

ЛИТЕРАТУРА

1. К. П. Стр а у б. Малоактивные отходы (хранение, обработка, удаление). М., Атомиздат, 1966, стр. 8, 236, 242, 258.
2. А. А. Хоникевич. Деактивация сбросных вод радиохимических лабораторий и экспериментальных атомных реакторов. М., Атомиздат, 1966, стр. 72.
3. А. В. Лыков, А. А. Грязнов. Молекулярная сушка. М., Пищепромиздат, 1956, стр. 102.
4. Ф. В. Неволлин. Химия и технология синтетических моющих средств. М., «Пищевая промышленность», 1964.
5. Б. Н. Хрусталеv, В. В. Пушкарев, Н. В. Драницына. «Коллоидн. ж.», 29, 283 (1967).
6. Э. И. Гуйго, Н. К. Журавская, Э. И. Каухчешвили. Сублимационная сушка пищевых продуктов. М., «Пищевая промышленность», 1966, стр. 65.

О почти полном выравнивании энерговыделения по радиусу гетерогенного реактора

Г. А. БАТЬ, В. Н. ГУЛИМОВ, В. К. ОБУХОВ

УДК 621.039.50:621.039.51.519

Одной из основных задач, возникающих при проектировании реактора с прямым термоэмиссионным преобразованием энергии деления в электрическую, является обеспечение однородности поля температур в активной зоне. С нейтроннофизической точки зрения это означает необходимость иметь объемную неравномерность энерговыделения ($k_v - 1$) около 10%. В обычных реакторах ($k_v - 1$), как правило, существенно больше.

Известно небольшое число работ [1—5], посвященных экспериментально-теоретическому исследованию активных зон с почти постоянным полем энерговыделения. В связи с этим были проведены измерения на стенде критических сборок и расчеты по нескольким уже известным программам для ЭВМ. При этом предполагалось не только изучить методы физического профилирования, но и отобрать достаточно простые для массового использования расчетные схемы, которые могут обеспечить необходимую точность предсказания критичности и формы поля энерговыделения для реакторов-преобразователей с водой в качестве замедлителя и теплоносителя.

Конструкция и оборудование критического стенда не отличаются принципиально от конструкции и оборудования других стендов этого типа, за исключением компоновки активной зоны.

Дистанционирующие плиты состоят из центральной дисковой и концентрических кольцевых секций фиксированных размеров. Это позволяет комбинировать диски и кольца с различной плотностью отверстий под твэлы и создавать многозонные по радиусу (до пяти зон) системы с дискретно меняющимся шагом решет-

ки. Отверстия под твэлы в дистанционирующих плитах образуют не гексагональную или квадратную решетки, как обычно, а кольцевую сетку. В каждом последующем кольцевом ряду число отверстий увеличивается на шесть по сравнению с предыдущим; радиусы, на которых расположены оси твэлов, выбраны так, что по площади ячейки кольцевая сетка соответствует гексагональной решетке с шагом a , равным 1,57; 1,89; 2,36; 3,15 см.

В измерениях использовались пять типов твэлов, отличающихся содержанием U^{235} (ρ_5). Каждый твэл разборный и состоял из 16 блочков в покрытии из циркониевого сплава, помещенных в общий стальной кожух диаметром 13 мм. Суммарная длина блочков 976 мм гораздо меньше расстояния между нижней и направляющей плитами. Блочок (диаметр по топливу 7 мм, длина 60 мм) содержали двуокись урана с обогащением 80%, разбавленную алюминиевым порошком так, что количество урана в каждой последующей модификации твэлов приблизительно на 30% больше, чем в предыдущей. Минимальная плотность U^{235} в топливе $\sim 0,5$ г/см³, максимальная $\sim 1,5$ г/см³. Соответственно рассмотрим пять типов твэлов.

Многообразие возможных комбинаций тип твэла — шаг решетки обеспечивает широкие пределы и плавность изменения нейтроннофизических свойств по радиусу активной зоны.

Для повышения точности при изучении распределения энерговыделения была проведена сортировка твэлов каждого типа на максимально однородные партии. Для этого они облучались в полностью симметричных сборках, критичность которых поддерживалась уровнем

воды в баке и одним центральным стержнем-регулятором. Все остальные стержни выводились из активной зоны и могли быть сброшены в воду между твэлами. Осколочная γ -активность твэлов, пропорциональная энерговыделению, измерялась кольцевой ионизационной камерой высотой 110 см, внутренняя стенка которой отсекала α -, β - и большую часть мягкого γ -излучений. Величина сигнала фиксировалась гальванометром на выходе усилителя постоянного тока. Высокая чувствительность и стабильность схемы измерения позволили добиться точности оценки относительной γ -активности осколков деления порядка $\pm 1\%$. Поскольку систематического азимутального изменения энерговыделения не наблюдалось, эти опыты позволили исключить технологический разброс концентрации урана при изготовлении твэлов и проводить дальнейшее изучение радиального распределения энерговыделения с почти такой же точностью.

Измерения высотного распределения потока нейтронов, необходимые для экспериментальной оценки торцовых эффективных добавок δ_z и соответствующей компоненты геометрического параметра B_z^2 , проводились с помощью электрометра СГ-1М. Столб блокочков, составляющих твэл, разбирался, и относительная γ -активность достаточно удаленных от границ активной зоны блокочков обрабатывалась методом наименьших квадратов с привлечением итерационного процесса, учитывающего их конечную длину. Достигнутая точность определения δ_z составляла ± 1 см ($\sim 15\%$).

Для изучения параметров размножения нейтронов в зонах реактора, отличающихся типом твэлов и шагом решетки, а также для первичного отбора программ опыты проводились в три этапа.

На рис. 1 изображены расчетные (кривые) и экспериментальные (точки) результаты первого этапа — данные о критичности однородных сборок. Сплошные линии $a = \text{const}$ последовательно (слева направо) относятся к a , равному 1,57; 1,89; 2,36 и 3,15 см, а пунктирные ($\rho_{05} = \text{const}$, сверху вниз) — соответственно к твэлам пяти типов. Экспериментальные значения $N_{кр}$ удовлетворительно согласуются с результатами расчета, проведенного по четырехгрупповой программе ПРЯНИК-1. Поскольку эта программа очень удобна для массовых вычислений, она была положена в основу обработки всех дальнейших опытов. На втором этапе экспериментов была собрана и обчислена довольно большая серия многозонных по радиу-

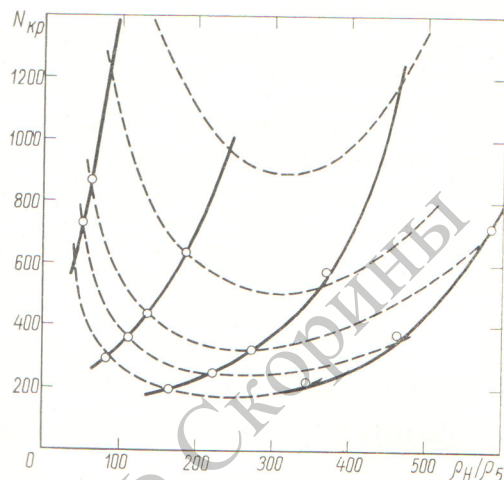


Рис. 1. Зависимость критического числа твэлов $N_{кр}$ от отношения концентраций водорода и U^{235} .

су критических сборок, причем в каждом опыте зоны отличались или только типом твэлов, или шагом решетки.

На рис. 2 и 3 приведены распределения энерговыделения по радиусу двух типичных активных зон с переменным шагом и переменным составом блокочков соответственно. Проведение опытов с переменным составом твэлов необходимо не только для отработки схемы расчета, но и для предварительного изучения возможностей этого способа выравнивания энерговыделения — конструктивно самого удобного и единственно приемлемого для улучшения аксиального распределения мощности. По-види-

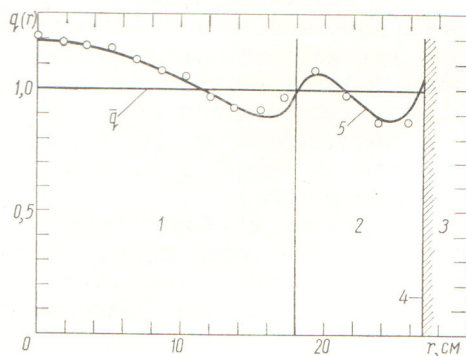


Рис. 2. Распределение энерговыделения по радиусу активной зоны ($a = \text{var}$, $\rho_{05} = \text{const}$): 1 — $a = 1,89$ см; 2 — $a = 2,36$ см; 3 — отражатель (H_2O); 4 — граница активной зоны; 5 — расчет; \circ — эксперимент; ρ_{05} соответствует второму типу твэлов; $k_r^{\text{расч}} = 1,20$, $k_r^{\text{эксп}} = 1,22$.

тому, имеющийся набор блоков достаточен для получения расчетного коэффициента неравномерности $k_r \approx 1,15$. Отметим, что программа РРР-114*, в которую вводились средние по ячейке четырехгрупповые сечения из программы ПРЯНИК-1, оказалась достаточно быстродействующей и точной.

Тщательная отработка методик (как экспериментальных, так и расчетных) открыла возможность перехода к прямому изучению выравнивания энерговыделения, т. е. к третьему этапу исследований.

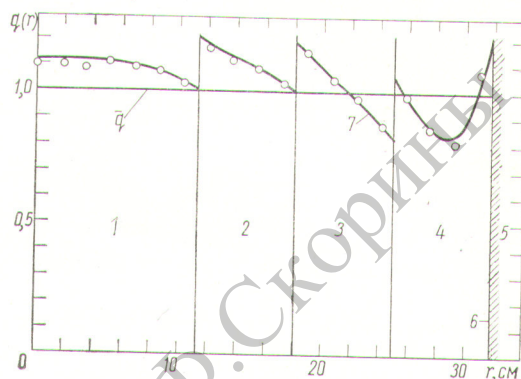
На рис. 4, 5 показаны результаты измерения и расчета** распределения энерговыделения по радиусам двух активных зон с почти одинаковыми размерами и расчетными коэффициентами неравномерности ($k_r = 1,07$). Экспериментальные значения $k_r = q_{\max}/\bar{q}$ равны $1,05 \pm 0,01$ и $1,06 \pm 0,01$ (соответственно для рис. 4 и рис. 5). Ошибка в k_r , равная $\sim 1\%$, обусловлена в основном способом определения q_{\max} , в то время как средняя величина \bar{q} находится с гораздо большей точностью. На рис. 5, а кроме гладкого в пределах зоны распределения $q(r)$ нанесена гистограмма, полученная усреднением расчетного энерговыделения по объему каждого кольца загрузки; она позволяет более детально проследить соответствие вычисленных и измеренных значений q . На рис. 4, б и 5, б приведены также групповые потоки $\Phi^{(n)}(r)$; их зависимость от радиуса еще раз подтверждает различие задач выравнивания энерговыделения и потока тепловых нейтронов $\Phi^{(4)}$ в системах с водородсодержащим замедлителем. Гистограммы 3 на рис. 4, а и 5, а отражают тенденцию к падению концентрации U^{235} с ростом r , характерную для выравнивания энерговыделения шагом решетки, обратную тенденцию внутри каждой из двух отличающихся шагом зон, а также необходимость применения специальных мер на границах этих зон и границах с отражателем.

Несмотря на очевидные различия в структуре зон, «цена выравнивания», определяемая как относительное увеличение загрузки U^{235} по сравнению с однородным реактором тех же размеров и с таким же числом блоков, оказа-

* Программа РРР-114 — расчет реактора в P_1 -приближении, одномерный, четырехгрупповой. Авторы программы Е. С. Глушков и Н. А. Петушкова.

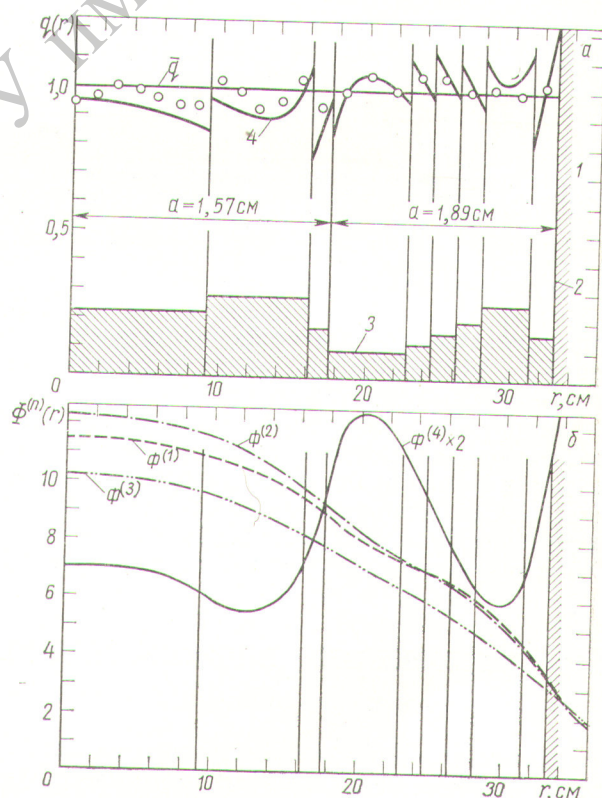
** Некоторое различие данных по распределению энерговыделения в центральной части первой активной зоны (см. рис. 5) объясняется тем, что нарушение регулярности в центральном диске с $a = 1,57$ см в расчете не учитывалось.

лась практически одинаковой и близкой к 30%. Это довольно важный результат, указывающий на возможность выбирать в энергетическом



Р и с. 3. Распределение энерговыделения по радиусу активной зоны ($\rho_{05} = \text{var}$, $\alpha = \text{const}$).

1—4 — зоны, соответствующие первому, второму, третьему и пятому типам твэлов; 5 — отражатель (H_2O); 6 — граница активной зоны; 7 — расчет; \circ — эксперимент; $a = 1,89$ см; $k_r^{\text{расч}} = 1,17$; $k_r^{\text{эксп}} = 1,15$.



Р и с. 4. Распределение энерговыделения (а) и групповых потоков нейтронов (б) по радиусу активной зоны при $k_r = 1,05 \pm 0,01$:

1 — отражатель (H_2O); 2 — граница активной зоны; 3 — гистограмма ρ_{25}/ρ_H ; 4 — расчет; \circ — эксперимент.

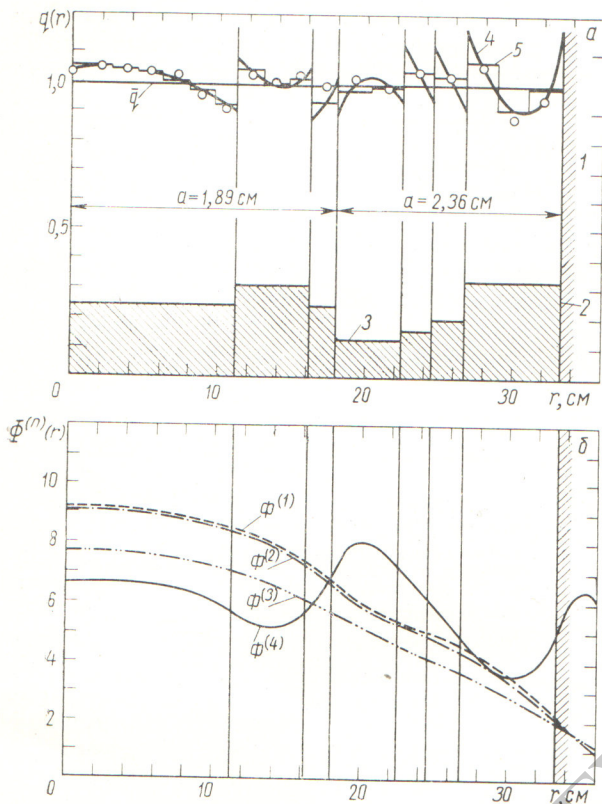


Рис. 5. Распределение энерговыделения (а) и групповых потоков нейтронов (б) по радиусу активной зоны при $k_r = 1,06 \pm 0,01$:

1 — отражатель (H_2O); 2 — граница активной зоны; 3 — гистограмма ρ_s/ρ_H ; 4 — расчет; 5 — расчетная гистограмма энерговыделения; \circ — эксперимент.

аппарате диапазон шагов решетки в соответствии с необходимой поверхностью катодов термоэмиссионных преобразователей.

Кроме описанных систем было изучено еще несколько многозонных систем с переменным шагом и составом блоков, для которых значения k_r лежали в пределах 1,07—1,12, а критические массы — в пределах 10—15 кг U^{235} . Отметим, что простейшие соображения, диктуе-

мые первым приближением теории возмущений, оказались недостаточными при экспериментальном подборе выравненных систем: замена твэлов в каком-либо кольце более «легкими» или «тяжелыми» меняет энерговыделение не только в этом кольце, но и в соседних.

Полученные значения k_r и «цены выравнивания» нельзя считать наилучшими даже для имеющегося набора твэлов и решеток. Поскольку выбор активных зон был основан на интуитивных соображениях и их проверке, а не на расчетах по оптимизирующей программе, не исключена возможность дальнейшего улучшения результатов — снижение k_r , «цены выравнивания» и уменьшение числа зон. Замена водяного отражателя бериллиевым также упрощает задачу.

Однако следует помнить, что при осуществлении объемного выравнивания заметно улучшить торцовый отражатель невозможно, а из двух параметров — состава блока и шага решетки — вдоль оси аппарата можно менять только первый.

В заключение авторы благодарят Ф. В. Кондратьева за постоянный интерес и содействие в работе, Е. П. Скороход и Н. М. Трухачева — за помощь в расчетах, а также Л. В. Константинова, Л. В. Решетина, В. Ф. Сачкова, В. И. Шмелева, А. С. Байкова, В. К. Гладкова, Ю. С. Тегина — за участие в проведении экспериментов.

Поступила в Редакцию 6/X 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Пономарев-Степной, Е. С. Глушков. «Атомная энергия», 11, 19 (1961).
2. Н. Н. Пономарев-Степной. «Атомная энергия», 12, 415 (1962).
3. Н. Н. Пономарев-Степной, Е. С. Глушков. «Атомная энергия», 12, 418 (1962).
4. А. К. Красин, Е. И. Инютин. «Атомная энергия», 18, 175 (1965).
5. Е. С. Глушков, Н. Н. Пономарев-Степной. «Атомная энергия», 20, 478 (1966).

Нейтронметрия влажности пахотного слоя почв

В. А. ЕМЕЛЬЯНОВ, В. И. СИНИЦЫН, Л. И. БЕСКИН, Ю. К. ЕВСЕЕВ

УДК 631.42

Из всех известных полевых способов определения влажности больше всего соответствует современным технико-экономическим требованиям нейтронный метод, применяемый во многих странах. Нейтронные влагомеры позволяют быстро определять значения влажности почв

in situ при малых затратах времени и труда. Однако практика показала, что поверхностным нейтронным влагомерам известных конструкций, у которых система источник — детектор располагается на поверхности почвы (рис. 1, а), присущи большие погрешности при анизотроп-