

УДК 621.039.5

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ ИМПУЛЬСНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИГР

А.Д. Вурим*, И.В. Шаманин, В.А. Витюк*, В.А. Гайдайчук*, Ю.В. Алеяников*, Ж.Р. Жотабаев**

Томский политехнический университет

E-mail: shiva@tpu.ru

*Институт атомной энергии НЯЦ РК, г. Курчатов, Казахстан

**Национальный ядерный центр РК, г. Курчатов, Казахстан

Изучена возможность использования малогабаритных камер деления для определения пространственного положения в центральном экспериментальном канале импульсного уран-графитового реактора тел конечных размеров, выполненных из материалов, поглощающих нейтроны. Приведены результаты экспериментов по измерениям характеристик поля нейтронов в центральном экспериментальном канале реактора при размещении в нем модельных облучательных устройств. Приведено описание алгоритма обработки токов детекторов нейтронов (малогабаритных камер деления), позволяющего определить положение поглотителя относительно конкретного детектора. Определена аналитическая зависимость для погрешности измерения положения.

Ключевые слова:

Импульсный ядерный реактор, экспериментальный канал, облучательное устройство.

Key words:

Pulsed nuclear reactor, experimental channel, irradiated device.

Введение

Одним из привлекательных эксплуатационных свойств импульсного уран-графитового реактора ИГР [1] является возможность проведения экспериментов с реакторным топливом (тепловыделяющими элементами, модельными тепловыделяющими сборками) вплоть до их разрушения, сопровождающегося изменением первоначального положения топлива, в том числе обусловленного его плавлением. Существует класс экспериментов, при проведении которых требуется определение количественных параметров перемещения (например, скорости, текущего положения и пр.) исследуемого топлива или его расплава. Наиболее известным и распространенным способом решения этой задачи является применение годоскопа [1–4]. Так как реактор ИГР не оснащен подобным устройством, рассматривается возможность косвенного определения параметров перемещения на основе анализа изменения величины и распределения плотности потока тепловых нейтронов в центральном экспериментальном канале (ЦЭК) реактора ИГР в ходе эксперимента.

В основе предлагаемой методики лежит очевидное допущение о том, что локальные значения потока тепловых нейтронов в различных точках по объему ЦЭК определяются не только состоянием реактора и его систем, но и влиянием установленных в ЦЭК облучательных устройств. Это допущение было проверено в сериях экспериментов в обоснование методики. В процессе реакторных пусков осуществлялось перемещение экспериментальных устройств по высоте ЦЭК с одновременным измерением плотности потока тепловых нейтронов в водяном баке реактора и в ЦЭК. Для измерения плотности потока тепловых нейтронов в ЦЭК использовались ионизационные камеры типа КтВ [5], установленные в четырех точках по высоте активной зоны реактора.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов, выполненных в обоснование методики, и предлагаемая методика определения положения экспериментальных устройств, разработанная для случая их перемещения по вертикальной оси ЦЭК реактора ИГР, в предположении, что

в процессе перемещения масса и геометрические характеристики экспериментальных устройств не изменяются.

Экспериментальное оборудование

Целью исследований являлось измерение параметров поля нейтронов в ЦЭК реактора ИГР при размещении в нем четырех типов экспериментальных устройств, которые позволяли смоделировать некоторые предполагаемые состояния реактора с модельными тепловыделяющими сборками (ТВС) в ходе экспериментов с плавлением и перемещением исследуемого топлива.

Экспериментальное устройство № 1 (ЭУ-1) – устройство ампульного типа для моделирования перемещения расплава ТВС. В качестве поглотителя, имитирующего расплавленное топливо, использовались вода и водный раствор борной кислоты с концентрацией 18,2 г/л. ЭУ-1 размещалось в ЦЭК, центр высоты столба поглотителя в ампуле ЭУ-1 совпадал с центром активной зоны реактора.

Экспериментальное устройство № 2 (ЭУ-2) предназначено для оценки разрешающих характеристик ионизационных камер КтВ и представляет собой штангу из алюминиевой трубы с надетыми на нее кадмиевыми кольцами диаметром 50 мм. Количество кадмиевых колец и расстояние между ними могло быть изменено в соответствии с задачами конкретного эксперимента. ЭУ-2 размещалось в ЦЭК реактора на гибкой тяге, обеспечивающей возможность его перемещения.

Экспериментальное устройство № 3 (ЭУ-3) представляет собой модель ТВС и предназначено для проведения исследований влияния ТВС на показания камер КтВ. Основным элементом ЭУ-3 являлась модель ТВС, состоящая из 12 имитаторов тепловыделяющих элементов (твэлов), которая по соображениям обеспечения безопасности была помещена в герметичный защитный корпус. Имитатор твэла представляет собой фрагмент твэла реактора ВВЭР-1000, но снаряженный топливными таблетками (высота топливного столба – 500 мм) с естественным обогащением по изотопу ^{235}U . Конструкция ЭУ-3 позволяла извлекать из неё любой имитатор твэла.

Экспериментальное устройство № 4 (ЭУ-4) предназначено для оценки разрешающих характеристик камер КтВ для поглощающих блоков малой протяженности и представляет собой стальной цилиндрический сосуд, содержащий 110 г борной кислоты при общей массе ЭУ-4 300 г.

В реакторных экспериментах с описанными выше устройствами устанавливалось соответствие между характеристиками поля нейтронов, измеренными различными способами, и параметрами, характеризующими состояние экспериментального устройства. В этой связи пуски реактора ИГР можно разделить на эксперименты по исследованию:

- аксиального распределения потока нейтронов в ЦЭК в присутствии ЭУ различной конфигурации;

- пространственного разрешения метода определения положения возмущающего тела в ЦЭК.

Средства измерения

В процессе экспериментов выполнялись измерения и регистрация основных параметров:

- токов ионизационных камер системы управления и защиты реактора;
- токов ионизационных камер КтВ;
- положения ЭУ в ЦЭК;
- давления наддува в ЭУ-4.

Основными измеряемыми параметрами являлись токи малогабаритных детекторов нейтронов, в качестве которых использовались камеры деления типа КтВ. Подобные малогабаритные детекторы используются в системах контроля, управления и защиты ядерных реакторов в качестве детекторов нейтронного потока и гамма-излучения [6, 7]. В камерах КтВ устранены возможные фоновые токи между собирающим и охранным электродами, а токи утечки между охранным электродом и корпусом нагружают лишь источник питания и не влияют на показания измерительного прибора. Диапазон пропорциональности сигнала камер КтВ плотности потока нейтронов лежит в пределах от $1,5 \cdot 10^{14}$ до $2 \cdot 10^{16}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ с максимальным значением сигнала до $3 \cdot 10^{-3}$ А. Камеры КтВ были установлены в ЦЭК реактора ИГР, рис. 1.

Эксперименты по измерениям аксиального распределения потока нейтронов в ЦЭК

А. Краткое описание экспериментов

Эксперименты выполнялись при размещении неподвижных ЭУ в ЦЭК. Измерения основывались на методике определения флюенса тепловых нейтронов с использованием активационных детекторов (в предположении постоянства распределения плотности потока тепловых нейтронов в ходе эксперимента) и плотности потока тепловых нейтронов с использованием детекторов деления.

В экспериментах по исследованию аксиального распределения потока нейтронов в ЦЭК были выполнены:

- 1) измерения аксиального профиля плотности потока тепловых нейтронов, формирующегося в ЦЭК при размещении в нем ЭУ-1. Четыре измерения были проведены для ЭУ-1, заполненного раствором борной кислоты с высотой столба 250, 500, 750, 1000 мм. Одно измерение было проведено без раствора борной кислоты в ЭУ-1. Положение активационного детектора показано на рис. 2;
- 2) три измерения аксиального профиля плотности потока тепловых нейтронов, формирующегося в ЦЭК при размещении в нем ЭУ-3. Измерения были проведены для трех положений модельного топливного столба. Первое измерение – для топливного столба, центр которого был совмещен с центром активной зоны реактора. Второе измерение – для топливного столба, центр которого совмещен с координатой «+250 мм» вы-

Technical drawing of a U-shaped container with a central vertical tube and two side tubes. The drawing includes dimensions: a height of 630 mm for the central tube and a width of 56 mm for the side tubes. The drawing is labeled with numbers 1 through 6.

7

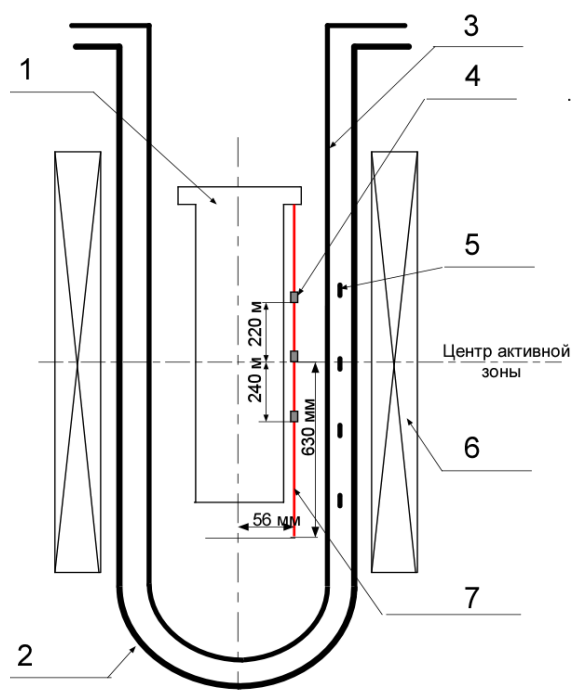


Рис. 3. Схема расположения активационного детектора и мониторов энерговыделения: 1) ампула ЭУ-1; 2) неподвижная ампула НА-228; 3) силовой чехол Ш.606; 4) монитор энерговыделения; 5) камера КтВ; 6) активная зона реактора ИГР; 7) активационный детектор

Погрешность определения распределения плотности потока тепловых нейтронов по высоте ЦЭК реактора ИГР обусловлена статистической погрешностью при радиометрических измерениях активационных детекторов и погрешностью, связанной с неопределенностью расположения данного активационного детектора. Величина полной погрешности не превышает 4 % при доверительной вероятности 0,95.

Погрешность определения абсолютного значения плотности потока тепловых нейтронов складывается из случайной погрешности измерения интенсивности гамма-излучения и систематических погрешностей, связанных, в основном, с определением следующих величин: массы делящегося материала, влияния эффекта самопоглощения в материале источника, поправки на геометрию измерения, погрешности определения эффективности регистрации гамма-квантов и погрешности величины эффективного сечения деления ядер ^{235}U тепловыми нейтронами. Погрешность определения плотности потока тепловых нейтронов составила 10 % при доверительной вероятности 0,95.

Б. Результаты измерений

Результаты измерений аксиального распределения плотности потока тепловых нейтронов показали, что экспериментальные устройства существенным образом влияют на поле нейтронов реактора ИГР, при этом форма распределения плотности потока тепловых нейтронов является характерной для каждого из них, рис. 4 и 5.

Эксперименты в обоснование определения пространственного разрешения метода определения положения возмущающего тела в ЦЭК

А. Краткое описание экспериментов

Для оценки пространственного разрешения метода определения положения возмущающих тел в ЦЭК с использованием камер КтВ были проведены эксперименты, в которых регистрировались показания камер КтВ и ионизационных камер системы измерения мощности реактора ИГР в условиях влияния на показания камер КтВ возмущений, вносимых в поле нейтронов сплошными поглощающими телами при их перемещении по вы-

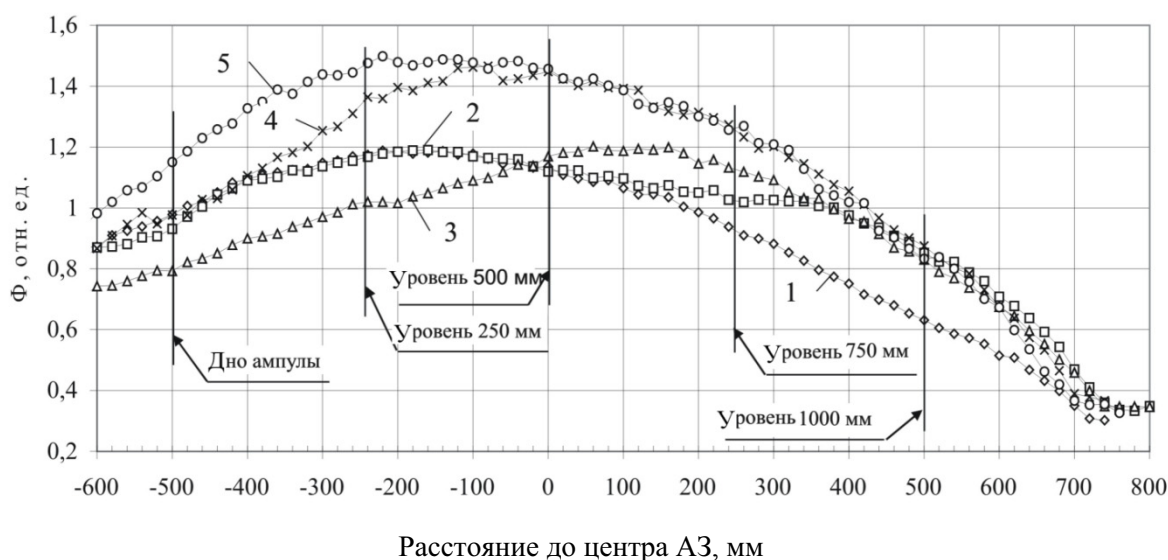


Рис. 4. Распределение плотности потока тепловых нейтронов по высоте ЦЭК в зависимости от уровня поглотителя в экспериментальном устройстве активной зоны (АЗ). Уровень водного раствора борной кислоты в ампуле: 1) 1000; 2) 750; 3) 500; 4) 250; 5) 0 мм

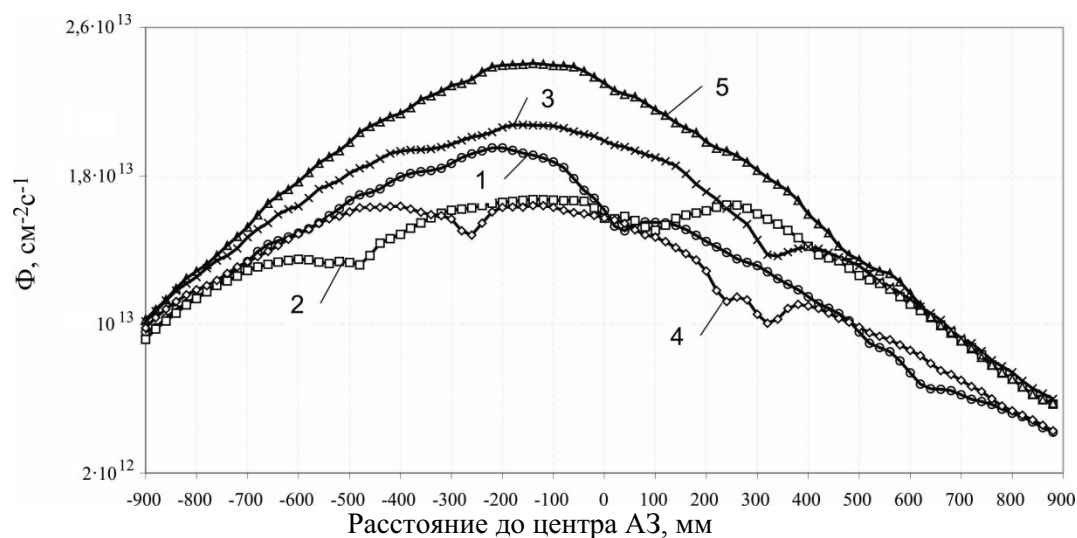


Рис. 5. Распределение плотности потока тепловых нейтронов по высоте ЦЭК в зависимости от положения модели ТВС: 1) центр ТВС на расстоянии +250 мм от центра АЗ; 2) центр ТВС на расстоянии -250 мм от центра АЗ; 3) ЭУ без ТВС расположено по центру АЗ; 4) центр ТВС на расстоянии 0 мм от центра АЗ; 5) реакторный эксперимент без установки ЭУ

соте ЦЭК. Исследования проводились с использованием ЭУ-2, ЭУ-3 и ЭУ-4, при этом в ЭУ-2 использовалась только такая группа кадмиевых колец, которые камерами КТВ воспринимаются как одно целое.

Для удобства графического представления результаты измерения токов различных ионизационных камер преобразовывались в значения потока нейтронов с использованием коэффициентов пересчета, полученных по результатам калибровочных экспериментов, в соответствии с соотношением:

$$\Phi_i = (I_i / I_{ik}) \Phi_{\max},$$

где Φ_i – текущее условное значение потока нейтронов в ЦЭК, рассчитанное по показаниям i -й камеры, усл. ед.; I_i – текущее значение тока i -й камеры в калибровочном пуске, мкА; I_{ik} – максимальное

значение тока i -й камеры в калибровочном пуске, мкА; $\Phi_{\max}$ – максимальное условное значение потока нейтронов в ЦЭК в калибровочном пуске, принятое за единицу потока, усл. ед.

Б. Результаты измерений

Измерение положения и скорости перемещения ЭУ осуществлялось по характеристикам механического подвеса и привода устройства перемещения. Начальное положение задавалось и определялось исходной длиной тяг. В ходе эксперимента длина тяг изменялась при помощи механического привода. Скорость перемещения ЭУ определялась по частоте вращения двигателя устройства привода тяг. Результаты измерений параметров в реакторном эксперименте с ЭУ-4 приведены на рис. 6.

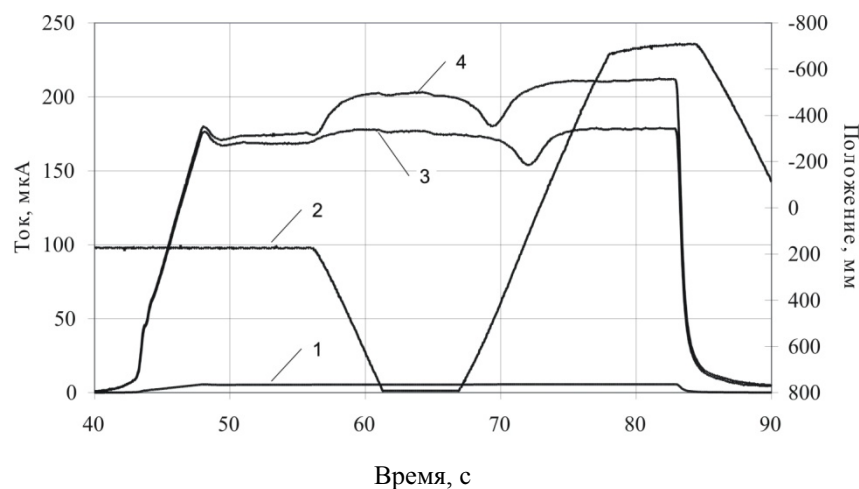


Рис. 6. Диаграмма изменения показаний детекторов нейтронного потока и положения экспериментального устройства в реакторном эксперименте с ЭУ-4: 1) ИК6; 2) положение ЭУ; 3) 1655n1; 4) 1855n1

Анализ результатов экспериментов по определению пространственного разрешения

Определение функции влияния поглощающего блока на поток нейтронов (ток камер КтВ) по результатам исследований с перемещением ЭУ. Функцию влияния поглощающего блока на поток нейтронов (ток выбранной камеры КтВ) будем определять в виде:

$$f(z) = \frac{\frac{I_{K+V}^1}{I_{ID}^1}(T, z_1)}{\frac{I_{K+V}^0}{I_{ID}^0}(T, z_0)},$$

где I_{K+V}^0 , I_{ID}^0 – средние значения токов камеры КтВ и ионизационной камеры в начальной фазе эксперимента; I_{K+V}^1 , I_{ID}^1 – текущие значения токов камер КтВ и ионизационных камер для фазы эксперимента; $f(z)$ – расчетные значения функции влияния для различного положения z поглощающего блока относительно выбранной камеры КтВ.

Выбор вида аппроксимирующей зависимости для функции $f(z)$. Для того, чтобы описать набор экспериментальных значений $f(z)$ непрерывной функцией с наилучшим приближением, необходимо выбрать тип аппроксимирующей зависимости. Очевидно, что искомая функция будет того же типа, который имеет функция распределения потока нейтронов около поглощающего блока того вида, который использовался в эксперименте. При обработке результатов анализу подлежат текущие (в зависимости от времени) значения токов камер КтВ и ионизационных камер, интегральные значения активности ионизационных детекторов, текущие значения координат поглощающих блоков. Задача обработки экспериментальных данных сводится к исследованию математической связи пар переменных, одной из которых является значение тока или интегральной активности, а второй – значение координаты поглощающего блока.

Для средней части цилиндрического поглощающего блока, которая действует на поток нейтронов так же как бесконечный цилиндр, значение функции $f(z)$ будет постоянным в точке, которая выбрана для установки детектора нейтронного потока. Для торцов цилиндрического блока, которые действуют на поток нейтронов так же как шар, функция будет иметь вид:

$$f \sim \left(1 - C \frac{L}{r}\right).$$

Приведенная функция является нелинейной, поэтому для упрощения процедуры проведения аппроксимации необходимо привести ее к линейному виду, выполнив замену аргумента $1/r = x$. Для аргумента x может быть применена аппроксимация экспериментальных точек линейной функцией вида $y = A + Bx$ с использованием метода наименьших квадратов. Учитывая то, что $r^2 = R^2 + z^2$, можно определить область существования функции $(A + Bx)$:

- эта функция определена только для положительных значений аргумента x в диапазоне значений $x=0$ (при $z=\infty$) и $x=1/R$ (при $z=0$);
- значение функции $(A + Bx)$ в точке $x=0$ соответствует влиянию поглощающего блока, удаленного в бесконечность, на показания детектора КтВ (следует ожидать, что детектор будет измерять невозмущенный поток нейтронов);
- значение функции $(A + Bx)$ в точке $x=1/R$ соответствует максимальному влиянию поглощающего блока, приближенного к детектору КтВ на минимальное расстояние.

Определение пространственного разрешения датчиков нейтронного потока для исследованных поглощающих блоков. Предположим, что в калибровочном эксперименте получен набор экспериментальных данных, которые необходимы для построения аппроксимирующей функции, описывающей влияние поглощающего блока на показания камер КтВ в зависимости от параметра x . Для определения пространственной координаты поглощающего блока удобнее экспериментальные данные описать функцией зависимости координаты x от значения y , а именно:

$$x = (y - A) / B,$$

или

$$x = yC + D.$$

Как указывалось выше, значение аппроксимирующей функции может быть получено методом наименьших квадратов, а оценка величины достоверности аппроксимации и погрешности в измерениях (или, что корректнее, в определении значений x_i) может быть выполнена по известным соотношениям [9]. Погрешность σ_z является искомой величиной пространственного разрешения детекторов нейтронного потока для конкретного поглощающего блока, так как является оценкой неточности определения истинного значения величины z :

$$z \pm \sigma_z = \sqrt{\frac{1}{x^2} - R^2} \left(1 \pm \frac{1}{x(1 - x^2 R^2)} \sigma_x \right).$$

Результаты последовательного применения методики определения пространственного разрешения к данным, полученным в эксперименте с ЭУ-4, иллюстрирует рис. 7, где приведены результаты прямых измерений токов камер (а), по которым после определения функция возмущения потока в присутствии поглощающих блоков ЭУ и линейной аппроксимации функции возмущения потока определена линейная зависимость аргумента от значения функции возмущения (б). Обработка результатов эксперимента по определению пространственного разрешения с ЭУ-4 проводилась без какой-либо дополнительной корректировки на форму и размеры устройства, что подтвердило разумность допущения о возможности описания возмущения потока нейтронов около ЭУ-4 (с поглощающими кольцами, разнесенными на расстояние ~200 мм) функцией, справедливой для поглощающей сферы.

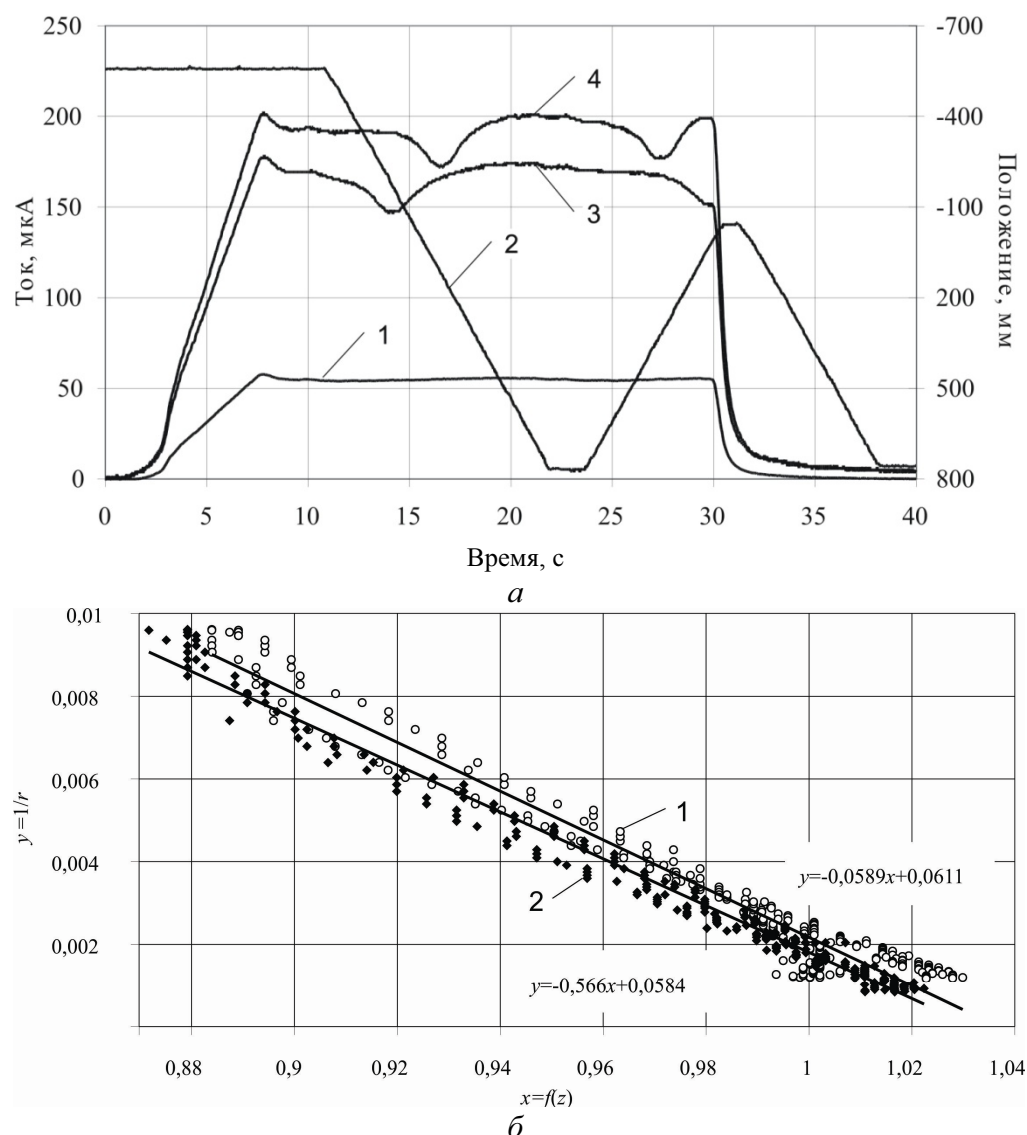


Рис. 7. Результат обработки экспериментальных данных при определении пространственного разрешения с ЭУ-3: а) прямые измерения токов камер, ИК14 – 1; положение ЭУ – 2; 1855n1 – 3; 1855n2 – 4; б) зависимость аргумента от значения функции возмущения, 1855n1 – 1; 1855n2 – 2

Результаты последовательного применения методики определения пространственного разрешения по отношению к топливной сборке, размещенной в ЭУ-3, иллюстрирует рис. 8. На нем представлены результаты прямых измерений токов камер (а), по которым после определения функции возмущения потока в присутствии модельной топливной сборки и линейной аппроксимации функции возмущения потока (без составляющей возмущения от протяженного цилиндра) определена линейная зависимость аргумента от значения функции возмущения (б).

Величина погрешности определения положения поглощающего блока σ_z зависит от величины z (расстояние от точки наблюдения до поглощающего блока), рис. 9.

Из рис. 9 видно, что погрешность определения положения поглощающего блока увеличивается с расстоянием и асимптотически приближается к бесконечности в области максимального сближения с датчиком.

Таблица. Пространственное разрешение камер КтВ по отношению к исследованным ЭУ

Тип ЭУ	Пространственное разрешение K_z , мм					
	K_{10}	K_{100}	K_{300}	K_{500}	K_{700}	K_{1000}
ЭУ-1	200	50	185	460	875	1760
ЭУ-2	80	20	75	190	355	710
ЭУ-3	65	20	60	150	290	580
ЭУ-4	20	5	20	40	80	160

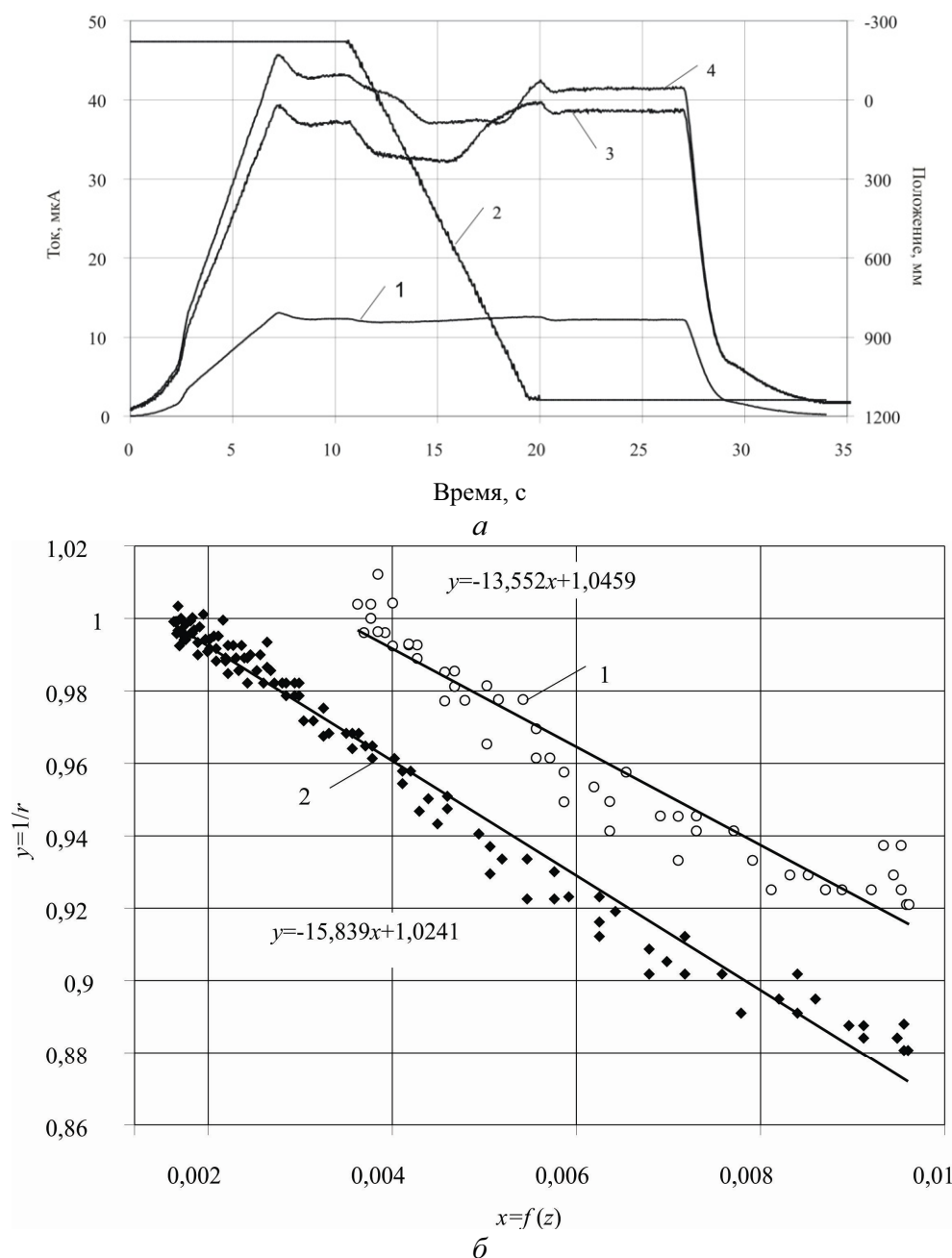


Рис. 8. Результат обработки экспериментальных данных при определении пространственного разрешения с ЭУ-3: а) прямые измерения токов камер, ИК4 – 1; положение ЭУ – 2; 1855n1 – 3; 1855n2 – 4; б) зависимость аргумента от значения функции возмущения, 1855n1 – 1; 1855n2 – 2

В таблице приведены значения величины погрешности определения положения (пространственного разрешения) для ЭУ в зависимости от расстояния до камеры КтВ.

Выводы

1. Разработана процедура определения дискретных количественных значений возмущающего воздействия экспериментального устройства на поток тепловых нейтронов по высоте центрального экспериментального канала.

2. Установлена связь между параметрами функции возмущения и параметрами перемещения экспериментального устройства в центральном экспериментальном канале.

3. Выведены аналитические зависимости для определения пространственного разрешения камер КтВ. Предложено аппроксимировать функцию влияния зависимостью, идентичной функции распределения потока тепловых нейтронов около поглощающего блока цилиндрической формы.

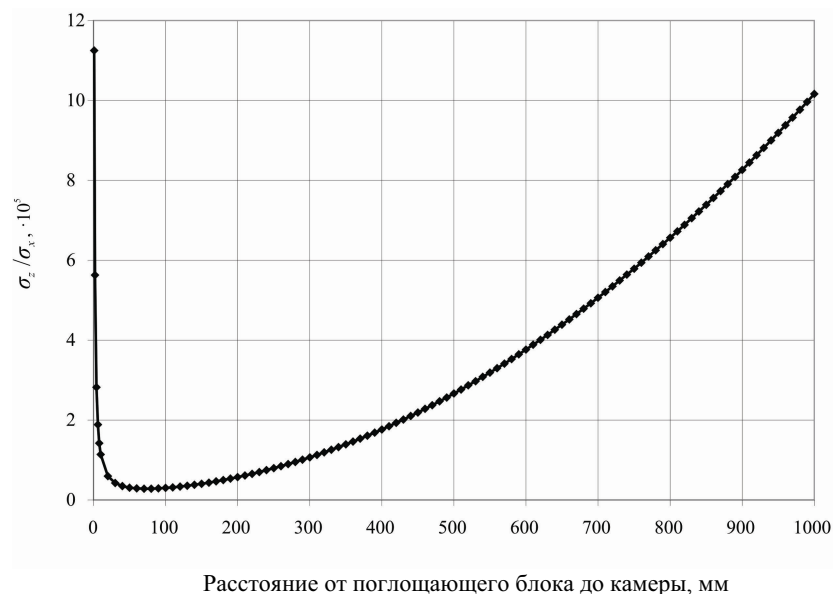


Рис. 9. Зависимость σ_z/σ_x от расстояния между поглощающим блоком и камерой КТВ

4. Выполнена проверка разработанной методики и показана возможность ее применения для косвенного определения положения экспериментальных устройств по высоте центрального экспериментального канала.
5. Методика может быть использована для определения параметров перемещения топлива в реакторах, оснащенных системой измерения локальных значений плотности потока тепловых нейтронов в области влияния на него топлива экспериментального устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CABRI: reactor description and test program / Institut de Protection et de Surete Nucleaire, Project Shneller Brueter. – Edition DSN – CEN Fontenay-aux-Roses, Octobre 1981. – 34 p.
2. Kayser G., Charpenel J., Jamond C. Summary of the SCARBEE-N subassembly melting and propogation tests with an application to a hypothetical total instantaneous blockage in a reactor // Nuclear Science and Engineering. – 1998. – V. 128. – P. 144–185.
3. Фройнд Г.А., Искендериан Х.П., Окrent Д. Импульсный реактор TREAT с графитовым замедлителем для экспериментов по кинетике // Доклад Р-1848 на II Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии. – 1958. – Т. 10. – С. 461.
4. Горин Н.В. и др. Оценка характеристик годоскопа реактора МИГР // Известия Челябинского научного центра. – 2002. – Вып. 4. – С. 28–33.
5. Паспорт. Камера триаксиальная внутризонная. КТВ.521.000 ПС-ЛУ. – ФГУП НИКИЭТ, 2004. – 10 с.
6. Володько Ю.В. и др. Испытания комптоновских эмиссионных детекторов нейтронов и триаксиальных камер деления в импульсном реакторе // Атомная энергия. – 1988. – Т. 65. – № 1. – С. 59–63.
7. Брикман Б.А. и др. Внутрореакторная дозиметрия: практическое руководство. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 121 с.
8. Токтаганов М.О., Попов Ю.А. Определение энерговыделения в топливных детекторах гамма-спектрометрическим методом при проведении испытаний на реакторе ИГР. – Курчатов: Изд-во ИАЭ, 2001. – 16 с.
9. Ясельский В.К., Кузнецов А.И., Дядик В.Ф. Обработка результатов измерений. – Томск: Изд-во ТПИ, 1977. – 95 с.

Поступила 24.11.2010 г.