

УДК 621.039 519

Петлевой канал-конвертер для испытаний высокообогащенных твэлов в исследовательском реакторе

БОБКОВ В. Г., КЛИМЕНТОВ В. Б., КОПЧИНСКИЙ Г. А., МЕЛЬНИКОВ М. В., НЕЧИПОРУК В. А.

К числу важных задач атомной техники относятся петлевые испытания твэлов из высокообогащенного горючего, разрабатываемых для быстрых реакторов. Возможности проведения таких испытаний в исследовательских тепловых реакторах ограничены неравномерностями энерговыделения и выгорания в топливной композиции. Увеличение числа твэлов в исследуемых топливных сборках еще более снижает предельность испытаний. Одним из способов выравнивания энерговыделения и выгорания в испытываемых сборках твэлов и приближения условий их испытаний к проектным может служить повышение жесткости спектра нейтронов в петлевом канале. В подтверждение этого достаточно вспомнить, что пробег теплового нейтрона в высокообогащенной двуокиси урана составляет около 0,1 см, а средний пробег надтепловых нейтронов в четыре раза больше.

Для выравнивания энерговыделения в петлевых каналах часто используют поглощающие экраны (борные, кадмиевые) [1, 2]. Однако значительная отрицательная реактивность ограничивает размеры облучательных устройств. Рассматриваются также возможности использования в указанных целях экранов из размножающих материалов [3, 4]. В работе [4] для массового облучения твэлов в исследовательском реакторе BR-2 предложен канал SOCRATE с экраном из двуокиси урана. Расчетным путем были получены оптимистические характеристики этого облучательного устройства. Однако в связи с тепловой мощностью канала, достигающей 10 МВт, потребовалось создание сложного жидкометаллического контура.

В 1965 г. были начаты экспериментальные и расчетные исследования модельного петлевого канала с размножающим экраном, предназначенного для испытаний сборок высокообогащенных твэлов в тепловом исследовательском реакторе [5—7]. В настоящей работе приводятся основные результаты исследований.

Конструкция канала, основные задачи и методики исследований

Модельный канал (рис. 1) состоял из цилиндрической герметичной емкости, в центре

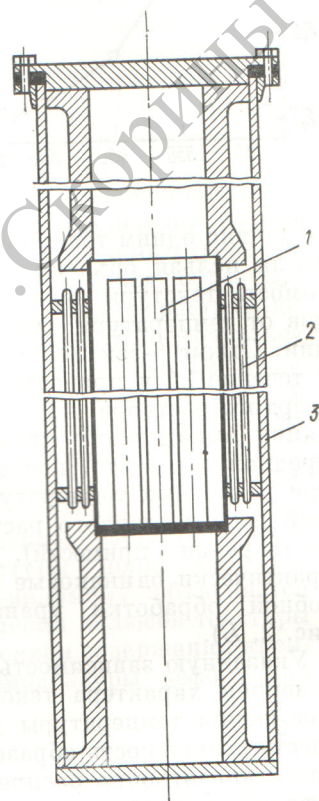


Рис. 1. Общий вид модельного петлевого канала-конвертера:
1 — центральная сборка макетов высокообогащенных твэлов; 2 — конвертерный экран; 3 — корпус канала

которой располагалась семиэлементная сборка макетов высокообогащенных твэлов, собранных из таблеток UO_2 90%-ного обогащения диаметром (2R) 0,9 см в трубке из нержавеющей стали внешним диаметром 1 см с толщиной стенки 0,03 см. Высота таблеток переменная (0,2—0,5 см). Минимальная высота урана в трубке варьировалась от 3 до 6 см. Исследуемая сборка окружалась экраном внутренним диаметром 7,5 см. Экран набирался из стержней. Стержень конвертерной зоны представлял собой тонкостенную никелевую трубку внешним диаметром 0,25 см, внутренним 0,23 см, заполненную двуокисью урана 90%-ного обогащения на длину 30 см. Вес двуокиси урана в одном стержне не менее 8,5 г при содержании ^{235}U в среднем 6,84 г. По торцам стержни герметизировались никелевыми наконечниками длиной 1,5 см. Число изготовленных стержней состави-

до 450. Оптическая толщина экрана по тепловым нейтронам изменялась от 0 до 3,6. Макет канала фиксировался алюминиевым вытеснителем в центре активной зоны критической сборки ВВР-М [8].

Основные задачи исследований: 1) изучение возможности создания равномерного поля энерговыделения в семиэлементной сборке высокообогащенных твэлов; 2) исследование влияния толщины экрана на удельное энерговыделение в испытываемых твэлах; 3) исследование конвертирующего эффекта размножающего экрана; 4) изучение спектральных изменений в экспериментальном объеме канала; 5) накопление экспериментальных данных по взаимодействию быстрой микрозоны канала-конвертера с активной зоной теплового реактора; 6) отработка методики нейтронно-физических расчетов канала-конвертера; 7) исследование характеристик возможных модификаций канала.

Изучались макро- и микрораспределения плотности делений в сборке моделей твэлов. Макрораспределения исследовались при помощи урановых детекторов, которые изготавливались путем нанесения слоя толщиной 0,5 мг/см² из UO₂ 90%-ного обогащения на алюминиевую подложку. Диаметр детекторов был равен диаметру таблеток урана. Микрораспределения плотности делений по радиусу и поверхности моделей твэлов исследовались методом автораддиографии [5]. В качестве детекторов использовались бумажные диски и полоски, собирающие в процессе облучения осколки деления.

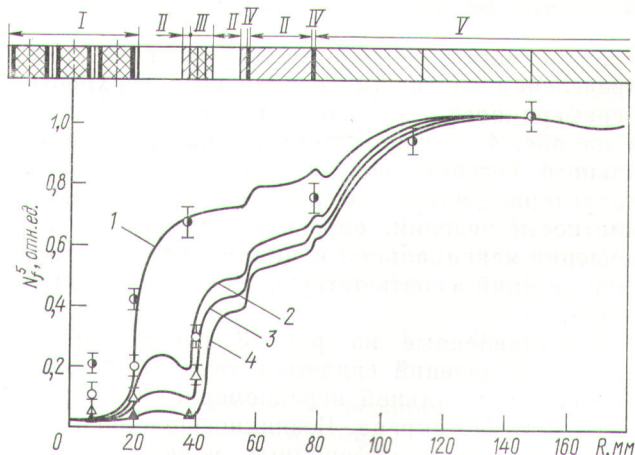
Относительные распределения плотности потока быстрых нейтронов измерялись при помощи реакции $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$. Детекторы изготавливались из металлического индия толщиной 112 мг/см². Они окружались двухслойным чехлом: внешний слой — кадмий толщиной 0,05 см, внутренний — индий толщиной 40 мг/см². Активности детекторов измеряли на γ -спектрометре с охранным сцинтилятором антисовпадений [6].

Исследуемые петлевые ячейки, состоящие из сборок моделей твэлов, экрана и активной зоны теплового реактора, отличаются резкой неоднородностью нейтронно-физических свойств. Энергетические распределения нейтронов в пределах ячейки могут существенно трансформироваться от спектра теплового реактора до спектров, близких быстрым системам. Это вынуждает при расчете таких систем использовать громоздкие методы. В настоящей работе использовался S_n -метод. Расчет велся в одно-

мерной цилиндрической геометрии с использованием 26-групповой системы констант [9] в S_4 -приближении на основе комплекса программ, разработанного в НИИАРе. Константы тепловой группы усреднялись по спектру, предварительно рассчитанному по программе СИ-5.

Результаты исследований

Выравнивание энерговыделения в сборке твэлов с ростом оптической толщины экрана демонстрируется на рис. 2, где представлены экспериментальные и расчетные распределения плотности деления в конвертерной ячейке. Если без экрана отношение плотностей делений на поверхностях периферийного и центрального макетов твэлов составляло 2,0, то с ростом толщины экрана до $\Sigma_a \Delta l = 3,6$ оно снижается до 1,06. Кадмиевое отношение деления на поверхности твэлов оказалось равным $1,17 \pm \pm 11\%$. При малой оптической толщине экрана наблюдается заметное различие между экспериментальными и расчетными плотностями делений. Такое расхождение можно объяснить гетерогенной структурой экрана и сборки моделей твэлов, которая обуславливает существенную притечку тепловых нейтронов в центральную зону. При максимальной толщине экрана, когда он становится квазигомогенным, совпадение расчетных и экспериментальных данных удовлетворительное.



Р и с. 2. Распределения плотности деления (N_d^5) по радиусу конвертерной ячейки (1, 2, 3, 4 — $\Sigma_a \Delta l$, равные соответственно 0; 0,8; 1,6; 3,6):

I — сборка макетов твэлов; II — алюминий; III — экран; IV — водяные прослойки; V — активная зона ВВР-М

Более детально выравнивание поля энерговыделения в сборке твэлов представлено на рис. 3 и 4. На рис. 3 показаны измеренные

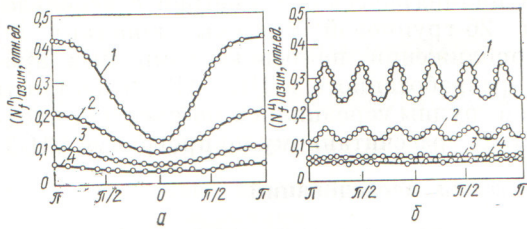


Рис. 3. Распределения плотности делений по поверхности сердечников периферийного (а) и центрального (б) твэлов (1, 2, 3, 4 — $\Sigma_a \Delta l$, равные соответственно 0; 0,8; 1,6; 3,6)

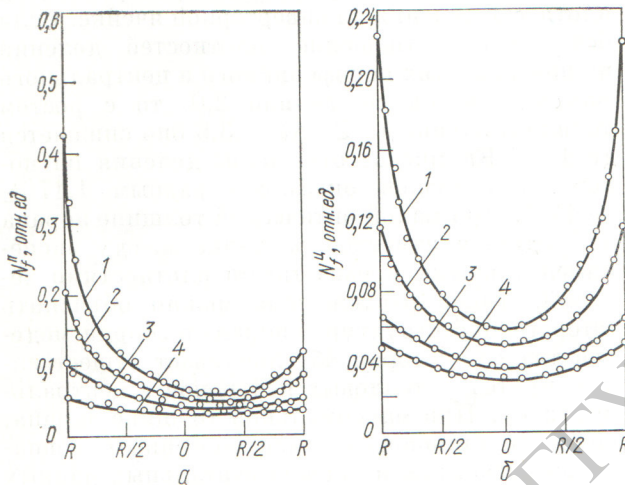


Рис. 4. Распределения плотности делений по радиусу сердечников периферийного (а) и центрального (б) твэлов (1, 2, 3, 4 — $\Sigma_a \Delta l$, равные соответственно 0; 0,8; 1,6; 3,6)

методом автордиографии азимутальные распределения плотности делений на поверхности периферийного и центрального макетов твэлов, а на рис. 4 — аналогичные данные для радиального сечения макетов. Числовые данные характеризовались коэффициентами перекоса плотности делений, определявшимися как отношение максимальной и минимальной плотностей делений в соответствующем сечении макета твэла.

Представленные на рис. 3 распределения плотности делений свидетельствуют о существенной азимутальной неравномерности энерговыделения без экрана. Возникновение неравномерности для периферийных макетов объясняется экранирующим действием соседних твэлов. В результате на поверхности твэла, обращенной к активной зоне, энерговыделение оказалось в 3,5 раза больше, чем на поверхности, обращенной к центру сборки. Очевидно, такие условия испытаний твэлов неудовлетворительны. Введение конвертерного экрана позволяет заметно снизить азимутальную неравномерность

для периферийных твэлов. Для экрана толщиной 3,6 соответствующий коэффициент перекоса плотности делений уменьшается до $1,57 \pm 5\%$.

Еще более сложная картина азимутальной неравномерности наблюдается для центрального твэла. Без экрана распределение плотности делений на поверхности твэла носит волнообразный характер, обусловленный притоками медленных нейтронов через зазоры между периферийными твэлами. Введение экрана толщиной 1,6 полностью снимает азимутальную неравномерность энерговыделения для центрального твэла.

Как следует из рис. 4, без экрана неравномерность энерговыделения по радиусу твэлов также существенна. Так, для периферийного твэла радиальный коэффициент перекоса плотности делений достигает $7,00 \pm 5\%$, а для центрального $3,00 \pm 5\%$. После введения экрана толщиной 3,6 соответствующие коэффициенты перекоса оказались равными $1,64 \pm 5\%$ и $1,57 \pm 5\%$. Если коэффициент перекоса для всей семиэлементной сборки определить как отношение максимальной плотности делений к минимальной, то без экрана он оказывается равным $7,35 \pm 5\%$, а с экраном толщиной 3,6 составляет $1,67 \pm 5\%$, причем последняя величина подтвердилась расчетом, давшим значение 1,71.

Среднее удельное энерговыделение в семиэлементной сборке высокообогащенных твэлов оценивали на основании полученных экспериментальных данных с учетом соотношения

$$\bar{q}_{уд} = \frac{\Phi_{th} \Sigma_f^{th} R_{Cd}^f \mu^f}{(R_{Cd}^f - 1) \bar{k} 3,1 \cdot 10^{10}} \text{ (Вт/см}^3\text{)},$$

где Φ_{th} — невозмущенная плотность потока тепловых нейтронов в активной зоне исследовательского реактора; Σ_f^{th} — макроскопическое сечение деления на тепловых нейтронах, рассчитанное для композиции испытываемого твэла; $R_{Cd}^f / (R_{Cd}^f - 1)$ — поправка, учитывающая вклад в общее число делений закадмиевых нейтронов; μ^f — относительная плотность делений на поверхности периферийного твэла (определялась по отношению к плотности делений в невозмущенной области активной зоны реактора); \bar{k} — коэффициент неравномерности, определяемый как отношение максимального энерговыделения в сборке твэлов к среднему.

Ввиду того что азимутальная неравномерность затрудняла численное интегрирование распределений плотности делений по сечению сборки твэлов, рассматривались два крайних

случая: $\bar{k} = 1$ и $\bar{k} = 1,67$ (максимальное и минимальное энерговыделение в сборке).

Если ориентироваться на плотность потока тепловых нейтронов в невозмущенной области активной зоны реактора ВВР-М $\Phi_{th} = 10^{14}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ и экспериментально найденные величины $\mu^f = 0,053 \pm 8\%$ и $R_{Cd}^f = 12,5 \pm 11\%$, то среднее удельное энерговыделение в семиэлементной сборке испытываемых высокообогащенных твэлов при оптической толщине экрана 3,6 должно находиться в пределах 1,5—2,0 кВт/см³.

Конвертирующий эффект экрана представлен данными рис. 5, на котором показаны экспериментальные распределения быстрых нейтронов по радиусу исследуемой ячейки.

Сравнение кривых 4 и 5 показывает, что введение экрана наибольшей толщины приводит к увеличению плотности потока быстрых нейтронов в экспериментальном объеме канала в 1,7 раза. Сборка твэлов увеличивает плотность потока быстрых нейтронов в 1,25 раза.

Спектральные изменения в сборке твэлов исследовались расчетным путем с использованием S_n -метода. На рис. 6 показаны интегральные и дифференциальные спектры нейтронов, полученные для оптической толщины экрана 3,6. Для сравнения даны спектры нейтронов активной зоны ВВР-М. С введением экрана в сборке твэлов устанавливается жесткий спектр нейтронов с медианной энергией по плотности потока около 500 эВ. Различия между спектрами в центре и на периферии сборки оказались незначительными. Энергетические распределения делений также заметно смещаются в область высоких энергий. Если до введения

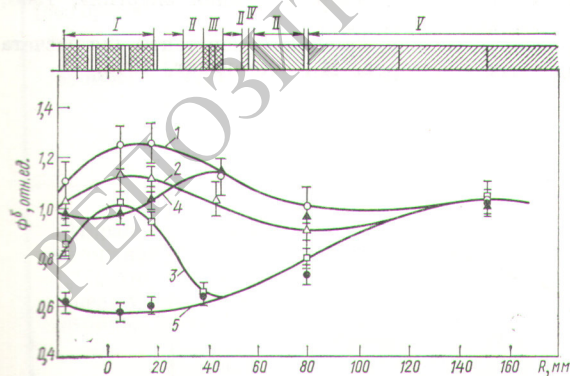


Рис. 5. Распределения быстрых нейтронов (Φ), измеренные по активации индия [1, 2, 3 — $\Sigma_a \Delta l$, равные соответственно 3,6; 1,6; 0; 4, 5 — без сборки макетов твэлов (4 — $\Sigma_a \Delta l = 3,6$; 5 — без экрана)]. Остальные обозначения см. к рис. 2

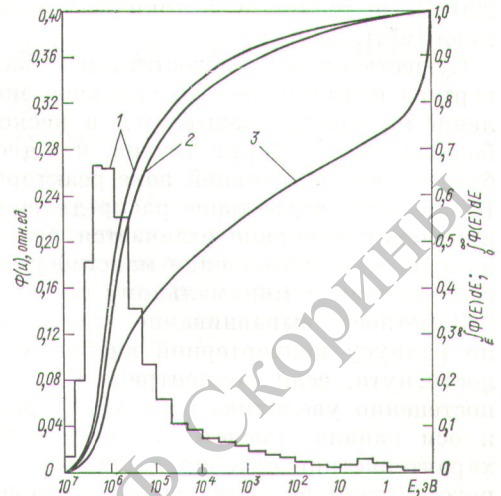


Рис. 6. Спектры нейтронов в конвертерной ячейке с экраном толщиной 3,6:

1 — центр сборки макетов твэлов; 2 — периферия сборки макетов твэлов; 3 — активная зона реактора ВВР-М

экрана медианная энергия в спектре делений в центре сборки была равна 100 эВ, а на периферии 86% делений вызывалось тепловыми нейтронами, то при $\Sigma_a \Delta l = 3,6$ медианная энергия составила 465 эВ. Сравнение спектра канала-конвертера с типичными спектрами быстрых реакторов указывает на их близость, однако в первом случае присутствует низкоэнергетический «хвост», который дает заметный вклад в общее число делений.

Взаимодействие канала-конвертера с критической сборкой ВВР-М изучалось путем измерения критических загрузок и эффективности периферийных твэлов критической сборки. При $\Sigma_a \Delta l = 3,6$ загрузка критической сборки уменьшилась на $0,250 \pm 0,015$ кг ²³⁵U, т. е. выигрыш составил около 11%. Была оценена наиболее опасная ситуация, когда канал-конвертер заполнялся водой. При $\Sigma_a \Delta l = 2,8$ реактивность увеличилась на $4\beta_{эф}$, что надежно компенсировалось системой аварийной защиты с эффективностью $(9-10)\beta_{эф}$.

Канал-конвертер с экраном переменного обогащения

Теплотехнические оценки, основанные на представленных выше экспериментальных данных, показали, что с помощью жидкометаллических теплоносителей можно отвести тепло, генерируемое в канале-конвертере, при допустимых температурных условиях в конструкционных материалах. Нагрев натрия (начальная температура 250°С) должен составить

200° С, а тепловые потоки в экране $1,5 \cdot 10^6$ ккал/(м²ч).

Существенным недостатком канала-конвертера является то, что удельное энерговыделение в экране оказывается в несколько раз больше, чем в сборке твэлов, и в десятки раз больше, чем в активной зоне реактора ВВР-М. Кроме того, радиальное распределение энерговыделения в экране отличается резкой неравномерностью. Отношение максимального энерговыделения к минимальному составляет 7,15.

Заметное выравнивание энерговыделения по радиусу конвертерной ячейки может быть достигнуто, если концентрацию ²³⁵U в экране постепенно увеличивать по мере приближения к оси канала. Расчетным путем исследованы характеристики подобного канала, экран которого состоял из пяти зон с последовательным 10; 20; 35; 60 и 90%-ным обогащением UO₂. Геометрическая толщина каждого слоя 0,25 см. В этом случае коэффициент перекоса плотности деления в экране составил 1,70; максимальное удельное энерговыделение всего в четыре раза превысило аналогичную величину для активной зоны ВВР-М и совпало с удельным энерговыделением в экспериментальной сборке макетов твэлов. В петлевой сборке, окруженной экраном переменного обогащения, энергетический спектр нейтронов характеризуется медленной энергией по плотности потока 800 кэВ, причем половину делений вызывают нейтроны с энергией выше 10 кэВ. В канале рассматриваемой конструкции происходит дальнейшее выравнивание поля энерговыделения в сборке твэлов: радиальный коэффициент перекоса плотности делений становится равным 1,21. Увеличение оптической толщины экрана до 6,5 приводит к уменьшению среднего удельного энерговыделения в сборке твэлов по сравнению с аналогичной величиной для ранее рассмотренного канала в 1,45 раза и находится на уровне

700—900 Вт/см³ при номинальной мощности реактора ВВР-М. Тепловой поток в экране не должен превышать $0,4 \cdot 10^6$ ккал/(м²·ч).

Таким образом, экспериментальные и расчетные данные позволяют сделать вывод о том, что при использовании петлевых каналов-конвертеров можно существенно увеличить представительность исследований высокообогащенных твэлов в тепловом исследовательском реакторе. В канале с экраном переменного обогащения удается получить наиболее оптимистичные характеристики облучательного устройства с семизлементной сборкой твэлов с сердечником из UO₂ 90%-ного обогащения.

Существенный недостаток каналов рассматриваемой конструкции — необходимость создания сложной жидкометаллической петлевой системы. Хотя тепловые потоки не должны превышать $0,4 \cdot 10^6$ ккал/(м²·ч), создание такой петлевой установки потребует существенной модернизации исследовательского реактора.

Поступила в Редакцию 9/VIII 1974 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыканов В. А. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 2, с. 192.
2. Планкет Ж. и др. III Женевская конф., 1964. Докл. Бельгии № 441.
3. Canad. J. «Nucl. Techn.», 1964, v. 3, p. 61.
4. Minsart G., Motte F. Fast Reactor Physics. V. 1. Vienna, IAEA, 1968, p. 327.
5. Климентов В. Б. и др. «Атомная энергия», 1970, т. 29, вып. 4, с. 283.
6. Климентов В. Б. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 3, с. 309.
7. Копчинский Г. А. и др. «Изв. АН БССР. Сер. физико-энергетических наук», 1971, № 1, с. 22.
8. Климентов В. Б. и др. «Атомная энергия», 1966, т. 20, вып. 1, с. 63.
9. Абагян Л. П. и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.