с. 75.
- Орлов В. В. «Атомная энергия», 1958, т. 4, с. 531.
- Захарова С. М. и др. Бюллетень информационного центра по ядерным данным. Вып. 3. М., Атомиздат, 1967, с. 194.
- Захарова С. М. Там же. Вып. 5. М., Атомиздат, 1968, с. 189.
- Морозов В. Н. В кн.: Теория и методы расчета ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1962, с. 91.
- Марчук Г. И. и др. «Атомная энергия», 1962, т. 13, вып. 6, с. 534.
- Морозов В. Н. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Реакторостроение. Методы и алгоритмы расчета ядерных реакторов. Вып. 6(20). Обнинск, изд. ФЭИ, 1977, с. 83.
- Бать Г. А. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 4, с. 354.
- Матвеев В. И., Морозов В. Н. Препринт ФЭИ-694. Обнинск, 1976.