

УДК 621.039.516.22

Исследование пространственной неравномерности выгорания топлива в кассетах ВВЭР

ГОЛУБЕВ Л. И., ГОРОБЦОВ Л. И., КУЛАКОВ Г. А., СИМОНОВ В. Д., СУНЧУГАШЕВ М. А.

С ростом средней глубины выгорания топлива, выгружаемого из ядерного реактора, снижается топливная составляющая себестоимости электроэнергии, производимой на АЭС. Одним из действенных средств увеличения средней глубины выгорания топлива является уменьшение пространственной неравномерности выгорания в кассетах реактора. В связи с этим целесообразно детальное экспериментальное исследование особенностей выгорания топлива в кассетах реакторов ВВЭР НВАЭС и установление влияния различных факторов на неравномерность выгорания по высоте и сечению кассет. Данные таких исследований существенно дополняют и уточняют расчетные значения ряда нейтронно-физических характеристик и позволяют совершенствовать структуру активных зон реакторов.

Метод изучения. Выбор изотопов для анализа. Анализ неравномерности выгорания топлива по кассете проводился по результатам измерений пространственного распределения концентрации осколков деления. Их измерение проводилось неразрушающим γ -спектрометрическим методом с использованием полупроводникового Ge(Li)-детектора и многоканального амплитудного анализатора.

Для этого использовались изотопы ^{137}Cs , ^{134}Cs и ^{106}Ru . Обоснование выбора данных изотопов [1, 2] кратко заключается в следующем:

1. Количество образовавшихся в процессе работы ядер ^{137}Cs прямо пропорционально выгоранию топлива. Следовательно, пространственное распределение ^{137}Cs будет характеризовать неравномерность выгорания топлива.

2. Выход изотопа ^{106}Ru из ^{239}Pu почти в 12 раз больше, чем из ^{235}U , поэтому пространственное распределение ^{106}Ru может служить характеристикой выгорания ^{239}Pu .

3. ^{134}Cs образуется в топливе в основном за счет активации изотопа ^{133}Cs (непосредственный выход ^{134}Cs при делении пренебрежимо мал). Поэтому количество образовавшегося ^{134}Cs пропорционально квадрату интегрального потока тепловых нейтронов [2].

Вычисление площадей фотопиков перечисленных изотопов проводилось методом поканаль-

ного суммирования с вычитанием линейно-аппроксимированного γ -фона. Обработке подвергались фотопики ^{137}Cs , ^{106}Ru и ^{134}Cs с энергией 661,6; 622,1; 604,7 и 796 + 801 кэВ соответственно. Погрешность в определении активности перечисленных изотопов не превышала 3% для ^{137}Cs и ^{134}Cs и 5% для ^{106}Ru . Обработка результатов проводилась с помощью ЭВМ «Наири».

Пространственное распределение выгорания по кассете. Оно определялось на основании измерения γ -спектров отдельных твэлов данной кассеты. Установка, на которой проводились измерения, описана в работе [1].

Каждый твэл измерялся в десяти равностоящих по высоте точках (через 25 см). По результатам измерений строились распределения осколков по высоте твэлов. В исследованных кассетах измерениям подвергались 20 твэлов. Распределение осколков по сечению кассет строилось как распределение среднего содержания осколков в каждом отдельном твэле; усреднение высотного распределения осколков по всем твэлам дает их распределение по высоте кассеты.

Для характеристики распределения осколков использовались коэффициенты неравномерности по высоте k_z и диаметру k_d , которые определялись как отношение максимальной площади фотопика к ее среднему значению:

$$k_z = \frac{S_{z \text{ макс}}}{S_{z \text{ ср}}}; \quad k_d = \frac{S_{d \text{ макс}}}{S_{d \text{ ср}}}$$

Распределение выгорания топлива по высоте кассет. На рис. 1 изображены распределения изотопов ^{137}Cs , ^{106}Ru и ^{134}Cs по высоте кассеты первого блока НВАЭС, полученные усреднением распределений 20 исследованных твэлов. Среднее расчетное выгорание [3] топлива в этой кассете составляет 17,5 кг/т U, что удовлетворительно согласуется с экспериментальным значением $18,9 \pm 2,6$ кг/т U работы [1]. Высотные распределения ^{137}Cs , ^{106}Ru , ^{137}Cs характеризуются следующими коэффициентами неравномерности: $k_z = 1,30 \pm 0,02$; $1,46 \pm 0,05$; $1,56 \pm 0,05$ соответственно. Неравномерность распределения ^{137}Cs хорошо согласуется с расчетным коэффициентом неравномерности выгорания $k_z = 1,29$.

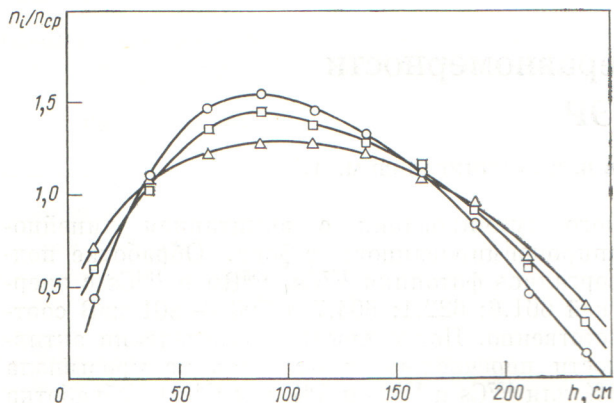


Рис. 1. Относительное распределение ^{137}Cs (Δ), ^{106}Ru (\square) и ^{134}Cs (\circ) по высоте h кассеты первого блока НВАЭС

Максимальное выгорание топлива наблюдается на участке 80—110 см от низа кассеты (см. рис. 1), т. е. ниже середины активной зоны. Смещение обусловлено воздействием регулирующих кассет.

На рис. 2 приведены распределения тех же изотопов по высоте кассеты второго блока НВАЭС (расчетное выгорание $19,1 \text{ кг/т U}$, экспериментальное $22,6 \pm 2,4 \text{ кг/т U}$). Неравномерность распределений в этом случае заметно меньше, чем в предыдущем: $k_z = 1,47 \pm 0,01$; $1,23 \pm 0,02$; $1,30 \pm 0,02$ для ^{137}Cs , ^{106}Ru и ^{134}Cs соответственно. Это объясняется тем, что на втором блоке НВАЭС большая часть избыточной реактивности компенсируется растворенной в теплоносителе борной кислотой и при работе на мощности почти все твердые поглотители полностью выведены из активной зоны. Максимум выгорания топлива здесь, хотя и менее ярко выражен, остается смещенным книзу. Однако в ходе работы реактора

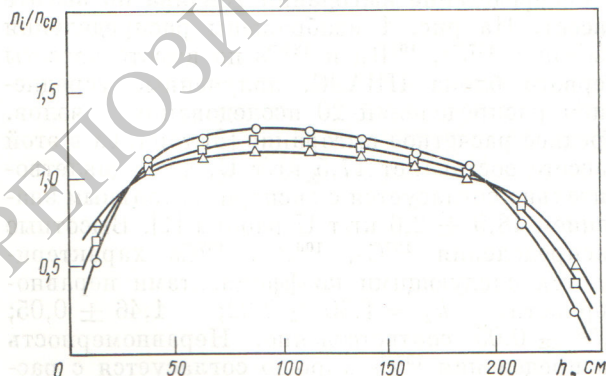


Рис. 2. Относительное распределение осколков по высоте h кассеты второго блока НВАЭС (обозначения, как на рис. 1)

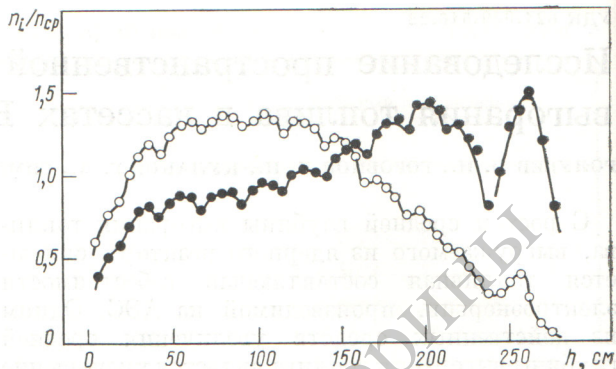


Рис. 3. Относительное распределение потока тепловых нейтронов по высоте h активной зоны реактора второго блока НВАЭС в начале (\circ) и в конце кампании (\bullet)

происходит перемещение максимума энерговыделения в верхнюю часть кассет. Это подтверждают данные рис. 3, на котором представлены высотные распределения потока тепловых нейтронов в начале и конце кампании, полученные по активации медных проволок в измерительном канале реактора второго блока. Локальные минимумы распределения на рис. 3 отражают влияние на нейтронный поток дистанционирующих решеток из нержавеющей стали.

Распределение выгорания топлива по сечению кассет. В активных зонах ВВЭР имеется ряд особенностей, обуславливающих неравномерное по сечению кассеты выгорание топлива в твэлах. К их числу следует отнести водяные зазоры на внешней границе и в центральной части кассеты, соседство кассет различного обогащения и выгорания, а также органов регулирования.

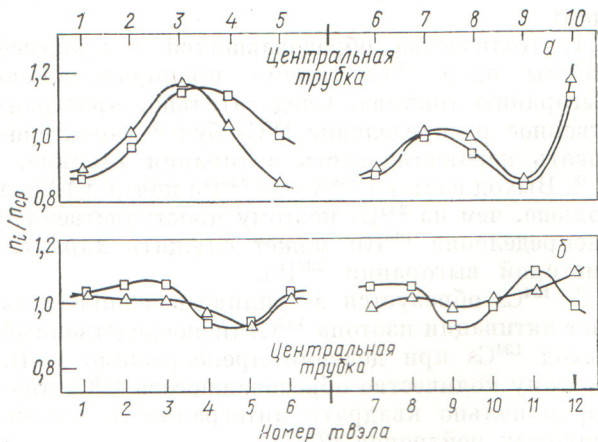


Рис. 4. Относительное распределение ^{137}Cs (Δ) и ^{106}Ru (\square) по сечению кассет первого (а) и второго блоков (б) НВАЭС

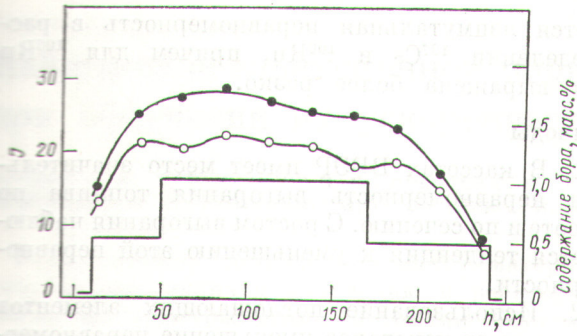


Рис. 5. Относительное распределение ^{137}Cs по высоте h твэлов № 1 (●) и № 4 (○) и содержание бора по высоте пэла (—)

На рис. 4 представлены распределения изотопов ^{137}Cs и ^{106}Ru по сечению изучавшихся кассет первого и второго блоков НВАЭС. На кривых распределения осколков по диаметру кассеты первого блока наблюдается повышенное выгорание в наиболее удаленных от водяных зазоров твэлах №№ 3, 7 и 8, а также в твэле № 10, ближе других расположенном к стержню аварийной защиты реакторов. Наблюдаемая неравномерность выгорания топлива по сечению кассеты обусловлена изменением жесткости спектра нейтронов по сечению кассеты.

Для кассет второго блока, где вода содержит борный поглотитель, выгорание топлива по сечению кассеты более равномерно.

Влияние пэлов на распределение выгорания по кассете. Поглощающие элементы (пэлы) ВВЭР, применяемые для компенсации избыточной реактивности выгорающим поглотителем, представляют собой циркониевые стержни с присадкой бора и размещаются среди твэлов в кассетах. Содержание бора спрофилировано по высоте пэла.

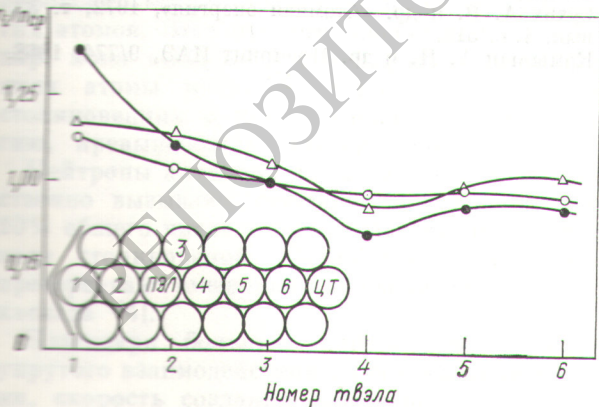


Рис. 6. Распределение энерговыделения по радиусу кассет с пэлами при различных выгораниях, кг/т U: ● — 0,4; △ — 9,6; ○ — выгорание 22

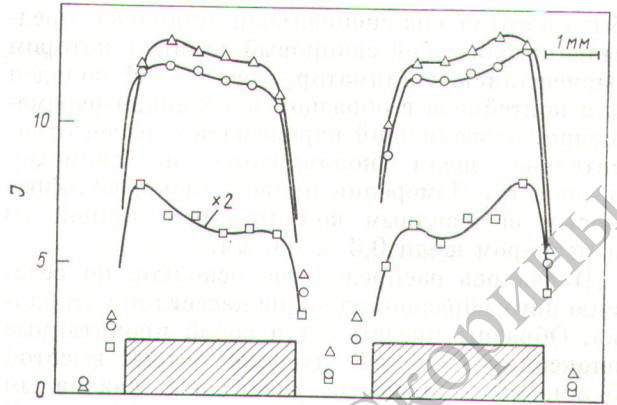


Рис. 7. Относительное распределение активности осколков I по диаметру образца № 1 при выгорании 19,3 кг/т U: △ — ^{137}Cs ; □ — ^{106}Ru ; ○ — ^{134}Cs

На рис. 5 приведены распределения ^{137}Cs по высоте твэла № 4, стоящего рядом с пэлом, и по высоте твэла № 1, удаленного от пэла (см. картограмму рис. 6). Хотя выгорание топлива по высоте твэла № 4 распределено более равномерно, чем в твэле № 1, глубина выгорания в твэле № 4 на 20% меньше.

Присутствие пэла вносит значительную неравномерность в распределение выгорания топлива по сечению кассеты (рис. 6). Это явилось одной из причин отказа от применения пэлов.

Распределение осколков деления по сечению твэлов. Для выявления особенностей выгорания топлива в твэле изучалось также распределение осколков деления по их сечению. Для этого

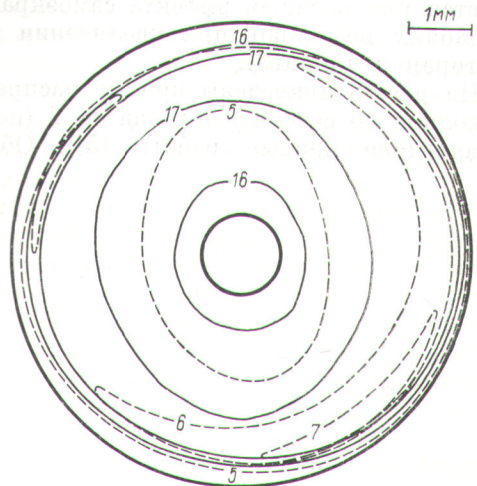


Рис. 8. Относительное распределение ^{137}Cs (—) и ^{106}Ru (---) по сечению образца № 2 при выгорании 32,2 кг/т U (цифрами обозначены значения равной интенсивности)

была изготовлена специальная установка, представляющая собой свинцовый домик, в котором размещались коллиматор, посадочный колодец для контейнера с образцом и механизм перемещения, позволявший перемещать образец относительно щели коллиматора по диаметру и азимуту. Измерения проводились с вольфрамовым щелевидным коллиматором длиной 70 и размером щели $0,3 \times 0,6$ мм.

Изучалось распределение осколков по сечению двух образцов одной из кассет второго блока. Образцы представляли собой пропитанные эпоксидной смолой кусочки твэла высотой 5 мм, вырезанные из участков с различным выгоранием (расчетное выгорание 19,3 кг/т U в образце № 1 и 32,2 кг/т U в образце № 2).

Распределение осколков деления по одному из диаметров образца № 1 приведено на рис. 7, откуда видно, что распределение осколков спадает от периферии образца к центру, что подтверждает наличие эффекта самоэкранировки. Коэффициент неравномерности, усредненный по шести диаметрам, для ^{137}Cs составляет 1,08; для ^{106}Ru — 1,25. Распределение ^{106}Ru , являющегося монитором выгорания ^{239}Pu , характеризует самоэкранировку потока резонансных нейтронов, так как ^{239}Pu образуется в основном при захвате ядрами ^{238}U резонансных нейтронов. Неравномерность в распределении осколков деления по диаметру образца № 2, имеющего большее выгорание, носит тот же характер, что и в образце № 1, но выражена менее резко: k_d для ^{137}Cs и ^{106}Ru равен 1,05 и 1,21 соответственно. Это, очевидно, объясняется уменьшением эффекта самоэкранировки тепловых нейтронов при увеличении глубины выгорания топлива.

На рис. 8 приведены кривые распределения осколков по сечению образца № 2 (построены аналогично кривым работы [5]). Обнаружи-

вается азимутальная неравномерность в распределении ^{137}Cs и ^{106}Ru , причем для ^{106}Ru она выражена более резко.

Выводы

1. В кассетах ВВЭР имеет место значительная неравномерность выгорания топлива по высоте и по сечению. С ростом выгорания наблюдается тенденция к уменьшению этой неравномерности.

2. Использование поглощающих элементов хотя и дает некоторое уменьшение неравномерности выгорания по высоте, однако приводит к увеличению неравномерности по сечению кассеты и существенному уменьшению глубины выгорания в соседних твэлах.

3. Применение борного регулирования приводит к существенному уменьшению неравномерности выгорания топлива как по высоте, так и по сечению кассет.

4. Наблюдается значительная неравномерность выгорания топлива по сечению твэлов, обусловленная наличием эффекта самоэкранировки. Обнаружена заметная азимутальная асимметрия в выгорании по сечению твэла, особенно ярко выраженная для выгорания ^{239}Pu , о чем свидетельствует распределение ^{106}Ru .

Поступила в Редакцию 3/1 1975 г.

В окончательной редакции 1/X 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миллер О. А. и др. «Атомная энергия», 1969, т. 27, вып. 4, с. 281.
2. Eder O., Lammer M. In Proc. IAEA Symp.: «Nuclear Data in Science and Technology», Vienna, 1973, v. 1, p. 233.
3. Сидоренко В. Д., Беляева Е. В. Препринт ИАЭ, 29/895, 1966.
4. Сухих А. В. и др. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 4, с. 318.
5. Камышан А. Н. и др. Препринт ИАЭ, 9/774, 1968.

