



Ордена Ленина и ордена Октябрьской революции

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

018304110

В.С. Кузнецов, А.Д. Молодцов,  
Л.Я. Тихонов

ИАЭ-3491/4

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ  
В КРИТИЧЕСКОЙ СБОРКЕ**

Москва 1981

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** реактор, критическая сборка, энерговыделение, гамма-квант, ионизация, электрон, камера, гамма-нагрев.

Представлены методика измерения и расчет энерговыделения от поглощения  $\gamma$ -квантов в материалах, не содержащих делящегося вещества. Экспериментальная методика базируется на ионизационном методе измерений. Изложены теория и техника эксперимента, введены поправки, уточняющие теорию. Программа расчета реализует решение стационарного уравнения переноса  $\gamma$ -квантов в неоднородной среде методом Монте-Карло. Приведены результаты исследования радиационного тепловыделения в материалах, входящих в состав изучаемого теплового гетерогенного реактора.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных характеристик ядерного реактора является радиационный нагрев (радиационное тепловыделение) не содержащих делящегося вещества элементов его конструкции, вследствие поглощения в них реакторного гамма-излучения (так называемый  $\gamma$ -нагрев). Любой теплофизический расчет, связанный с отысканием полей температур, основывается на использовании известных внутренних источников тепловыделения. Существующие методы расчета источников от  $\gamma$ -квантов зачастую не обеспечивают требуемую точность, и, более того, в реакторах имеются области, где расчет, ввиду чрезвычайной сложности геометрии, вообще затруднен. Поэтому возникает необходимость экспериментального определения  $\gamma$ -нагрева. Наиболее прямым способом, не требующим введения поправок, связанных со спектром  $\gamma$ -излучения [1], или применения прецизионных термодетекторов с необходимостью строгого контроля температуры окружающей среды и разделения составляющих тепловыделения [2], является ионизационный метод с применением ионизационных камер конденсаторного типа. Камеры обладают высокой чувствительностью, не вносят возмущений в поля нейтронов и  $\gamma$ -квантов при размещении их в той же среде, что и материал камеры. В настоящей работе изложены вопросы теории, подготовки и проведения эксперимента и результаты определения  $\gamma$ -нагрева в критической сборке теплового гетерогенного реактора. Полученные данные позволяют провести корректировку методик и программ расчета, а также имеют практическую ценность в решении задачи профилирования тепловыделения в зонах аппарата, не поддающихся расчету.

## 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

### 2.1. Теория эксперимента

Ионизационный метод измерений базируется на теории Грея [3], согласно которой при выполнении известных физико-конструктивных ограничений [3] тепловыделение  $E_v$  в стенке камеры выражается через ионизацию газа ее рабочего объема (полости) следующим образом:

$$E_v = \frac{(dE/dX)_z}{(dE/dX)_r} i \omega = \frac{N_z S_z}{N_r S_r} i \omega, \quad (1)$$

где

$(dE/dX)_z(r)$  - потери энергии электрона на единицу пути твердого тела (газа);

$S_z(r)$  - тормозная способность среды;

$N_z(r)$  - число электронов в единице объема среды;

$i$  - число пар ионов, возникающих в газовой полости;

$\omega$  - энергия образования пары ионов в газе. Для воздуха, который использовался в данном случае  $\omega = 32,5$  эВ и практически не зависит от энергии. Отношение тормозных способностей может быть вычислено по известным соотношениям.

Теория Грея может рассматриваться как первое приближение и нуждается в уточнении. Первое из них обусловлено эффектом плотности [4], суть которого состоит в том, что под воздействием летящей заряженной частицы происходит поляризация атомов среды, приводящая к снижению тормозной способности, зависящей от плотности атомов среды.

Второй источник неточности теории заключается в том, что в ней неправильно учитывается ионизация газовой полости вторичными электронами. Теория рассматривает потери энергии только

первичных электронов, предполагая тем самым, что вторичные электроны целиком теряют свою энергию в полости. На самом же деле имеется вероятность, что вторичный электрон не израсходует полностью свою энергию в полости. Учет этого явления развит в работе [ 5 ] . Поправки на эти эффекты, усредненные по интервалу энергий 0,4...2,8 МэВ, для некоторых материалов даны в табл.1.

Таблица 1

Поправки к теории для некоторых материалов

Материал	Be	C	Al	Fe	Zr
Эффект плотности	0,975	1,000	1,084	0,990	1,100
Эффект неполной потери энергии	1,000	1,000	0,982	0,950	0,931

Поправки вычислены по опубликованным в литературе данным. Вклад этих поправок даже для некоторых из рассмотренных элементов достигает 7%. В табл.2 приведены отношения тормозных способностей и числа электронов указанных материалов и воздуха с учетом приведенных поправок.

Таблица 2

Отношение тормозных способностей и числа электронов некоторых элементов и воздуха

элемент	Be	C	Al	Fe	Zr
$\frac{N_z}{N_v} \frac{S_z}{S_v} \cdot 10^3$	1,281	1,023	2,013	4,630	3,758

Величина  $i$  - число пар ионов, возникающих в единице объема газовой полости объемом  $V_k$ , при облучении в течение времени  $t$  на мощности аппарата  $W$  есть

$$i = \frac{\Delta q}{e t W V_k}, \quad (2)$$

где  $\Delta q$  - изменение заряда камеры за время облучения;  
 $e$  - заряд электрона.

С учетом соотношения (2) выражение для  $E_v$  принимает вид

$$E_v = \frac{N_z S_z \Delta q \omega}{N_r S_r e t W V_k}.$$

Таким образом, для определения величины  $\gamma$  -нагрева надо измерить изменение заряда  $\Delta q$  камеры за время облучения  $t$  на мощности  $W$ .

## 2.2. Техника эксперимента

При разработке камеры необходимо учитывать требования теории, обеспечение нужного пространственного разрешения и режим работы камеры. Пространственное разрешение зависит от размеров полости, а режим работы от прикладываемого напряжения, геометрии камеры и интенсивности ионизации. Из входящих в состав изучаемого реактора материалов ( $Be$ ,  $Al$ ,  $Zr$ ,  $Fe$ ) были разработаны и изготовлены камеры, конструкция которых показана на рис.1. В качестве изолятора применен фторопласт. Для исключения утечки заряда изоляторы и электроды подвергались процедуре подготовки, включающей промывку в спирте, дистиллированной воде, просушку и прогревание. После одноразовой подготовки утечка заряда, как правило, не превосходила 1, ... 2% за неделю. Для зарядки камер использовался универсальный источник питания УИП-2 с контролем напряжения по цифровому вольтметру. Заряд измерялся с помощью вольтметра постоянного тока электрометрического ВК2-16 по изменению напряжения  $\Delta U$  изм.накопительного конденсатора прибора емкостью

$$C_n = 116,6 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$q = C_n \cdot \Delta U_{изм}.$$

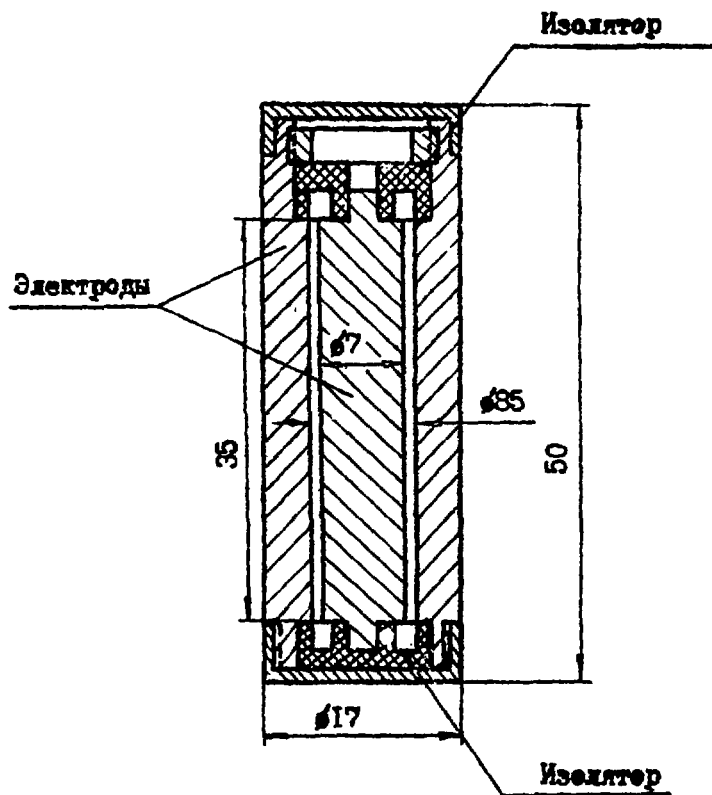


Рис. I. Конструкция камеры

Погрешность измерения заряда не превосходила 4%.

С целью испытания камер, выбора оптимальных режимов их эксплуатации и отработки методики измерений были выполнены эксперименты с источником  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  известной активности. Облучение камер при различных начальных и до разных конечных напряжениях показало, что в диапазоне интенсивности ионизации, перекрывающем три порядка, скорость измерения заряда в интервале, по крайней мере 20 - 240В, одинакова в пределах 5 - 6%. Это свидетельствует о том, что при этих условиях камеры работают в режиме насыщения. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с теоретической оценкой для эффективности сбора ионов  $f$  [6], которую можно провести по формуле

$$f = \frac{i}{i_{\text{нас}}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{6} \xi^2},$$

где

$$\xi = [m(dK_{\text{цил}})^2 V q] / U, d = \frac{d_1 - d_2}{2}, d_1, d_2 \text{ диаметры электродов;}$$

$q$  - интенсивность ионизации, электрост.ед. ;

$U$  - прикладываемое напряжение, В ;

$$K_{\text{цил}} = \sqrt{\left( \frac{d_1 | d_2 + 1}{d_1 | d_2 - 1} \right) \frac{\ln(d_1 / d_2)}{2}};$$

$m$  - константа, учитывающая подвижность ионов и коэффициент рекомбинации.

Для воздуха при  $T=20^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении  $m = (36,7 \pm 2,2)$ .

Известный спектр и активность источника позволили провести простую теоретическую оценку  $\gamma$ -нагрева по формуле

$$E_v = \mu_n \Phi_\gamma E_\gamma,$$

где

$\mu_n$  - истинный коэффициент поглощения  $\gamma$ -квантов, рекомендуемый [7] для расчета тепловыделения;

$\Phi_\gamma$  и  $E_\gamma$  - плотность потока и энергия  $\gamma$ -квантов соответственно.



Измеренные и теоретические величины энерговыделения совпадают в пределах ошибок, равных  $\sim 10\%$  в том и другом случае. Различия значений  $\gamma$ -нагрева, полученных для камер из стали марок X18Ni9T и Ст.3, практически отсутствуют, и далее называются железные камеры. Проведенные опыты с источником позволили сделать вывод о пригодности разработанных камер к измерениям, выбрать режимы их работы и приступить к экспериментам на критической сборке.

### 3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА $\gamma$ -НАГРЕВА

Расчетное определение  $\gamma$ -нагрева проводилось по программе "QUANTA", которая реализует решение стационарного уравнения переноса  $\gamma$ -квантов в неоднородной среде методом Монте-Карло. Уравнение переноса записывается в виде, когда полное сечение не зависит от координаты (вводится понятие  $\delta$ -рассеяние). Программа рассчитывает ячейку, геометрия которой близка к реальной. Рассчитываемая область (ячейка) является частью реактора, ограниченной по радиусу цилиндрической поверхностью, а по высоте - двумя плоскостями, перпендикулярными оси. Сама ячейка может быть разделена поверхностями  $r_i = \text{const}$ ;  $z_i = \text{const}$  на зоны. В ячейке может быть произвольным образом размещена система цилиндров, оси которых параллельны оси  $Z$  реактора. Каждый из цилиндров также может быть разделен коаксиальными областями и плоскостями, перпендикулярными оси, на зоны цилиндра. Зона реактора и цилиндров с одинаковым веществом образуют физические зоны. Каждой физической зоне присущ свой спектр  $\gamma$ -излучения при захвате нейтронов, определяемый как

$$S(E) = \sum_z d_z S_z(E),$$

где  $d_z$  - доля захвата нейтронов элементом с атомным номером  $Z$  по отношению к захватам в физической зоне;

$S_{\Sigma}(E)$ - спектр  $\gamma$  -излучения при захвате нейтронов элементом с атомным номером  $Z$ .

Библиотека спектров  $S(E)$  и способы их получения для тех элементов, по которым отсутствуют литературные данные, оформлены в виде подпрограммы к программе "QUANTA". Функция, описывающая пространственное распределение источников  $\gamma$  -квантов, находилась из нейтронно-физического расчета.

Для определения коэффициентов уравнения переноса исследовались сечения взаимодействия  $\gamma$  -квантов с веществом. Для реакторного  $\gamma$  -излучения основными процессами являются фотоэлектрический эффект, комптоновское рассеяние и образование пар. Другие процессы в программе не рассматриваются в виду их малой вероятности. Значения микроскопических сечений элементов, по которым имелись литературные данные, оформлены в виде библиотеки. Для определения сечений элементов с любым атомным номером при любой энергии написаны программы интерполяции и экстраполяции с учетом энергетической зависимости и зависимости от атомного номера в каждом процессе. Нормировка источника проводилась на полное число делений в реакторе.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛОВыДЕЛЕНИЯ В КРИТИЧЕСКОЙ СБОРКЕ

##### 4.1. Краткая характеристика критической сборки

Критическая сборка представляет собой сильно гетерогенную систему, активная зона которой набрана из 108 каналов в водяном замедлителе и окружена боковым отражателем. Каналы размещены по шести концентрическим рядам, причем энерговыделение по радиусу критической сборки спрофилировано изменением загрузки топлива по рядам. В качестве топлива используются уран-алюминиевые стержни в специальных секциях высотой от 100 до 50 мм. Кроме топлива, секция

могут содержать циркониевые или другие элементы для моделирования требуемого ядерного состава. Характерной особенностью является наличие в верхней части канала конструктивного промежутка, разделяющего основные и последнюю топливную секцию. Все каналы имеют верхний торцевой отражатель из бериллия. Корпуса каналов и секций выполнены из алюминиевого сплава. Гамма-излучение при работе критической сборки складывается из  $\gamma$ -квантов деления и захватного излучения топлива и конструкционных материалов. Энерговывделение определяют  $\gamma$ -кванты деления, а вклад других составляющих оценивается в 10 — 15%. Спектр  $\gamma$ -излучения в каналах близок к спектру деления.

#### 4.2 Результаты

Измерения проводились по радиусу и высоте активной зоны. Камеры устанавливались в каналы вместо одной из секций высотой 50 мм. Промежуток между корпусом секции и стенкой заполнялся, если требовалось согласно ограничениям теории, втушкой из того же материала, что и камера. Условия облучения были выбраны таким образом, чтобы обеспечить работу камер в режиме насыщения и минимизировать погрешность определения изменения заряда. Результаты измерений в среднем по высоте сечений критической сборки приведены в табл. 3. Там же даны результаты расчета для некоторых материалов. Экспериментальные результаты приведены к равновесным условиям с учетом вклада запаздывающего  $\gamma$ -излучения за время выдержки камер в критической сборке после конца облучения [8].

Среднеквадратическая ошибка экспериментального определения  $\gamma$ -нагрева составила 18 — 20% (на периферии точность ухудшается) при повторяемости результатов 3 — 4%. Основной вклад в ошибку вносит погрешность измерения абсолютной мощности, равная 15% с учетом неопределенности показаний штатных приборов контроля мощности. Другими составляющими являются: ошибка измерения скорости изменения

Таблица 3

Сравнение расчетных и измеренных значений  $\chi$  -нагрева  
(на половине высоты активной зоны)

Ряд по радиусу	Образец	Ев. $10^{-6}$ Вт/см <sup>3</sup> на 1 Вт		Эксперимент расчет
		Расчет	Эксперимент	
I	Be	0,175 $\pm$ 0,053	0,232 $\pm$ 0,038	1,33 $\pm$ 0,45
	Zr	0,701 $\pm$ 0,211	0,935 $\pm$ 0,185	1,33 $\pm$ 0,45
	Al	0,255 $\pm$ 0,077	0,471 $\pm$ 0,094	1,85 $\pm$ 0,67
	Fe	-	1,361 $\pm$ 0,245	-
II	Be	0,180 $\pm$ 0,054	0,230 $\pm$ 0,038	1,28 $\pm$ 0,46
	Zr	0,679 $\pm$ 0,204	0,888 $\pm$ 0,178	1,31 $\pm$ 0,47
	Al	0,310 $\pm$ 0,093	0,485 $\pm$ 0,097	1,56 $\pm$ 0,56
	Fe	-	1,335 $\pm$ 0,240	-
III	Be	-	0,232 $\pm$ 0,038	-
	Zr	-	0,856 $\pm$ 0,163	-
	Al	-	0,518 $\pm$ 0,098	-
	Fe	-	1,347 $\pm$ 0,256	-
IV	Be	0,160 $\pm$ 0,048	0,210 $\pm$ 0,042	1,31 $\pm$ 0,47
	Zr	0,682 $\pm$ 0,205	0,873 $\pm$ 0,173	1,28 $\pm$ 0,44
	Al	0,250 $\pm$ 0,075	0,422 $\pm$ 0,084	1,69 $\pm$ 0,61
	Fe	-	1,180 $\pm$ 0,224	-
V	Be	-	0,200 $\pm$ 0,040	-
	Zr	-	0,816 $\pm$ 0,136	-
	Al	-	0,371 $\pm$ 0,042	-
	Fe	-	1,119 $\pm$ 0,213	-
	Be	0,158 $\pm$ 0,047	0,159 $\pm$ 0,031	1,01 $\pm$ 0,35
	Zr	0,572 $\pm$ 0,172	0,622 $\pm$ 0,125	1,09 $\pm$ 0,38
	Al	-	0,288 $\pm$ 0,058	-
	Fe	-	0,932 $\pm$ 0,186	-

заряда  $5 - 10\%$  (зависит от места положения камеры), неопределенность в отношении тормозных способностей  $\sim 35\%$ , погрешность в величине энергии на образование пары монов  $\sim 3\%$ , ошибка измерения рабочего объема камер, выполненного двумя способами,  $\sim 3\%$ , погрешность мониторинга уровня мощности  $\sim 2\%$ . Ошибка расчетных результатов составляет  $\sim 30\%$ . Возможной погрешностью в результатах может являться неучтенный вклад в ионизацию, обусловленный протонами из реакции  $(n, p)$  на  $^{14}N$ . Приближенные оценки показали, что в исследуемой системе при выбранных параметрах камер и условиях облучения величина этого вклада не превосходит  $\sim 3\%$  в самом неблагоприятном случае. Поправки на этот эффект не вносились.

Наблюдается хорошее (в пределах  $\sim 30\%$ ) согласие между расчетными и экспериментальными величинами. Для сравнения можно отметить, что расхождение данных расчета и эксперимента, например, в работе [ 8 ] составляет  $40 - 50\%$ . Хотя сравниваемые результаты перекрываются ошибкой (кроме  $A\ell$ ), логично предположить, что расчетные значения систематически занижены. Это систематическое отклонение, возможно, обусловлено неточностью исходных данных расчета. Различие расчетных и измеренных величин для камер из  $A\ell$  выше, чем для камер из других материалов. Причина этого, по-видимому, заключается в том, что при расчете брался чистый  $A\ell$ , а реально камеры были изготовлены из алюминиевого сплава, точный состав которого установить не удалось.

Анализ полученных данных показал, что распределения удельного  $\gamma$ -нагрева (потока  $\gamma$ -квантов) по радиусу критической сборки в различных сечениях по высоте топливной зоны, включая конструктивный промежуток и последнюю секцию одинаковы в пределах  $\sim 10\%$ . Аналогично, высотные распределения в каждом ряду совпадают в пределах  $\sim 10\%$ . Таким образом можно сделать вывод, что пространственные переменные потока  $\gamma$ -квантов разделяются. На рис.2 и 3

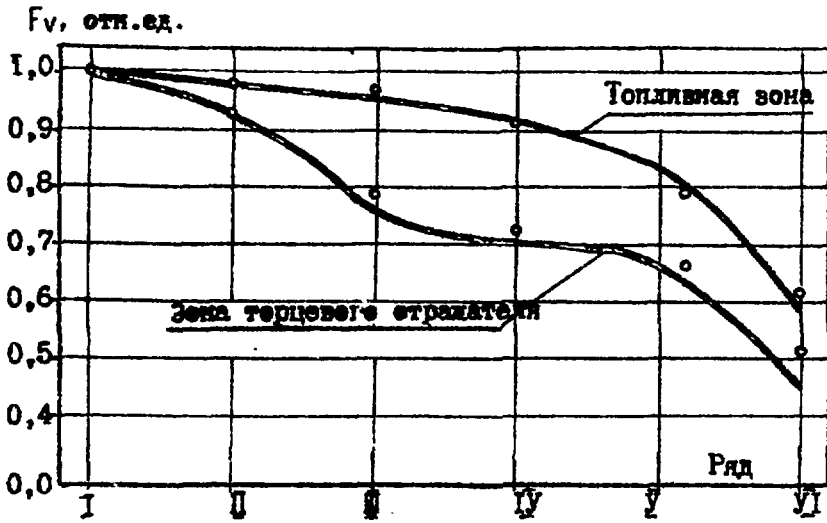


Рис.2. Распределение удельного радиационного тепловыделения по радиусу активной зоны:  $\circ$  - эксперимент, — - расчет

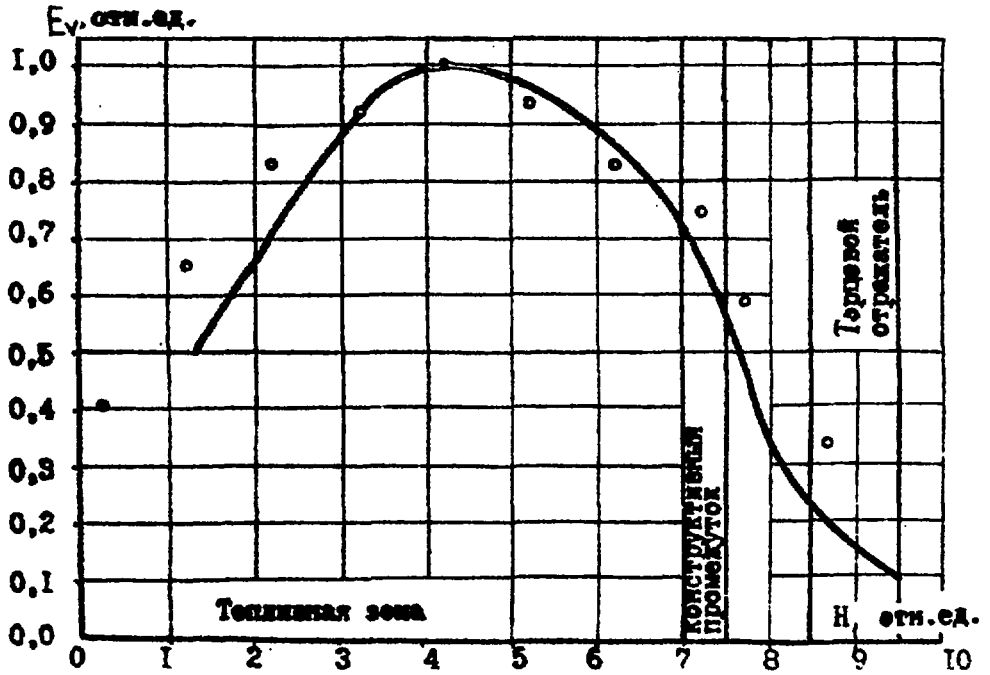


Рис.3. Распределение удельного радиационного тепловыделения по высоте критической сборки:  $\circ$  - эксперимент, — - расчет

показаны относительные распределения удельного  $\gamma$ -нагрева по радиусу и высоте критической сборки. Сплошными кривыми представлены расчетные распределения, а точками - экспериментальные значения. Выделено распределение по радиусу в зоне торцевого отражателя. Характер этого распределения обусловлен тем, что при отсутствии источников деления в этой области на формирование потока  $\gamma$ -квантов в этой зоне влияют два эффекта, сравнимые по величине и имеющие противоположные знаки второй производной. С одной стороны, влияют  $\gamma$ -кванты, приходящие снизу из топливной зоны и повторяющие в какой-то степени распределение в последней, а с другой - приходящие сбоку, излучаемые всей активной зоной и испытывающие ослабление в радиальном направлении, подчиняющееся экспоненциальному закону, причем ток  $\gamma$ -квантов от центра к периферии выше.

Расчетные и экспериментальные распределения хорошо согласуются. Некоторое отличие (до  $\sim 40\%$ ) наблюдается в высотных распределениях на периферии активной зоны, что объясняется ухудшением здесь точности расчета и эксперимента, а также наличием сверху канала большой неоднородности, затрудняющей расчет. Практическое совпадение расчетных и экспериментальных относительных распределений подтверждает вывод о систематическом расхождении соответствующих абсолютных значений. Этот факт позволяет надеяться, что после корректировки расчетной программы это расхождение можно будет исключить.

## 5. ВЫВОДЫ

1. Отработана методика определения энерговыделения от поглощения  $\gamma$ -квантов в аппаратах сложной конструкции, базирующаяся на теории Грея. В основные соотношения теории введены поправки, уточняющие конечные результаты.

2. Разработаны, изготовлены и испытаны ионизационные камеры, пригодные для экспериментальных исследований практически любых реакторных систем физической мощности.

3. Проведено экспериментально-расчетное исследование радиационного тепловыделения в несодержащих делящегося вещества материалах каналов теплового гетерогенного реактора. Показано, что в пределах  $\sim 10\%$  поток  $\gamma$ -квантов по радиусу аппарата во всех сечениях по высоте топливной зоны и по высоте аппарата для всех рядов каналов может быть описан одним соответствующим распределением.

Сравнение экспериментальных и расчетных абсолютных величин показало наличие систематического их расхождения в  $\sim 30\%$ , что для подробных исследований не существенно.

4. Определен характер радиального распределения тепловыделения в зоне торцевого отражателя. Полученные данные имеют значение для проверки и уточнения проектных характеристик исследуемого реактора и могут быть использованы при профилировании энерговыделения в нем.



Список литературы

1. Simmons G.G., Yule T.J. Gamma-Ray Heating Measurements in Zero-Power Fast Reactors with Thermoluminescent Dosimeters. - *Nucl. Sci. Eng.*, 1974, v. 53, p. 162.
2. Бакаев А.Т., Волков В.А., Мусаев Р.А. Прецизионный метод измерения тепловыделения в критических сборках. - *Атомная энергия*, 1980, т. 48, вып. 1, с. 39.
3. Gray L.H. The experimental determination by ionization methods of the rate of emission of beta- and gamma-ray energy by radioactive substances. - *Brit. J. Radiology*, 1949, v. 22, p. 677.
4. Whyte G.N. Density effect in gamma-ray measurements. - *Nuclonics*, 1954, v. 12, № 2, p. 18.
5. Спенсер Л., Эттингс Д. Дозиметрия ионизирующих излучений. - В сб. Докл. ин. уч. на Междунар. конф. мирн. использования атомн. энергии. М.: Гостехиздат, 1956, вып. 7, с. 78.
6. Determination of Absorbed Dose in Reactors Techn. Rep, Ser N 127. International Atomic Energy Agency. Vienna, 1971.
7. Немец О.Ф., Гофман Д.Ф. Справочник по ядерной физике. Киев: Научно-ва Думка, 1945.
8. Физика промежуточных реакторов. /Пер. с англ. под ред. И.А. Степашкина. М.: Госатомиздат, 1961.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение .....	I
2. Методика измерения радиационного тепловыделения .....	2
2.1. Теория эксперимента .....	2
2.2. Техника эксперимента .....	4
3. Методика расчета $\gamma$ -нагрева .....	7
4. Определение радиационного тепловыделения в критической сборке .....	8
4.1. Краткая характеристика критической сборки .....	8
4.2. Результаты .....	9
5. Выводы .....	13
Список литературы .....	15

---

Редактор Л.И. Кирюгина  
Технический редактор Н.И. Мазова

Т-22089. 17.08.81. Формат 60x90/16. Уч.-издл. 0,8  
Тираж 121. Цена 8 коп. Индекс 3624. Заказ 4476

Отпечатано в ИАЗ



## ГУБРИКАТОР ПРЕПРИНТОВ ИАЗ

1. Общая теоретическая и математическая физика
2. Ядерная физика
3. Общие проблемы ядерной энергетики
4. Физика и техника ядерных реакторов
5. Методы и программы расчета ядерных реакторов
6. Теоретическая физика плазмы
7. Экспериментальная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез
8. Проблемы термоядерного реактора
9. Физика конденсированного состояния вещества
10. Физика низких температур и техническая сверхпроводимость
11. Радиационная физика твердого тела и радиационное материаловедение
12. Атомная и молекулярная физика
13. Химия и химическая технология
14. Приборы и техника эксперимента
15. Автоматизация и методы обработки экспериментальных данных
16. Вычислительная математика и техника

Индекс рубрики дается через дробь после основного номера ИАЗ.

