

---

---

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РОСТА ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ПО СИГНАЛУ ПОДЗОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПУТЕМ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ

С.О. Гринько

ОАО «НИКИЭТ»

*ул. М. Красносельская, 2/8, Москва, Россия, 107140*

В статье описывается алгоритм определения координат источника локального роста плотности потока нейтронов (ППН) в реакторе. Предлагаемый алгоритм позволяет определить расположение источника роста ППН по сигналам трех или более детекторов. В качестве детекторов используются ионизационные камеры деления (ИК), распределенные под активной зоной реактора.

Задача решена в двухмерном приближении. Алгоритм основан на использовании экспериментально полученной зависимости сигнала подзонной ИК от расстояния до источника роста ППН. Из трех уравнений, определяющих сигналы камер, составляется система с тремя неизвестными. Система решается численным методом.

Алгоритм был реализован в программе на языке C++. В качестве входных данных для оценки его точности использовались данные, полученные в результате испытаний на рассматриваемом реакторе в 2007—2008 гг., в ходе которых в отдельные ячейки активной зоны вносилось возмущение реактивности.

**Ключевые слова:** ядерный реактор, плотность потока нейтронов, подзонный детектор, ионизационная камера деления.

Задача локализации источников роста плотности потока нейтронов (ППН) в ядерном реакторе по сигналу ионизационных камер деления (ИК), распределенных под активной зоной, актуальна для повышения безопасности установки. Для обеспечения безопасной эксплуатации реактора важно иметь возможность оперативно определять координаты тепловыделяющей сборки (ТВС) или поглощающего стержня, являющихся причиной роста ППН. Локальное повышение ППН может возникать, например, вследствие ошибки в ходе перегрузки топливных сборок или при самопроизвольном перемещении стержней системы управления и защиты (СУЗ). Независимо от причины возникновения локального роста ППН в задачу системы контроля энерговыделения (СКЭ) входит определение его координат и выдача рекомендаций по блокировке извлечения ближайших стержней СУЗ.

Алгоритм, предложенный в данной статье, рассматривается как возможная альтернатива или дополнение алгоритма предложенного автором в [1]. Алгоритм, описанный в работе [1], способен локализовать источник аномального роста ППН в активной зоне рассматриваемого реактора с погрешностью не более одного шага решетки активной зоны.

Задачи исследования:

— в качестве альтернативы алгоритму, описанному в [1], предложить алгоритм определения двухмерных координат источника локального роста ППН в активной зоне, с использованием в качестве входных данных координат трех или более подзонных ИК и их токовых сигналов;

— реализовать предлагаемый альтернативный алгоритм в виде программы для персонального компьютера и протестировать его с использованием данных, полученных в ходе испытаний на рассматриваемом реакторе в 2007—2008 гг.;

— сравнить результаты тестирования предлагаемого алгоритма с результатами тестирования алгоритма, предложенного в работе [1].

Подзонные ИК входят в систему СКЭ, контролирующую энерговыделение в активной зоне. В задачу системы СКЭ входит определение координат источника локального роста ППН на энергетических уровнях мощности реактора, выдача этой информации оператору и рекомендации по блокировке стержней СУЗ, перемещаемых вблизи источника роста ППН. В функции системы СКЭ не входит непосредственное управление оборудованием систем защиты реактора.

Подзонные ИК способны регистрировать рост ППН в нижних слоях активной зоны, источником которого является ТВС или стержень СУЗ на расстоянии до пяти шагов решетки активной зоны. ИК распределены под активной зоной реактора таким образом, что в радиусе пяти шагов решетки вокруг каждой ячейки находятся как минимум три ИК. Предлагаемый алгоритм позволит определить координаты источника роста ППН неизвестной амплитуды по сигналу трех или более ИК.

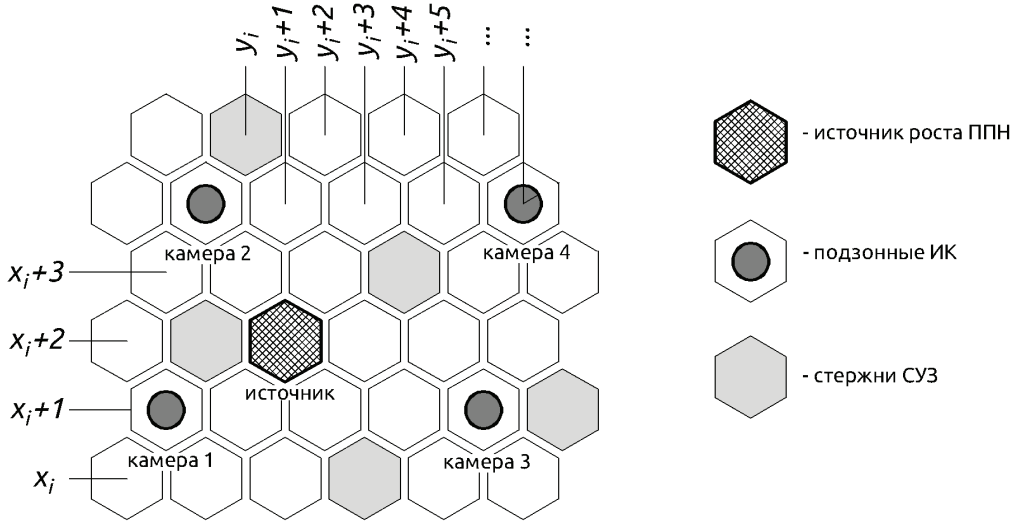
**Метод решения задачи.** Также как и в работе [1], была использована двухмерная модель. Расположенные в одной плоскости под активной зоной ИК малочувствительны к изменениям в поле ППН в верхних слоях активной зоны. В алгоритме не учитывается неравномерность распределения энерговыделения по высоте ТВС. Как подтверждает практика, энерговыделение в нижней части активной зоны в общем случае превышает энерговыделение в верхней части. Использование завышенного сигнала ведет к перестраховке и является приемлемым с точки зрения безопасности.

Сигнал подзонной ИК, регистрирующей рост ППН, также зависит от неравномерной загрузки активной зоны и выгорания топлива в ближайших ТВС. Непосредственный нейтронно-физический расчет сигналов подзонных ИК при возникновении в активной зоне локального роста ППН пока не представляется возможным из-за сложностей, связанных с заданием начальных условий, описывающих текущий вариант загрузки и выгорание. В предлагаемом алгоритме в рассмотренных испытаниях сигналы ИК, искаженные различной загрузкой активной зоной и выгоранием, были усреднены при получении функции зависимости относительного изменения сигнала ИК от расстояния до источника роста ППН.

На рис. 1 показан фрагмент активной зоны в проекции на горизонтальную плоскость. Показано возможное расположение ячейки-источника роста ППН и камер, регистрирующих рост ППН. Серым цветом закрашены ячейки, в которых находятся поглощающие стержни СУЗ. Расстояние между центрами соседних стержней СУЗ — 2,65 шага решетки.

В данном алгоритме в качестве меры скорости изменения ППН, регистрируемой камерами, выбрано изменение токового сигнала  $i$  камеры за некоторое время  $\tau$  (1).

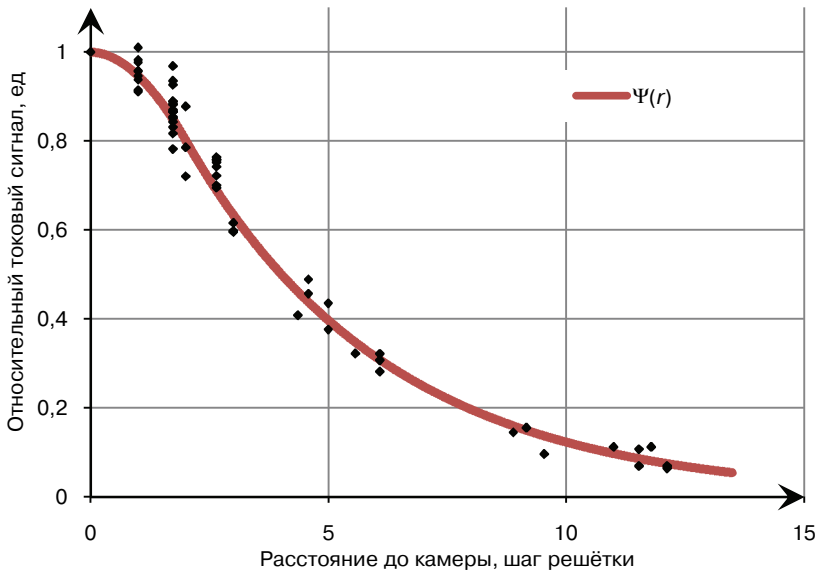
$$I_i = \frac{i(t) - i(t - \tau)}{i(t - \tau)}. \quad (1)$$



**Рис. 1.** Фрагмент активной зоны с возможным расположением источника роста ППН и ИК, регистрирующих этот рост

Алгоритм определяет координаты источника роста ППН неизвестной величины, используя экспериментально полученную зависимость  $\Psi(r)$ , описывающую изменения сигнала подзонной камеры от расстояния до источника роста ППН, описанную в работе [1].

Физический смысл функции  $\Psi(r)$  — величина сигнала камеры, находящейся на расстоянии  $r$  от источника всплеска реактивности, по отношению к сигналу камеры, если бы она находилась непосредственно под источником ( $r = 0$ ). Функция  $\Psi(r)$  имеет вид, показанный на рис. 2.



**Рис. 2.** Функция относительного сигнала ИК от расстояния до источника роста ППН

Пусть в некоторой ячейке имеется источник роста реактивности и камера, находящаяся непосредственно под этой ячейкой, регистрирует изменение ППН на  $W$  процентов, тогда относительное изменение сигнала  $I_i$  камеры, находящейся на расстоянии  $r_i$  будет равно

$$I_i = W \cdot \Psi(r_i). \quad (2)$$

При этом в радиально симметричной функции  $\Psi(r)$  не учитываются неоднородности поля ППН в активной зоне, связанные с выгоранием и неравномерной загрузкой реактора. Сигнал ИК, вычисленный по формуле (3) согласуется с сигналами ИК, рассчитанными теоретически как сумма вкладов мощностей отдельных ТВС в отклик ИК.

Алгоритм работает следующим образом.

При регистрации одной из подзонных ИК относительного изменения сигнала, превышающего выбранную уставку, из всех подзонных ИК выбираются три, регистрирующие наибольшее относительное изменение сигнала. Координаты этих камер и регистрируемые ими сигналы используются в качестве входных данных алгоритма.

Используя функцию  $\Psi(r)$ , можно выразить относительные изменения сигналов трех камер через неизвестные расстояния до источника всплеска реактивности:

$$I_1 = W \cdot \Psi(r_1), \quad I_2 = W \cdot \Psi(r_2), \quad I_3 = W \cdot \Psi(r_3), \quad (3)$$

где  $I_{1,2,3}$  — относительное изменение сигнала трех камер;  $r_{1,2,3}$  — расстояние от камер до источника всплеска ППН,  $W$  — теоретическое относительное изменение сигнала камеры, находящейся непосредственно под ячейкой-источником всплеска ППН.

Расстояния  $r_i$  можно выразить через известные координаты трех камер —  $x_{1,2,3}$  и  $y_{1,2,3}$  — и неизвестные координаты источника —  $x$  и  $y$ , используя теорему Пифагора для координат в шестигранной решетке. Выражения, описывающие сигнал трех подзонных ИК, представляют собой систему (4) из трех уравнений с тремя неизвестными —  $x$ ,  $y$ ,  $W$ :

$$\begin{cases} I_1 = W \cdot \Psi\left(\sqrt{\sin^2 60^\circ \cdot (x_1 - x)^2 + \sin^2 30^\circ \cdot (y_1 - y)^2}\right) \\ I_2 = W \cdot \Psi\left(\sqrt{\sin^2 60^\circ \cdot (x_2 - x)^2 + \sin^2 30^\circ \cdot (y_2 - y)^2}\right) \\ I_3 = W \cdot \Psi\left(\sqrt{\sin^2 60^\circ \cdot (x_3 - x)^2 + \sin^2 30^\circ \cdot (y_3 - y)^2}\right) \end{cases} \quad (4)$$

В данной работе для решения этой системы были использованы алгоритм градиентного спуска [2] и алгоритм Левенберга—Марквардта [3].

В качестве начальных значений переменных  $x$  и  $y$  используются средние значения координат ИК  $x_1, x_2, x_3$  и  $y_1, y_2, y_3$  соответственно. В качестве начального значения переменной  $W$  используется максимальный из трех сигналов  $I_1, I_2$  и  $I_3$ .

Если рост ППН регистрируют более чем три ИК, то в систему (4) можно добавить дополнительные уравнения. В результате получится переопределенная система, и координаты источника роста ППН следует рассчитывать как минимальный вектор невязки.

**Тестирование метода на модельной задаче.** Алгоритм был реализован в программе для ПК на языке C++ и опробован на результатах испытаний, проведенных на реакторе в 2007—2008 гг., в которых создавались источники локального роста ППН в отдельных ячейках.

Как и в работе [1], в качестве входных данных для программы задавались координаты трех ИК и величина изменения их токового сигнала, соответствующие различным состояниям реактора в ходе испытаний. В большинстве случаев использовались три камеры с максимальными сигналами. Затем предполагаемые координаты источника, рассчитанные программой по предложенному алгоритму, сравнивались с координатами источника повышения реактивности, в действительности использованного в данный момент испытаний.

Сравнение предсказаний алгоритма и фактических координат источника роста реактивности показано в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнение предсказаний алгоритма с действительными координатами источника**

Действительный номер ячейки		Предсказанный номер ячейки		$\Delta x$ , шаг решетки	$\Delta y$ , шаг решетки	Расстояние от реальной ячейки, шаг решетки
20	29	19,29	28,80	0,71	0,19	0,62
20	29	18,97	29,46	1,02	-0,47	0,92
20	29	18,97	29,46	0,16	0,30	0,20
20	29	19,83	28,65	0,17	0,34	0,23
20	29	19,92	28,36	0,08	0,63	0,32
20	29	19,53	28,71	0,47	0,29	0,43
21	16	21,34	14,65	-0,34	1,35	0,74
21	16	21,45	15,01	-0,45	0,98	0,63
21	16	21,41	15,37	-0,41	0,63	0,48
21	30	20,51	29,39	0,48	0,61	0,52
21	30	20,01	29,59	0,98	0,40	0,88
21	30	20,40	29,15	0,59	0,84	0,67
21	30	20,65	29,11	0,35	0,89	0,53
21	30	20,40	29,19	0,59	0,80	0,65
21	30	20,59	28,98	0,40	1,01	0,62
21	30	20,87	29,21	0,12	0,78	0,40
21	30	19,96	29,58	1,03	0,42	0,92
21	30	20,70	28,77	0,30	1,23	0,67
21	30	20,93	29,12	0,07	0,87	0,44
21	30	20,08	29,44	0,91	0,56	0,84

Окончание

Действительный номер ячейки		Предсказанный номер ячейки		$\Delta x$ , шаг решетки	$\Delta y$ , шаг решетки	Расстояние от реальной ячейки, шаг решетки
21	30	20,77	28,69	0,23	1,30	0,68
21	30	20,95	29,13	0,05	0,86	0,43
21	30	20,11	29,45	0,89	0,55	0,82
21	30	20,79	28,70	0,21	1,29	0,67
21	30	21,09	29,37	-0,09	0,62	0,32
21	30	19,86	29,98	1,13	0,01	0,98
21	30	20,89	28,79	0,11	1,20	0,61
		Средняя ошибка, шаг решетки				<b>0,60</b>
		Максимальная ошибка, шаг решетки				<b>0,98</b>
		Минимальная ошибка, шаг решетки				<b>0,20</b>

Предсказанные координаты и соответствующие погрешности, полученные путем решения системы (4) методами градиентного спуска и методом Левенберга—Марквардта и представленные в табл. 1, полностью совпали с координатами, предсказанными алгоритмом, описанным в работе [1]. При достаточном количестве итераций при решении системы (4) численными методами и при использовании алгоритма [6] предсказанные координаты совпадали с любой заданной точностью (в эксперименте было проверено совпадение до седьмого знака после запятой). В данном случае под точностью понимается близость решения к точному аналитическому решению системы (4), а не близость к реальным координатам источника.

Было проведено сравнение времени работы каждого из методов — двух алгоритмов решения системы (4) и алгоритма, использующего геометрические преобразования [1]. Каждый алгоритм был исполнен в цикле 30 000 раз, и затем суммарное время выполнения цикла было поделено на 30 000. Программные модули выполнялись на персональном компьютере с процессором Intel Core i5 с двумя гигабайтами оперативной памяти в операционной системе QNX 6.5.0, которая будет использоваться в системе СКЭ. В табл. 2 показано среднее время выполнения функций, реализующих каждый из алгоритмов. Показано время поиска координат с различной точностью от погрешности  $\pm 10^{-1}$  до  $\pm 10^{-7}$  шага решетки активной зоны.

Таблица 2

**Сравнение времени выполнения различных алгоритмов локализации**

Погрешность, шаг решетки		$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
Время работы алгоритма, мс	Метод, описанный в работе [1]	0,023	0,034	0,043	0,050	0,057	0,066	0,073
	Алгоритм Левенберга—Марквардта	0,404	0,882	1,266	1,652	2,035	2,418	2,901
	Градиентный спуск	0,966	3,992	7,660	11,326	15,289	18,938	22,800

**Обсуждение результатов.** Алгоритм исправно определял местоположение источника локального роста ППН с ошибкой не более одного шага решетки независимо от величины внесенной реактивности. Координаты, предсказанные данными методами, полностью совпали с предсказаниями метода [1]. Также при решении системы (4) вычисляется условная «амплитуда» всплеска —  $W$  — сигнал гипотетической подзонной камеры, если бы она находилась непосредственно под ячейкой, в которую была внесена дополнительная реактивность.

Как видно из табл. 2, алгоритм [1], использующий геометрические построения для решения системы (4), работает значительно быстрее, чем численные методы, используемые для непосредственного решения системы (4). При малой точности поиска координат (погрешность до 0,1 шага решетки активной зоны) алгоритм, использующий геометрические преобразования, работает почти в 20 раз быстрее, чем алгоритм Левенберга—Марквардта.

Как и в работе [1], в общем случае система (4) может иметь два решения. При тестировании предложенного алгоритма на имеющихся экспериментальных данных предсказанные координаты с учетом погрешности всегда совпадали с координатами источника. Однако при эксплуатации и проведении дальнейших испытаний теоретически возможны ситуации, при которых использование усредненных координат в качестве начального значения переменных  $x, y$  может привести к неправильному решению.

В дальнейшем при проведении испытаний уже на модернизированном реакторе, необходимо получить данные для уточнения вида зависимости  $\Psi(r)$ . Также, используя эти данные, следует скорректировать функцию  $\Psi(r)$  с учетом возможных конструктивных изменений в активной зоне, сделанных в ходе модернизации реактора.

\*\*\*

На основе данных, полученных в ходе испытаний по регистрации сигналов подзонных ИК при внесении в отдельные ячейки активной зоны дополнительной реактивности, проведенных в 2007—2008 гг. на ядерном реакторе, был разработан алгоритм определения координат источника аномального роста ППН.

Алгоритм базируется на использовании координат и сигналов трех или более подзонных ИК, регистрирующих наибольшее относительное изменение ППН. Разработанный алгоритм был реализован в программе для персонального компьютера на языке C++. В ходе тестирования алгоритма в качестве входных данных задавались координаты и сигналы камер, регистрировавших локальный рост ППН в ходе испытаний, проведенных на реакторе в 2007—2008 гг.

Результаты сравнения предсказаний алгоритма и действительных координат источника локального роста ППН находятся в хорошем соответствии. Ошибка определения координат не превышает одного шага решетки активной зоны. Средняя ошибка в определении координат — 0,60 шага решетки. Координаты, предсказанные данным методом, полностью совпали с предсказаниями алгоритма, описанного в работе [1].

Проведено сравнение предлагаемого алгоритма с алгоритмом, предложенным в работе [1] и использующим геометрические построения для решения системы (4), с точки зрения быстродействия. Оба алгоритма способны решить систему с заданной точностью при достаточном количестве итераций.

В будущем для совершенствования работы алгоритма необходимо проведение испытаний для уточнения формы зависимости  $\Psi(r)$ . Для повышения точности полученных результатов следует учесть влияние на сигналы камер положения ближайших стержней СУЗ.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Гринько С.О.* Определение координат источника локального роста плотности потока нейтронов в ядерном реакторе по сигналу подзонных ионизационных камер // *Современные проблемы науки и образования*. — 2013. — № 6. [*Grinko S.O.* Opredelenie koordinat istochnika lokal'nogo rosta plotnosti potoka neytronov v yadernom reaktore po signalu podzonnih ionizatsionnih kamer // *Sovremenniye problemi nauki i obrazovaniya*. — 2013. — № 6.]
- [2] *Avriel M.* *Nonlinear Programming: Analysis and Methods*. Courier Dover Publications. — 2003. — С. 288—299.
- [3] *Manolis I.A. Lourakis A.* Brief Description of the Levenberg-Marquardt Algorithm Implemented by levmar. Technical Report. Institute of Computer Science, Foundation for Research and Technology. — Hellas, 2005.

### LOCALIZATION OF A NEUTRON FLUX INCREASE SOURCE IN THE NUCLEAR REACTOR USING THE SIGNAL OF THE UNDER-CORE DETECTORS BY SOLVING A SYSTEM OF NON-LINEAR EQUATIONS

**S.O. Grinko**

OJSC NIKIET

*M. Krasnoselskaya str., 2/8, Moscow, Russia, 107140*

The algorithm of localization of an irregular neutron flux source in the core of the nuclear reactor is suggested. The algorithm allows determining the position of the neutron flux source using the signals of the three or more nearest to the source detectors. The detectors are fission chambers distributed under the bottom of the core.

The problem is solved in the two dimensional approximation. The algorithm is based on the experimentally obtained functional connection between the camera signal and the distance to the source of the flux increase. A system of equations in three unknowns is formed of the three equations describing cameras signals. The system is solved by numerical computations.

The algorithm was implemented in the program in the C++ language. The results obtained during the experiments carried out on the reactor in the years 2007-2008 when local increases of the reactivity were generated were used as the input data for measuring the accuracy of the algorithm.

**Key words:** nuclear reactor, localization, neutron flux, algorithm, power flux.