

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

**P3-86-592**

**В.В.Мелихов, Е.П.Шабалин**

**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ  
В ВОДОРОДСОДЕРЖАЮЩЕМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕ**

**1986**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, эффективность водородсодержащих замедлителей, используемых в качестве источника холодных нейтронов, значительно повышается при охлаждении их до криогенных температур. Поэтому в основе проектирования "холодных" замедлителей лежит знание тепловыделения при упругом рассеянии нейтронов на водороде и тепловыделения в конструкционных материалах при взаимодействии их с гамма-квантами.

Современные методы расчета переноса нейтронов и гамма-квантов позволяют решить эти задачи, однако не дают полной гарантии отсутствия систематической погрешности, связанной с недостаточной адекватностью геометрии реактора и биологической защиты их математической модели. С целью подтверждения расчетных данных был подготовлен и проведен эксперимент по измерению тепловыделения в наиболее доступных замедлителях - воде и полиэтилене. В качестве образца конструкционного материала выбран алюминий.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Две кассеты с замедлителем из воды и гранулированного полиэтилена /см. рис.1/ объемом ~3 л с помощью штанги через канал 1-го пучка поочередно устанавливались непосредственно рядом с реактором ИБР-2 вместо "гребенчатого" замедлителя. В первой

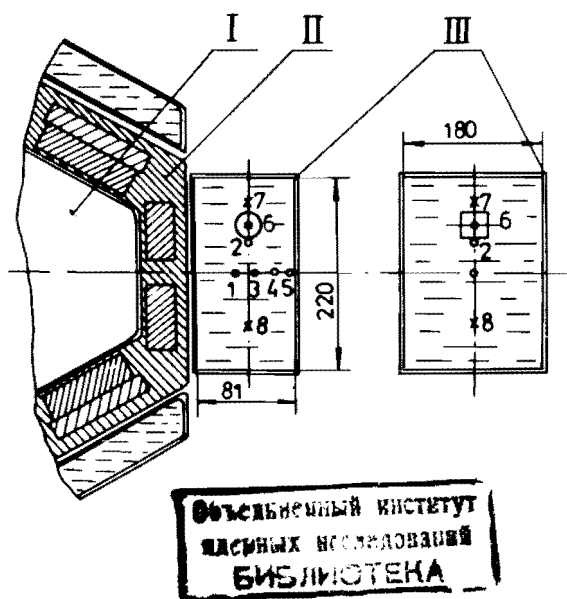


Рис.1. Расположение и конструкция экспериментальных кассет: I - активная зона реактора ИБР-2, II - стационарный отражатель, III - экспериментальная кассета, 1-5 - термомпары для измерения распределения температуры в полиэтилене, 6 - контейнер с алюминиевым образцом и термопарой, 7,8 - термомпары для измерения температуры воды.

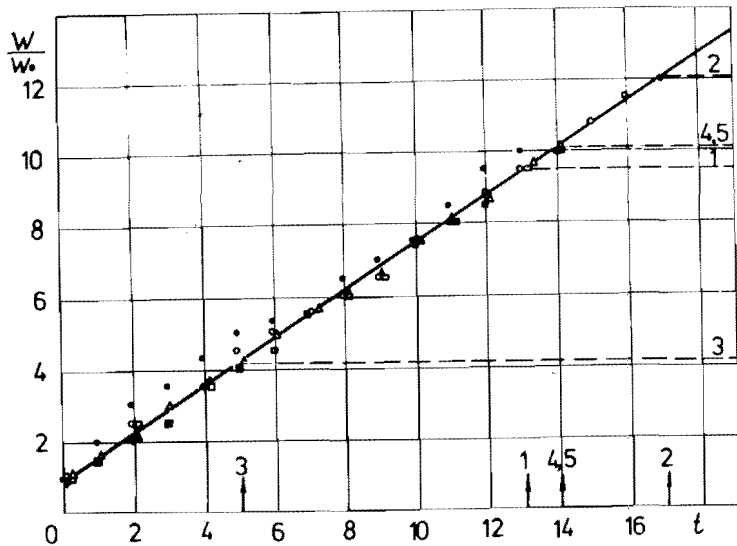


Рис.2. Изменение относительной мощности реактора ( $W/W_0$ ) во времени  $t$ , мин/,  $W_0 = 23,5^{-2,4}$  кВт; цифры указывают номер серии эксперимента.

кассете /с водяным замедлителем/ определялась средняя по всему объему плотность тепловыделения по результатам измерения температуры с помощью двух термодпар /7 и 8 на рис.1/. Во второй кассете /с замедлителем из гранулированного полиэтилена/ по толщине замедлителя было размещено пять термодпар /1-5 на рис.1/. Таким образом оказалось возможным измерить распределение плотности тепловыделения. Кроме того, в этой кассете находился контейнер /6, рис.1/ с алюминиевым образцом, по измерениям температуры которого можно определить тепловыделение в алюминии.

Было проведено пять серий измерений. Три /1-3/ - для замедлителя из  $H_2O$  и две /4,5/ - для замедлителя из  $CH_2$  - гранул. По характеру изменения мощности реактора во времени каждую серию можно разбить на два этапа:

I - автоматический выход реактора на заданный уровень мощности по линейному закону  $W(t) = W_0 \cdot (1 + 0,6562 \cdot t)$  для  $0 \leq t \leq t_*$  /мин/

II - стабилизация мощности реактора на заданном уровне  $W_* = W_0 \cdot (1 + 0,6562 \cdot t_*)$  для  $t \geq t_*$ .

Минимальный уровень мощности, после которого начинался автоматический режим выхода реактора, в результате проведенной калибровки оказался равным  $W_0 = 23,5^{-2,4}$  кВт. Изменение мощности реактора в каждой серии эксперимента показано на рис.2. Здесь для 1,2 и 3 серии измерений время линейного роста ограничивалось значениями  $t_* = 13,17$  и 5 мин соответственно. Для 4,5 серий измерений  $t_* = 14$  мин.

В дальнейших расчетах погрешность калибровки мощности  $\pm 10\%$  не указывается, и подразумевается, что в экспериментальных значениях тепловыделения присутствует систематическая погрешность до  $\pm 10\%$ . Численные значения плотности, теплоемкости замедлителя и ядерной концентрации водорода, используемые в расчетах, приведены в табл.1.

Таблица 1

Замедлитель	$(CH_2)_n$ -гранул	$(CH_2)_n$	$H_2O$	$H_2$
$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	0,5	0,92	1,0	0,071
$C_p$ , Дж/г·К	2,2	2,2	4,18	-
$n$ , $10^{24}$ см <sup>-3</sup>	0,043	0,079	0,067	0,042

### 3. ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ В ВОДЕ И ПОЛИЭТИЛЕНЕ

Изменение температуры замедлителя во времени, в предположении малости перетечек тепла между элементарными объемами по сравнению с тепловыделением в них, описывается уравнением:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{60q(x)}{c_p} W(t) - \gamma T(x, t), \quad T(x, 0) = 0,$$

где  $W(t) = W_* U(t - t_*) + W_0(1 + at)[U(t) - U(t - t_*)]$  - мощность реактора,  $a = 0,6562$  мин<sup>-1</sup>,  $U(r)$  - единичная функция;

$q(x) = \left[ \frac{Wt}{\Gamma \cdot \text{МВт}} \right]$  - тепловыделение в 1 г замедлителя при мощности реактора 1 МВт.

Решение этого уравнения:

$$T(x, t) = q(x) \frac{60W_0}{\gamma c_p} \left[ (1 - e^{-\gamma t}) U(t) + \frac{a}{\gamma} \left( (1 - e^{-\gamma(t-t_*)}) - \gamma(t-t_*) \right) U(t-t_*) - \right. \\ \left. - (1 - e^{-\gamma t} - \gamma t) U(t) \right]$$

для  $t \ll \gamma^{-1}$  можно записать в приближенном виде:

$$T(x, t) = q(x) \frac{60W_0}{c_p} \left[ \left( 1 + \frac{a - \gamma}{2} t \right) - \frac{a}{2} (t - t_*)^2 U(t - t_*) \right].$$

Постоянные времени  $\gamma^{-1}$  кассет с замедлителем определялись из экспериментальных кривых охлаждения в области регулярного режима /кривая 4 на рис.3 и кривая 7 на рис.4/ и оказались равными  $105 \pm 3,0$  мин и  $199 \pm 4$  мин для кассеты с водой и полиэтиленом соответственно. Поскольку для воды измерялась средняя температура, то в ф-ле /1/ и следующей далее ф-ле /2/ надо считать, что

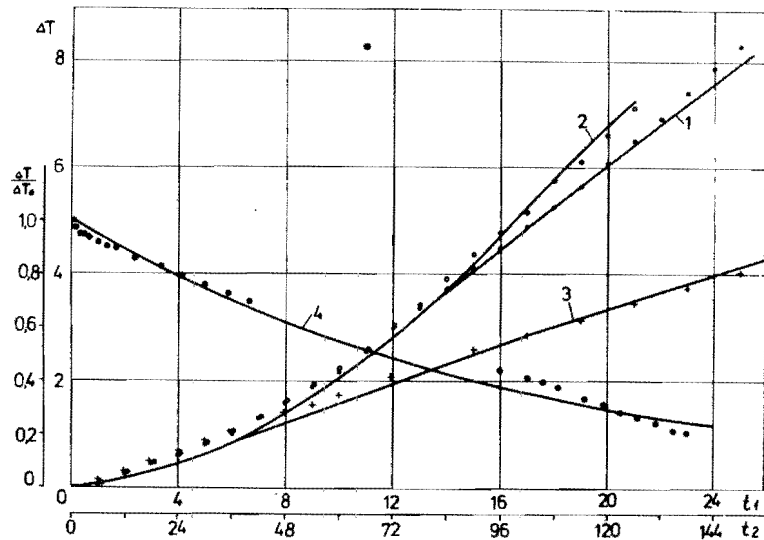


Рис.3. Изменение температуры воды ( $\Delta T$ , К) во времени ( $t_1$ , мин) при нагреве замедлителя /кривые 1-3 и экспериментальные точки вблизи этих кривых соответствуют номерам серий эксперимента/ и относительной температуры ( $\Delta T/\Delta T_0$ ) при охлаждении; время  $t_2$  - в минутах /кривая 4/.

$T(x, t) = T(t)$  и  $q(x) = \bar{q}$ . Предположение о малых потерях тепла подтверждается измеренными значениями  $\gamma^{-1}$  и вычисленными по /2/ значениями тепловыделения  $q$ . Так, для экспериментов в сериях 1-3 при  $t \rightarrow \infty$   $T(\infty) = 44, 56$  и  $20$  К соответственно, а для серий 4,5 -  $T(\infty) = 220$  К, что значительно превышает область, в которой проводились измерения температуры.

Плотность тепловыделения рассчитывалась по экспериментально измеренным значениям температуры замедлителя с использованием метода наименьших квадратов:

$$q_i = \frac{\gamma c_p}{60 W_0} \cdot \frac{\sum_{k=1}^N T_{ik} P_k}{\sum_{k=1}^N P_k^2}, \quad /2/$$

где  $\gamma P_k = [(\gamma - a)(1 - e^{-\gamma t_k}) + a \gamma t_k] U(t_k) + a[1 - e^{-\gamma(t_k - t_*)} - \gamma(t_k - t_*)] U(t_k - t_*)$ ,  $q_i$  - тепловыделение в точке  $x_i$ , имеющей в момент времени  $t_k$  температуру  $T_{ik}$ .

Вычисленные по этой формуле значения плотности тепловыделения для воды приведены в табл.2, а для гранулированного полиэтилена - в табл.3 и на рис.5.

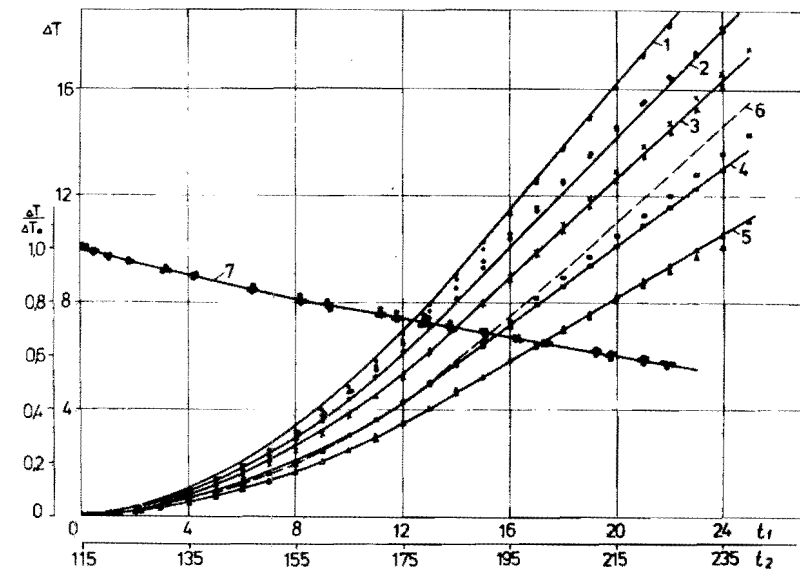


Рис.4. Изменение температуры полиэтилена  $\Delta T$ (К) /кривые 1-5/ и алюминия /кривая 6/ во времени ( $t_1$ , мин) в 4 и 5 сериях эксперимента и относительной температуры полиэтилена ( $\Delta T/\Delta T_0$ , кривая 7) при охлаждении; время  $t_2$  - в минутах.

Таблица 2  
Среднее тепловыделение в воде

№ серии	1	2	3
$q$ , Вт/г·МВт	$0,146 \pm 0,005$	$0,146 \pm 0,003$	$0,131 \pm 0,005$
$\bar{q}$ , Вт/г·МВт	$0,141 \pm 0,005$		

Таблица 3  
Распределение тепловыделения по толщине замедлителя из гранулированного полиэтилена

№ термодпары	1	2	3	4	5	
$x_i$ , см	3,2	4,05	4,7	6,0	7,2	
$q_i$ , Вт/г·МВт	№ 4	0,186	0,167	0,149	0,121	0,095
	№ 5	0,187	0,169	0,145	0,117	0,093

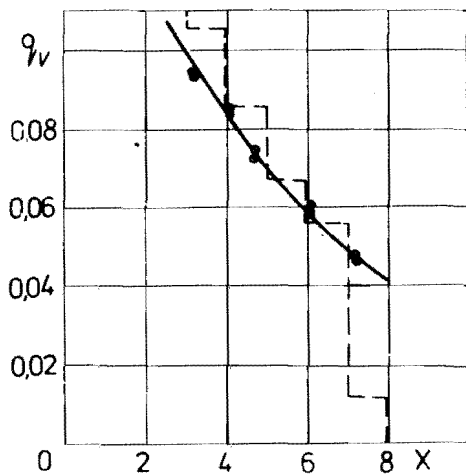


Рис.5. Распределение плотности тепловыделения ( $q_v$ , Вт/см<sup>3</sup> МВт) по толщине ( $X$ , см) в замедлителе из гранулированного полиэтилена.  $\odot$  - эксперимент, ---- - расчет по методике работы /1/, — - расчет по формуле /5/.

Экспериментальные данные по тепловыделению из табл.2 и 3 можно сравнить с расчетом, проведенным по методике работы /1/. Так, из расчета среднее значение тепловыделения в замедлителе из воды толщиной 8 см, равно 0,11 Вт/г·МВт,

а в эксперименте получено  $0,14^{+0,02}_{-0,01}$  Вт/г·МВт. Завышенное экспериментальное значение частично объясняется тем, что в воду отводится тепло от стенок алюминиевой кассеты; помимо этого, в расчете не учитывалось поглощения гамма-квантов в воде. После внесения соответствующих поправок /полученных на уровне оценок/ экспериментальные и расчетные значения тепловыделения в воде совпали в пределах погрешности измерений, составив соответственно  $0,13^{+0,02}_{-0,01}$  Вт/г·МВт и 0,12 Вт/г·МВт. На рис.5 сравнивается экспериментальное распределение тепловыделения по толщине замедлителя из гранулированного полиэтилена с расчетом /пунктирная ломаная кривая/. В этом случае расчетные данные в основном несколько завышены, но также совпадают в пределах погрешности измерений.

Распределение тепловыделения по толщине замедлителя с плотностью ядер водорода  $n$  можно приближенно описать экспоненциальной зависимостью:

$$q_v(x) = \frac{n}{n_{H_2}} q_0(n\delta) \cdot e^{-\sigma n x} \quad /3/$$

где  $q_v = \rho q$  - объемная плотность тепловыделения,  $\delta$  - толщина замедлителя,  $\sigma n$  - темп относительных потерь энергии нейтронов при замедлении.

Из экспериментальных данных /табл.1/ следует, что параметр  $\sigma = /4,03 \pm 0,09/ \cdot 10^{-24}$  см<sup>2</sup>. Значение величины  $q_0$  зависит от произведения  $n\delta$  и получено из данных табл.2,3 для двух значений  $n\delta$ :  $q_0 = /0,162 \pm 0,002/$  Вт/см<sup>3</sup>МВт, для  $(n\delta)_1 = 0,35 \cdot 10^{24}$  см<sup>-2</sup>,  $q_0 = /0,216 \pm 0,020/$  Вт/см<sup>3</sup>МВт, для  $(n\delta)_2 = 0,55 \cdot 10^{24}$  см<sup>-2</sup>.

На рис.5 в виде сплошной кривой показана зависимость  $q_v(x)$ , вычисленная по формуле /3/. После подстановки  $q(x) = q_v(x) / \rho$  в формулу /1/ изменение температуры замедлителя во времени приведено на рис.3 /кривые 1-3/ и рис.4 /1-5/.

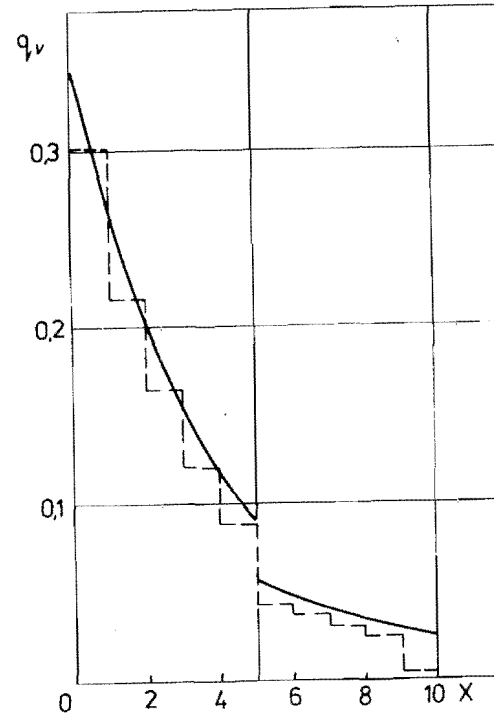


Рис.6. Распределение плотности тепловыделения ( $q_v$ , Вт/см<sup>3</sup>МВт) по толщине ( $X$ , см) составного замедлителя /5 см воды и 5 см жидкого водорода/: ---- - расчет по методике работы /1/, — - расчет по формуле /5/.

В работе /1/ было рассчитано распределение тепловыделения по толщине составного замедлителя 5 см воды + 5 см жидкого водорода  $/n\delta = 0,55 \cdot 10^{24}$  см<sup>-2</sup>/, т.е. композиции, характерной для проектируемого на ИБР-2 "холодного" замедлителя. Это распределение /ломаная пунктирная кривая на рис.6/ сравнивается с распределением, вычисленным по формуле /3/. Как видно, наблюдается довольно хорошее согласие. Среднее теп-

ловыделение в жидком водороде составного замедлителя  $\bar{q} = 0,038$  Вт/см<sup>3</sup>МВт, и при объеме водорода 2 л полное количество тепла, которое необходимо отводить от жидкого водорода при мощности реактора 4 МВт, будет  $Q \approx 300$  Вт.

#### 4. ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ В АЛЮМИНИИ

Тепловыделение в алюминии определялось по измерениям температуры алюминиевого образца в контейнере /кривая 6 рис.4/ и полиэтилена, окружающего этот контейнер /кривая 2 рис.4/. Для его расчета использовалось уравнение

$$\frac{d(T + T_{Al})}{dt} = (1 + \eta \frac{c_p}{c_{Al}}) \frac{q(x_2, t)}{c_p} - \gamma(T(x_2, t) + T_{Al}),$$

где  $T(x_2, t)$  и  $q(x_2, t)$  - температура и тепловыделение в  $(CH_2)_n$ -грануле в точке  $x_2$ ;  $c_p$  - ее теплоемкость,  $c_{[Al]} = 0,88$  Дж/г·К - теплоемкость алюминия,  $\eta = \frac{q_{[Al]}(t)}{q(x_2, t)}$  - относительное тепловыделение в алюминии.

Решение этого уравнения аналогично приведенному ранее в формулах /1/, а расчет тепловыделения такой же, как и по форму-

лам /2/. Значение тепловыделения в алюминии оказалось равным  $q_{[Al]} = /0,049 \pm 0,004/ \text{ Вт/г} \cdot \text{МВт}$ , при этом  $\eta \approx 0,3$ .

Ранее были проведены измерения тепловыделения от гамма-квантов в образцах из стали и вольфрама в стационарном отражателе ИБР-2. В результате пересчета этих данных предсказывалось тепловыделение в алюминии  $\sim 0,01 \text{ Вт/г} \cdot \text{МВт}$ . Значительно более высокое тепловыделение, полученное в нашем эксперименте, объясняется, по-видимому, захватом тепловых нейтронов в алюминии и испусканием бета-частиц.

#### ВЫВОДЫ

1. Получено удовлетворительное согласие экспериментальных данных с расчетными по тепловыделению в воде и полиэтилене.
2. Средняя плотность тепловыделения в проектируемом жидководородном замедлителе ИБР-2 /расположенном за слоем воды толщиной 5 см/будет не более  $0,04 \text{ Вт/см}^3 \cdot \text{МВт}$ , а максимальная - не более  $0,06 \text{ Вт/см}^3 \cdot \text{МВт}$ .
3. Максимальная плотность тепловыделения в алюминии - не более  $0,14 \text{ Вт/см}^3 \cdot \text{МВт}$ .

Авторы весьма признательны В.Д.Ананьеву, М.А.Киселеву, В.И.Константинову, Ю.Н.Пепельшеву, А.Д.Рогову, А.А.Смирнову, В.П.Сысоеву за помощь в подготовке и проведении измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рогов А.Д. ОИАИ, P11-85-554, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 августа 1986 года.

Мелихов В.В., Шабалин Е.П.

P3-86-592

Измерение тепловыделения в водородсодержащем замедлителе

Экспериментальным путем найдено распределение плотности тепловыделения по толщине водородсодержащего замедлителя. Тепловыделение вследствие упругого рассеяния нейтронов на водороде получено по результатам измерения температуры в нестационарных условиях нагрева макета замедлителя излучением реактора ИБР-2. Максимальная плотность тепловыделения в пересчете на жидкий водород составила  $0,05 \text{ Вт/см}^3$  на 1 МВт мощности реактора, что хорошо согласуется с расчетными данными. По нестационарным измерениям температуры алюминиевого образца, находящегося в макете замедлителя, проведена оценка тепловыделения в конструкционных материалах при взаимодействии их с гамма-квантами. Найдено, что оно не превышает  $0,05 \text{ Вт/г}$  на 1 МВт мощности реактора.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИАИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Melikhov V.V., Shabalin E.P.

P3-86-592

Measurement of Heat Release in Hydrogenous Moderator

Density distribution of heat release has been found along the thickness of hydrogenous moderator. Heat release due to elastic scattering of neutrons on hydrogen was obtained by the results on measuring temperature in nonstationary conditions of moderator model heating with the IBR-2 reactor radiation. Maximum density of heat release was  $0.05 \text{ W/cm}^3$  per 1 MW of reactor power, which agrees well with the calculated data. Basing on nonstationary measurements of temperature of aluminium sample placed in the moderator model the estimation of heat release in design materials by  $\gamma$ -radiation was carried out. It has been found that it does not exceed  $0.05 \text{ W/g}$  per 1 MW of reactor power.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1986