

направление отчетной документации о ЯМ в национальную службу учета ЯМ (или МАГАТЭ).

2. Максимально возможная степень автоматизации учета на основе обеспечения отдела достаточно совершенной вычислительной техникой и соответствующими программами (например, «НУМИС-2»).

3. Хранение учетных данных на устройствах внешней памяти ЭВМ (магнитные ленты, диски, перфокарты), которые вместе с распечатками записанной на них информации являются учетными документами АЭС.

4. Представление указанных в п. 3 документов в качестве отчетных для последующей непосредственной обработки их Информационной системой национальной службы учета (или МАГАТЭ).

5. Автоматизация обработки данных эксплуатации реактора или контрольных экспериментов, которые при необходимости могут использоваться для проверки точности учета.

Использование этих принципов позволило бы создать эффективную, устойчиво функционирующую систему учета ЯМ.

Отметим, что реализация п. 4 зависит не только от администрации АЭС, но и от готовности национальной службы учета. Тем не менее подобную возможность следует заранее предусмотреть в системе учета АЭС.

Заключение. Автоматизированная система учета ЯМ на основе программы «НУМИС-2» находится в настоящее время в стадии внедрения на НВАЭС. Параллельно ведется работа по созданию новой модификации программы, которая позволит проводить учет ЯМ на ЭВМ единой серии, создаваемой в странах — членах СЭВ. В перспективе учетную программу предпола-

гается использовать как составную часть единой автоматизированной системы управления АЭС.

Программа «НУМИС-2» была апробирована при проведении учета ЯМ применительно к первой топливной загрузке IV блока НВАЭС. Была подтверждена целесообразность автоматизации процессов обработки и хранения информации о ЯМ и размещения всей необходимой учетной документации АЭС на общепринятых носителях информации ЭВМ. Эти же документы в принципе могут быть использованы в качестве отчетных для представления в национальную службу учета (или МАГАТЭ) и их последующей непосредственной обработки учетной программой соответствующей Информационной системы. Таким образом, система учета становится «замкнутой», и это позволяет считать ее перспективной.

Следует заметить, что предлагаемая система учета ЯМ отвечает основным требованиям, предъявляемым МАГАТЭ к проведению учета на АЭС и порядку отчетности по установкам, находящимся под контролем Агентства.

Авторы благодарны О. А. Миллеру и В. Б. Фортакову, а также группе специалистов НВАЭС во главе с Л. И. Голубевым за ряд ценных советов.

Поступила в Редакцию 9.XI.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. INFCIRC/153, МАГАТЭ, Австрия, 1971.
2. Овчинников Ф. Я. и др. Эксплуатация реакторных установок Нововоронежской АЭС. М., Атомиздат, 1972.
3. Десятилетний опыт эксплуатации Нововоронежской АЭС. Материалы научно-технической конференции Главатомэнерго. Нововоронеж, 1974.
4. Скворцов С. А. и др. Отчет по контракту МАГАТЭ, № 994, 1972.
5. Петрунин Д. М. и др. Препринт ИАЭ-2518. М., 1975.

УДК 621.039.577:621.039.566

Гамма-спектрометрический экспериментально-расчетный метод исследования нейтронного поля и выгоревшего топлива в твэлах ВВЭР

ЗЫКОВ К. И., ГОЛУБЕВ Л. И., КУЛАКОВ Г. А.

Экспериментальные исследования зависимости накопления некоторых продуктов деления от выгорания топлива показали, что изменение спектра нейтронов в пределах кассеты существенно влияет на накопление продуктов деления [1]. Обнаруженные в работах [2, 3] некоторые

особенности выгорания топлива (особенно ^{239}Pu) могут быть объяснены только изменением спектра по сечению и высоте кассеты. Таким образом, с одной стороны, при определении характеристик выгоревшего топлива по накоплению продуктов деления необходимо учиты-

вать влияние нейтронного спектра в каждом конкретном случае, а с другой — открывается принципиальная возможность изучать изменение нейтронного спектра в активной зоне по накоплению тех или иных продуктов деления.

Для реализации этой возможности были проведены расчетные исследования зависимости накопления некоторых продуктов деления от потока тепловых нейтронов (φ_T), отношения потоков надтепловых и тепловых нейтронов на единицу латаргии (α) и эффективной температуры нейтронного газа (T_n). Анализу подвергались 9 продуктов деления, γ -линии которых могут быть выделены в спектре выгоревшего топлива: ^{140}Ba , ^{140}La , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{144}Ce , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{106}Ru , ^{154}Eu . Основа расчетов — обычные, нормированные на тепловый нейтронный поток одnogрупповые дифференциальные уравнения накопления изотопов при делении ^{235}U и ^{239}Pu . Все нейтронные сечения, входящие в уравнения представлялись в виде

$$\sigma = \sigma_T + \alpha I, \quad (1)$$

где I — эффективный резонансный интеграл; σ_T — сечение тепловой группы, определяемое через эффективную нейтронную температуру, как описано в работе [1]. Указанные уравнения при постоянных во времени φ_T и α легко решаются, однако конечные выражения для накопления продуктов деления здесь не приводятся ввиду их громоздкости. Отметим только, что накопления продуктов деления есть некоторые функции от φ_T и α .

Ранее рядом авторов [4—6] предпринимались попытки одновременного определения нескольких неизвестных условий облучения топлива по накоплениям продуктов деления. Например, в работе [6] решается задача с двумя неизвестными величинами: нейтронным потоком и временем облучения, которые можно определить, измерив концентрации некоторых продуктов деления в отработавшем топливе. Наши расчетные исследования показали, что с точки зрения одновременного определения φ_T и α при времени облучения от нескольких месяцев до трех лет (такой интервал наиболее часто встречается в ВВЭР) с учетом возможности измерения интенсивности γ -излучения того или иного продукта деления без больших практических трудностей из 9 указанных выше продуктов деления наиболее полезными являются ^{137}Cs и ^{134}Cs . Накопления этих продуктов деления являются хорошо выраженными и существенно различными функциями от φ_T и α , что позволяет надежно

определять последние, если известны концентрации ^{137}Cs и ^{134}Cs в отработавшем топливе.

Зависимость накопления ^{137}Cs и ^{134}Cs от температуры нейтронов выражена несравненно слабее, чем от φ_T и α . Были рассчитаны накопления ^{137}Cs и ^{134}Cs при изменении T_n от 300 до 900 °С и φ_T от $2 \cdot 10^{12}$ до $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и времени облучения от нескольких месяцев до трех лет. Оказалось, что при любых фиксированных значениях φ_T и времени облучения и при изменении T_n от 300 до 900 °С накопления ^{137}Cs и ^{134}Cs изменяются не более чем на 20%. Для расчета концентрации этих изотопов всегда можно ориентировочно задать T_n так, чтобы возможное отклонение этого значения от истинного не сказалось на накоплениях ^{137}Cs и ^{134}Cs .

На рис. 1 показаны расчетные кривые для измерения концентраций ^{137}Cs (^{137}N) и ^{134}Cs (^{134}N) в кассете 3%-ного обогащения второго блока Нововоронежской АЭС (НВАЭС) при

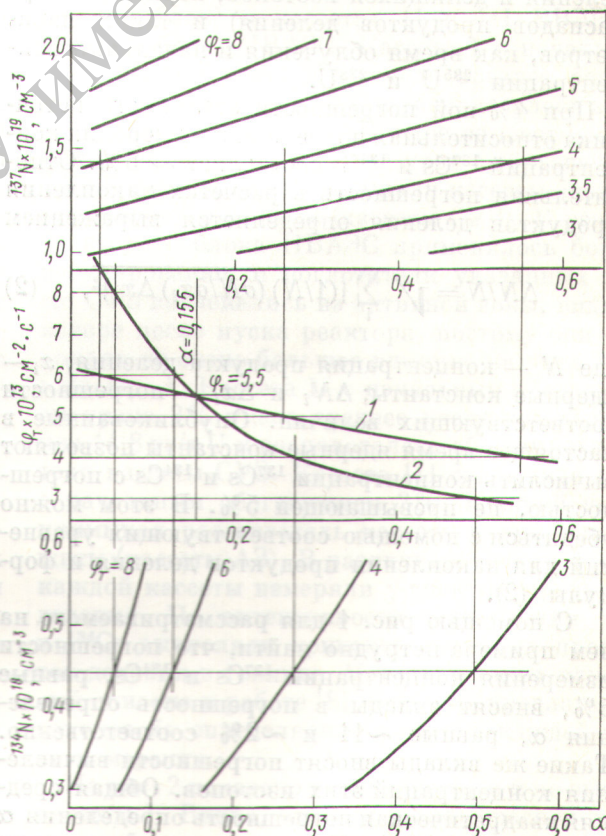


Рис. 1. Определение φ_T и α по накоплению ^{137}Cs и ^{134}Cs в выгоревшем топливе (кривые φ_T (α) — это линии постоянных концентраций ^{137}Cs (1) и ^{134}Cs (2). Точка их пересечения дает значение φ_T и α в месте измерения)

времени облучения 275 сут в зависимости от Φ_T и α и возможность определения последних по измеренным концентрациям указанных изотопов. Необходимо подчеркнуть, что получаемые значения Φ_T и α являются средними за весь период облучения топлива и для их определения необходимо знать время облучения.

Таким образом, Φ_T и α можно рассматривать как некоторые функции накопления ^{137}Cs и ^{134}Cs . Точность определения Φ_T и α зависит от точности γ -спектрометрических измерений точности расчетов концентраций этих изотопов и от характера зависимости накоплений продуктов деления от Φ_T и α . Точность измерения γ -спектрометрическим способом концентраций ^{137}Cs и ^{134}Cs определяется в основном точностью применяемого эталонного источника, а точность вычисления накопления этих продуктов деления — точностью используемых для этого ядерных констант (выходов изотопов при делении ^{235}U и ^{239}Pu , нейтронных сечений продуктов деления и делящихся изотопов, периодов полураспадов продуктов деления) и таких параметров, как время облучения и начальные концентрации ^{235}U и ^{238}U .

При 4%-ной погрешности эталонного источника относительная погрешность измерения концентраций ^{137}Cs и ^{134}Cs составляет $\sim 5\%$. Относительная погрешность в расчетах накопления продуктов деления определяется выражением

$$\Delta N/N = \sqrt{\sum_i [(1/N) (\partial N/\partial x_i) \Delta x_i]^2}, \quad (2)$$

где N — концентрация продукта деления; x_i — ядерные константы; ΔN_i и Δx_i — погрешности соответствующих величин. Опубликованные в настоящее время ядерные константы позволяют вычислить концентрации ^{137}Cs и ^{134}Cs с погрешностью, не превышающей 5%. В этом можно убедиться с помощью соответствующих уравнений для накопления продуктов деления и формулы (2).

С помощью рис. 1 для рассматриваемого на нем примера нетрудно найти, что погрешности измерения концентраций ^{137}Cs и ^{134}Cs , равные 5%, вносят вклады в погрешность определения α , равные ~ 11 и $\sim 2\%$ соответственно. Такие же вклады вносят погрешности вычисления концентраций этих изотопов. Общая средняя квадратическая погрешность определения α составляет $\sim 16\%$. При указанных условиях средняя квадратическая погрешность определения Φ_T составит $\sim 10\%$. Величина α определяется с меньшей точностью по сравнению с Φ_T ,

так как накопление ^{137}Cs сравнительно слабо зависит от α .

Если для измерения концентраций ^{137}Cs и ^{134}Cs использовать эталонный источник с погрешностью 1%, то суммарные погрешности значений α и Φ_T будут в основном определяться погрешностями расчета концентраций этих изотопов и для рассматриваемого примера будут равны ~ 11 и $\sim 7\%$ соответственно. Кроме того, точность определения α и Φ_T можно повысить, если использовать для расчетов накопления продуктов деления более точные ядерные константы. Таким образом можно определить с приемлемой точностью без разрушения твэлов средние за период облучения топлива значения α и Φ_T , измеряя интенсивность γ -излучения ^{137}Cs и ^{134}Cs , для этого целесообразно создать специальную вычислительную программу.

Если принять, что энергетическая граница тепловых и надтепловых нейтронов составляет 0,5 эВ (табличные значения резонансных интегралов определены обычно от этой границы), то точность определения абсолютных величин Φ_T и α будет зависеть от точности оценки σ_T и I . Так как реальный спектр нейтронов в точке измерения не известен, такую оценку можно провести только в каком-либо приближении, например σ_T определить для максвелловского спектра через эффективную температуру нейтронов, а I для спектра $1/E$. Характер зависимостей накоплений ^{137}N и ^{134}N от Φ_T и α (см. рис. 1), а также от выгорания топлива (см. работу [1]) таков, что отклонения полученных значений Φ_T и α , с одной стороны, и σ_T и I — с другой, от истинных будут всегда иметь противоположные знаки.

В выражении $\Phi_T (\sigma_T + \alpha I) = \Phi_T \sigma$ противоположные по знаку погрешности в $\sigma_T I$ и $\Phi_T \alpha$ по крайней мере частично компенсируются. Величина $\sigma \Phi_T$ интересна тем, что она входит во все расчетные выражения для изменения концентрации и числа выгоревших ядер любых делящихся изотопов [например, $^{235}\text{N} = ^{235}\text{N}_0 \times \exp(-\sigma_a^{235} \Phi_T t_{\text{обл}})$]. В связи с этим предлагаемый метод неразрушающего определения Φ_T и α по измерению интенсивности γ -излучения ^{137}Cs и ^{134}Cs рекомендуется для того, чтобы полученные значения Φ_T и α использовать в дальнейшем для вычисления накопившихся и выгоревших ядер делящихся изотопов. Это намного ускорит исследование выгоревшего топлива и облегчит контроль за делящимися изотопами. Непосредственное измерение концентрации делящихся изотопов в выгоревшем топливе (например, масс-спектрометрическим методом) — очень трудно-

емкий процесс, связанный с необходимостью контакта с сильно активным материалом, и невозможен без разрушения твэлов.

Преимущество данного метода перед существующим, основанным на известных зависимостях содержания изотопов [например, $Pu = Pu(^{137}Cs)$ или $Pu = Pu(^{137}Cs/^{134}Cs)$], заключается в том, что эти зависимости не являются универсальными. Так, определенному содержанию ^{137}Cs или отношению содержаний ^{137}Cs и ^{134}Cs могут соответствовать различные содержания плутония, если облучение проводилось в различных нейтронных спектрах, т. е. указанными зависимостями можно воспользоваться лишь в том случае, если известно, какие параметры нейтронного спектра были во время облучения топлива в данной точке активной зоны. Экспериментальные же данные [1—3] дают основание предполагать, что нейтронный спектр может заметно изменяться в пределах не только активной зоны, но и одной топливной кассеты. Предлагаемый метод позволяет определить основные средние за период облучения параметры нейтронного спектра φ_T и α , с помощью которых накопление и выгорание ядер делящихся изотопов легко вычисляется.

Для одного из твэлов кассеты первого блока НВАЭС масс-спектрометрическим методом были определены количество разделившегося ^{235}U , общее количество разделившегося топлива, концентрации ^{235}U и ^{239}Pu с погрешностью 5, 10—15, 5 и 10% соответственно. Результаты опубликованы в работе [7]. Предварительно у этого же твэла была измерена интенсивность γ -излучения ^{137}Cs и ^{134}Cs , для проверки предлагаемого способа определены перечисленные выше характеристики. Расхождение тех и других результатов позволяет утверждать, что γ -спектрометрический метод дает погрешность не более 15%.

Предлагаемый метод может оказаться полезным также для изучения относительного пространственного изменения φ_T и α в топливных кассетах и активной зоне реакторов (изменения от твэла к твэлу или по высоте отдельных твэлов). Точность определения абсолютных значений α и φ_T зависит от точности эталонного источника и ядерных констант. Эти факторы вносят систематические погрешности в измеренные и рассчитанные концентрации ^{137}Cs и ^{134}Cs и, следовательно, в значения φ_T и α . Очевидно, при относительных измерениях, т. е. при сравнении φ_T и α в разных точках активной зоны эти систематические погрешности будут мало искажать картину изменения φ_T и α в пространстве.

Погрешность относительных измерений будет определяться лишь теми погрешностями в измерении интенсивности илучения ^{137}Cs и ^{134}Cs , которые носят статистический характер, а именно: счетом импульсов в пиках полного поглощения γ -спектров продуктов деления, соответствующих излучению ^{137}Cs и ^{134}Cs , соотношениями высоты этих пиков высотам комптоновских распределений и наложениями соседних пиков. Если использовать для измерения γ -линии ^{137}Cs и ^{134}Cs с энергиями соответственно 660 и 796 кэВ, то при счете в пиках более 10 000 импульсов указанные погрешности приближаются к 1%. С помощью рис. 1 можно найти, что погрешности измеренных концентраций ^{137}Cs и ^{134}Cs , равные 1%, вносят вклады в погрешность определения α , равные ~ 2 и $\sim 0,5$ % соответственно. Средняя квадратическая погрешность определения α и φ_T при относительных измерениях составит ~ 3 и ~ 2 %.

Относительное пространственное изменение φ_T и α было исследовано в кассете I ВВЭР-365 (второй блок) и кассетах II и III ВВЭР-210 (первый блок) НВАЭС. Кассета I с начальным обогащением урана 3% имела среднее расчетное выгорание ~ 8 кг/т U и располагалась вблизи края активной зоны. Четыре из шести соседних с ней кассет содержали уран с обогащением 2%. К двум граням примыкали кассеты системы управления и защиты (кассеты СУЗ). В реакторе второго блока НВАЭС применялось борное регулирование, и поглотители указанных кассет СУЗ извлекались из активной зоны, видимо, вскоре после пуска реактора, поэтому они оказывали не очень большое влияние на выгорание в кассете I. Кассета II с начальным обогащением урана 2% имела среднее расчетное выгорание 14,8 кг/т U и располагалась вблизи поглотителя кассеты СУЗ. Кассета III содержала уран с начальным обогащением 2%, к одной грани примыкал рассеиватель кассеты аварийной защиты (кассеты АЗ). В различных точках твэлов каждой кассеты измеряли γ -спектры продуктов деления. По интенсивности γ -излучения ^{137}Cs и ^{134}Cs вычисляли концентрации этих продуктов деления в топливе. Методика таких измерений описана в работе [8]. Затем по предлагаемому способу определялись φ_T и α в каждой точке измерения.

На рис. 2 показано изменение φ_T и α по высоте кассеты I. Видно, что для твэлов, расположенных вблизи поглощающих элементов (пэл), φ_T меньше, а α больше, чем в твэлах, удаленных от пэлов. Для твэлов, удаленных от пэлов, распределение α по высоте кассеты имеет ряд

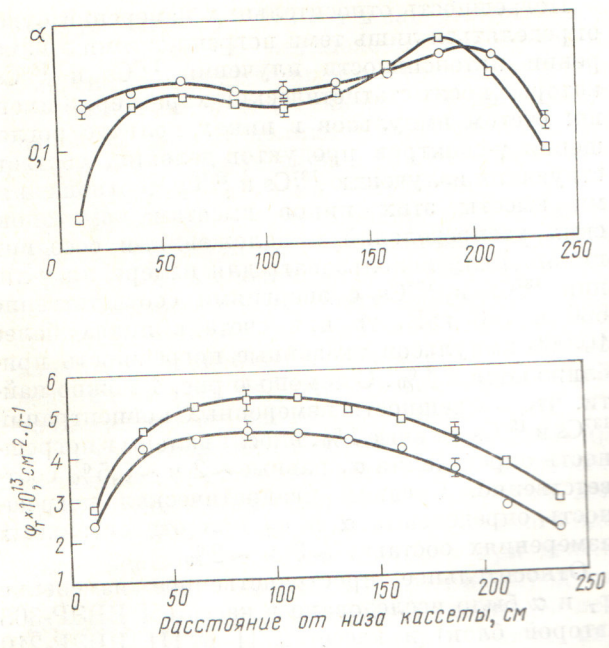


Рис. 2. Изменение ϕ_T и α по высоте кассеты I в среднем для исследованных твэлов, расположенных вблизи (○) и наиболее далеко (□) от пэлов

интересных особенностей. По крайней мере, на расстоянии 12,5 см от концов кассеты α существенно уменьшается. Отсюда следует, что влияние отражателя активной зоны на изменение нейтронного спектра по высоте зоны простирается гораздо дальше, чем это обычно принято считать. Небольшое уменьшение α примерно в середине кассеты можно объяснить выгоранием топлива и уменьшением в связи с этим ее поглощающих свойств, что должно привести к смягчению спектра (уменьшению α).

На рис. 2 видно также, что для твэлов, далеко отстоящих от пэлов, в точках, одинаково удаленных от концов кассеты, α несколько больше вверху, чем внизу. Это можно объяснить влиянием поглотителей СУЗ, ужесточающих нейтронный спектр в активной зоне тем больше, чем выше рассматриваемая точка. Для твэлов, расположенных вблизи пэлов, резкое уменьшение α на расстоянии 12,5 см от низа не наблюдается.

На рис. 3 показано изменение ϕ_T и α от твэла к твэлу по линии, образующей диагональ поперечного сечения кассеты I. Как и следовало ожидать по данным работ [1—3], α уменьшается на гранях кассеты и у центральной трубки и максимально вблизи пэлов. Положение максимумов и минимумов в распределении ϕ_T прямо

противоположно распределению α , что соответствует известному увеличению потока тепловых нейтронов вблизи водяных полостей (зазоров между кассетами и в центральных трубках).

На рис. 4 показано изменение ϕ_T и α для твэлов кассеты II, расположенных на линии, перпендикулярной к грани поглотителя СУЗ. В отличие от кассеты I кассета II длительное время находилась в контакте с поглотителем СУЗ, который постепенно выводился из активной зоны по мере выгорания топлива и связанного с этим падения реактивности. Следствием этого явилось сильное уменьшение ϕ_T и увеличение α по направлению к поглотителю СУЗ. В этом случае также наблюдается относительное увеличение ϕ_T и уменьшение α в твэлах, расположенных у водяных зазоров между кассетами.

Особенно большое увеличение ϕ_T и уменьшение α на грани наблюдается у кассеты III, граничащей с рассеивателем АЗ, что видно из таблицы. Данные, приведенные на рис. 2 — 4 и в таблице (за исключением кассеты III), являются результатами усреднения многих измерений (от 10 до 220). Погрешности везде указаны для относительных измерений. Таким

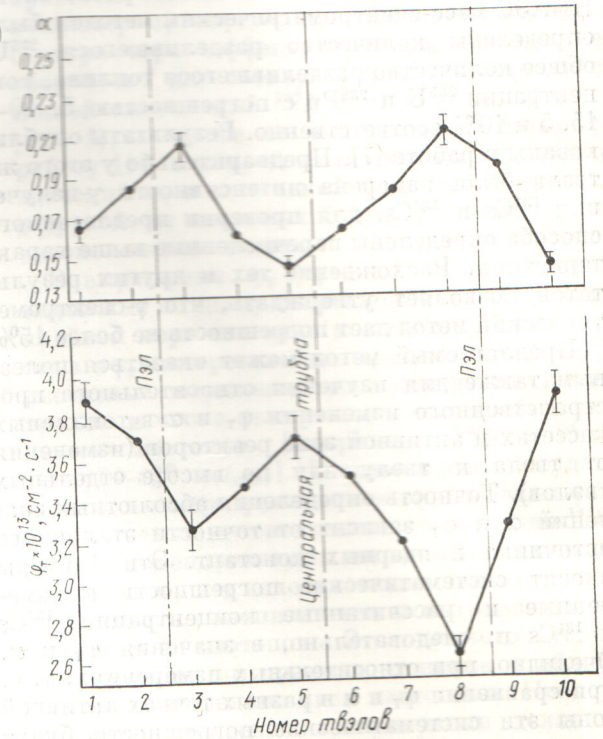


Рис. 3. Изменение ϕ_T и α по диагонали поперечного сечения кассеты I

Экспериментальные значения Φ_T и α в исследуемых кассетах

Кассета	Место измерения	$\Phi_T \times 10^{13},$ $см^{-2} \cdot с^{-1}$	α
I	Среднее по кассете	$3,95 \pm 0,12$	$0,148 \pm 0,004$
	Среднее по твэлам, образующим диагональ поперечного сечения кассеты	$3,55 \pm 0,11$	$0,173 \pm 0,005$
	Среднее по твэлам, образующим грань кассеты	$5,42 \pm 0,16$	$0,0602 \pm 0,0018$
	Среднее по твэлам, расположенным вблизи пэлов	$3,68 \pm 0,11$	$0,152 \pm 0,005$
II III	Среднее по твэлам, удаленным от пэлов	$4,31 \pm 0,13$	$0,116 \pm 0,004$
	Среднее по кассете	$3,72 \pm 0,11$	$0,086 \pm 0,003$
	На расстоянии 1216 мм от низа кассеты для твэла, расположенного на грани со стороны рассеивателя АЗ На расстоянии 1216 мм от низа кассеты для твэла, расположенного в пятом ряду от грани	$7,18 \pm 0,22$ $4,39 \pm 0,13$	$0,131 \pm 0,004$ $0,229 \pm 0,007$

образом, предлагаемый метод позволил выявить довольно тонкие особенности изменения Φ_T и α в исследуемых кассетах. Наиболее важный результат исследований — обнаружение пространственного изменения отношения потоков

надтепловых и тепловых нейтронов в топливных кассетах.

Среднее значение α в кассете может существенно отличаться от значения, соответствующего асимптотическому нейтронному спектру, т. е. такому спектру, который устанавливается в совершенно однородной и бесконечной системе. В особенности это относится к кассетам, расположенным на краю активной зоны, рядом с поглотителем или рассеивателем кассет СУЗ, а также рядом с топливными кассетами, сильно отличающимися по обогащению или выгоранию топлива. От значения α в большой степени зависит выгорание таких делящихся изотопов, как ^{239}Pu и ^{241}Pu .

Поступила в Редакцию 5.IX.77
В окончательной редакции 31.I.78

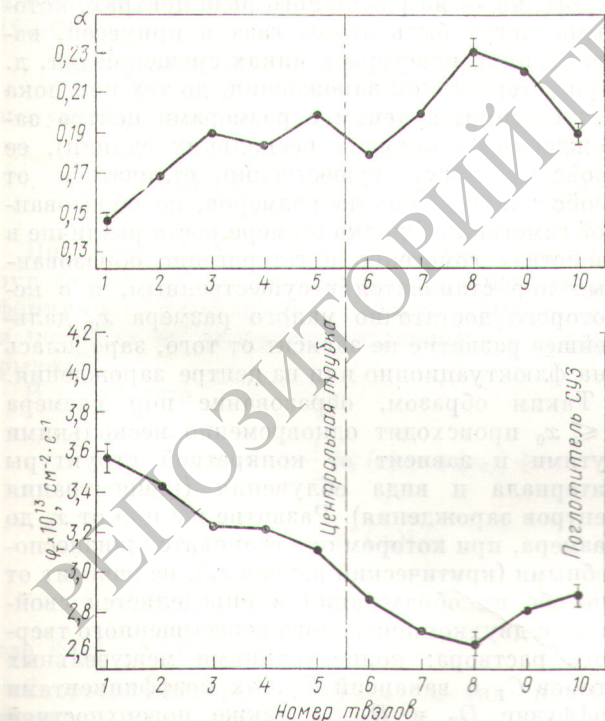


Рис. 4. Изменение Φ_T и α в кассете II по линии, перпендикулярной к грани поглотителя СУЗ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зыков К. И., Миллер О. А. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 3, с. 208.
2. Зыков К. И., Миллер О. А. Там же, вып. 4, с. 265.
3. Голубев Л. И. и др. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 3, с. 207.
4. Hick H., Lammer M. In: Proc. IAEA Symp. «Safeguards Techniques». Karlsruhe, 6—10 July 1970, SM-133/5.
5. Grouch E. «J. Inorg. Nucl. Chem.», 1968, v. 30, p. 907.
6. Hignsberger M., Bruneder H. «Acta Physica Austriaca», 1968, v. 28, N 1—2, p. 94.
7. Габескирия В. Я. и др. Препринт НИИАР П-66, 1970.
8. Миллер О. А. и др. «Атомная энергия», 1969, т. 27, вып. 4, с. 281.