

Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»

На правах рукописи

ГРИНЬКО Сергей Олегович

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ
БЕЗЫНЕРЦИОННОГО КОНТРОЛЯ И
УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ
ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ РЕАКТОРА
БАССЕЙНОВОГО ТИПА НА ОСНОВЕ
КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
СИГНАЛОВ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР И
ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ**

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие
системы (промышленность, наука и научное обслуживание)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт».

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Борис Васильевич Кутеев
НИЦ «Курчатовский институт»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
Завадский Михаил Игоревич
АО «АТОМПРОЕКТ», советник Генерального директора, учёный
секретарь НТС

кандидат физико-математических наук
Руссков Александр Алексеевич
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, младший научный сотрудник

Ведущая организация:

ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Защита диссертации состоится 16 марта 2015 г. в 14 часов 00 минут в конференц-зале К-608 на заседании диссертационного совета Д 212.130.02 в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», расположенном по адресу: 115409, Москва, Каширское ш., д.31, тел.(499) 324-87-66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан « » февраля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д. т. н., профессор



П.К. Скоробогатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Система контроля энерговыделения (СКЭ) необходима для использования на реакторе бассейнового типа. В настоящий момент рассматриваемый реактор остановлен и находится в процессе модернизации. Завершение модернизации и запуск реактора запланированы на 2015 год.

Одним из обязательных требований к системе СКЭ является возможность определения координат источника локального аномального роста энерговыделения. Для выполнения этого требования необходим алгоритм, который позволит локализовать источник роста энерговыделения по сигналам детекторов, распределённых под активной зоной.

Существующие методы локализации источников излучения, как в области геолокации, так и в области реакторного контроля не позволяют определить координаты источника роста плотности потока нейтронов (ППН) в активной зоне реактора больших размеров с использованием ограниченного числа датчиков.

Предлагаемые в данной работе алгоритмы локализации будут использованы в программном обеспечении системы СКЭ.

Целью работы является разработка алгоритма определения координат источника аномального роста энерговыделения в активной зоне реактора бассейнового типа; в качестве входных данных используются сигналы ионизационных камер деления, распределённых под активной зоной.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

1. Разработаны алгоритмы локализации источника локального роста энерговыделения, использующие в качестве входных данных сигналы и координаты трёх подзонных камер деления;
2. Проведено тестирование каждого из предложенных алгоритмов с использованием данных, полученных в ходе экспериментов на рассматриваемом реакторе по внесению в активную зону возмущений по реактивности;
3. Проведены оценка и сравнение погрешности определения координат источника каждого из предложенных алгоритмов локализации;
4. Проведены оценка и сравнение быстродействия каждого из предложенных алгоритмов локализации;
5. Оценена возможность определения отдельных ТВС или ближайших к источнику поглощающих стержней системы управления и защиты (СУЗ) каждым из алгоритмов;
6. Даны рекомендации по выбору одного из предложенных алгоритмов или комбинации из предложенных алгоритмов для использования в системе СКЭ рассматриваемого реактора.

Объектом исследования является экспериментальный образец системы СКЭ, который использовался на рассматриваемом реакторе до его остановки.

Рассматриваемый реактор, функционирующий на обычной воде, был пущен эксплуатирующей организацией в 1985 году. По конструкции это - реактор бассейнового типа, в котором теплоносителем и замедлителем одновременно является легкая вода высокой степени очистки.

Определение участков резкого возрастания плотности потока нейтронов позволяет выравнивать распределение и предотвращать аварийные ситуации путём своевременного регулирования положения поглощающих элементов, при этом обеспечивается равномерное облучение нагруженных изделий по всей активной зоне. Источником локального всплеска реактивности может являться неисправная тепловыделяющая сборка (ТВС) или поглощающий стержень системы управления и защиты (СУЗ), самопроизвольно перемещающийся вследствие неисправности.

В ходе модернизации рассматриваемого реактора бассейнового типа для обеспечения безопасности эксплуатации разрабатывается система контроля энерговыделения – СКЭ, которая позволит оперативно осуществлять локализацию источника аномального роста ППН в любой точке активной зоны реактора.

Система СКЭ осуществляет контроль поля энерговыделения на энергетических уровнях мощности; на таких уровнях мощности в критическом состоянии реактора неконтролируемое локальное повышение энерговыделения может привести к аварийной ситуации. В задачи системы СКЭ входит локализация источника локального роста ППН и выдача рекомендаций по блокировке извлечения одного или нескольких стержней, ближайших к этому источнику. В функции системы СКЭ не входит непосредственно управление оборудованием систем защиты реактора.

В качестве входных данных система СКЭ использует сигналы ионизационных камер деления, расположенных под активной зоной.

Предметом исследования является возможность локализации источника аномального энерговыделения в активной зоне с использованием разработанных алгоритмов.

Научная новизна работы:

1. Показана принципиальная возможность локализации источника аномального роста энерговыделения в активной зоне с помощью предложенных алгоритмов.
2. Проведено сравнение точности локализации каждого из алгоритмов.
3. Исследовано быстроедействие каждого из алгоритмов, реализованных в виде программ на языке C++ для операционной системы QNX 6.5.0.
4. Оценена возможность локализации отдельных ТВС и ближайших поглощающих стержней СУЗ предложенными алгоритмами.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны алгоритмы локализации источника аномального роста энерговыделения в активной зоне реактора бассейнового типа.
2. Программные модули на языке C++, реализующие каждый из предложенных алгоритмов, могут быть использованы в программном обеспечении системы СКЭ рассматриваемого реактора.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритмы локализации источника аномального роста ППН в активной зоне реактора бассейнового типа;
2. Результаты тестирования каждого из алгоритмов на экспериментальных данных, полученных при внесении локальных возмущений реактивности в активную зону рассматриваемого реактора;
3. Результаты сравнения погрешностей и быстродействия каждого из предложенных алгоритмов.

Достоверность научных положений, результатов и выводов основана на применении корректных математических моделей, сравнении результатов предсказаний алгоритмов локализации с действительными координатами источников роста ППН.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертации, получены лично автором.

Внедрение результатов. Результаты исследований, полученные в диссертационной работе, были учтены при выборе количества и варианта расположения подзонных камер системы СКЭ. Количество камер и их координаты определены в техническом решении, согласованном ОАО «НИКИЭТ», НИЦ «Курчатовский институт» и эксплуатирующей организацией. Исходя из возможности локализации источника аномального роста нейтронов тремя камерами, количество и координаты ячеек, под которыми будут расположены камеры, было выбрано таким образом, чтобы каждая ячейка находилась в радиусе чувствительности как минимум трёх камер.

Программные модули, реализующие предложенные алгоритмы, используются в разработке программного обеспечения системы рассматриваемого реактора.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на конференции «8-ая Курчатовская Молодёжная Научная Школа».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 работы в научных журналах и сборниках трудов международных и российских конференций, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК. Работы в журналах ВАК опубликованы без соавторов.

Структура и объём работы. Диссертация изложена на 102 страницах, содержит 13 рисунков, 6 таблиц, состоит из введения, четырёх глав, выводов и списка цитируемой литературы из 35 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности темы, сформулирована цель и задачи исследования, показана практическая значимость полученных результатов и всей работы в целом, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации выполнен обзор существующей литературы по теме локализации ограниченным количеством детекторов различных источников излучения. Были рассмотрены методы определения координат источника излучения, используемые в геолокации; методы локализации источника нейтронов в городских условиях; теоретические и экспериментальные работы по локализации вибрирующих стержней в энергетических реакторах; исследования возможности использования датчиков градиента потока нейтронов для локализации аномалий в активной зоне реактора; подходы, используемые на реакторах типа ВВЭР для определения координат локальных всплесков реактивности; метод контроля локальных возмущений реактивности на рассматриваемом реакторе в подкритическом состоянии.

Описаны ограничения существующих подходов и сформулированы требования к разрабатываемому алгоритму локализации источников аномального роста энерговыделения в активной зоне реактора бассейнового типа с использованием подзонных ионизационных камер деления.

Проанализированы два распространённых метода локализации источника электромагнитного излучения – трилатерация [1] и мультилатерация [2]. В работах [3-7] описаны существующие теоретические и прикладные варианты исполнения данных алгоритмов. Метод аналогичный трилатерации и мультилатерации применительно к источникам нейтронного излучения рассмотрен в работе [8]. В работе предлагается метод локализации источника нейтронного излучения в городских условиях с помощью сети распределённых по городу детекторов нейтронов. Рассмотрен двухмерный случай.

Главный недостаток рассмотренных выше методов с точки зрения задачи данной работы – это исследование задачи локализации исключительно для точечных источников. В этом случае задача заметно упрощается, по сравнению со случаем распространения возмущения реактивности в активной зоне.

В работах [9-10] рассмотрена возможность локализации вибрирующих стержней в активной зоне реактора. Теоретически обоснована возможность локализации вибрирующего стержня СУЗ по измеренному сигналу плотности потока нейтронов при малых шумах. Рассмотрены две задачи – восстановление траектории вибрации стержня при известных координатах стержня и локализация вибрирующего стержня при априорно известных характеристиках возможных вибраций. В качестве исходных данных используются сигналы и координаты двух детекторов нейтронов. Решение задачи локализации возможно только при заранее известных параметрах вибрации (траектория, частота и т.д.) и только при малом уровне шума.

В работах [11-13] рассматривается численный эксперимент по локализации вибрирующего стержня, совершающего периодические колебания в активной зоне реактора типа PWR и применение рассматриваемых методик на реакторе Paks-2 в Венгрии (реактор типа ВВЭР-440) в 1985 году, когда в спектре нейтронов была обнаружена составляющая, вызванная вибрацией одного из стержней.

В работе [14] рассмотрена теоретическая возможность использования измеренного градиента ППН в точке активной зоны реактора для локализации источников аномального энерговыделения и других неоднородностей. Предложенная модель была опробована в лабораторных экспериментах, описанных в работах [15-16].

Методы, предложенные в работах [9]-[16], не подходят для задачи локализации всплеска реактивности в активной зоне рассматриваемого реактора по нескольким причинам. Рассматриваемый реактор не является энергетическим реактором, поэтому в нём не возникают вибрации поглощающих стержней, вызванные быстрым потоком теплоносителя. При наличии возможных вибраций стержня их амплитуда будет мала, нет априорной информации о траектории или частоте возможных колебаний. Во всех исследованиях [9]-[16] рассматривалась модель гомогенной активной зоны, в то время как в активной зоне рассматриваемого реактора содержатся ТВС, различные по топливному и изотопному составу. Использование методов [14]-[16] невозможно, так как в системе контроля энерговыделения используются ионизационные камеры, нечувствительные к направлению потока нейтронов, регистрирующие скалярную плотность потока.

В работе [17] рассматривается история развития системы внутриреакторного контроля реакторов типа ВВЭР, начиная с первых этапов внедрения ВВЭР. Также как и на реакторах типа ВВЭР, на рассматриваемом реакторе осуществляется контроль энерговыделения путём измерения температуры теплоносителя на выходе ТВС. Главным недостатком контроля локальных возмущений реактивности по сигналам температурных датчиков является инерционность. Время реакции составляет более 30 секунд, что не позволяет с помощью данных датчиков отслеживать быстротекущие процессы в активной зоне.

Также как и на реакторах типа ВВЭР, на рассматриваемом реакторе используются ионизационные камеры деления, однако в отличие от ВВЭР их количество значительно ограничено конструктивными особенностями реактора и они не позволяют непосредственно выявлять источник роста ППН с точностью до ТВС.

Для локализации дефектов оболочки типа «прямой контакт топлива с теплоносителем» на реакторе БН-600 с 1984 эксплуатировалась система ССКГО (секторная система контроля герметичности оболочек твэлов) [19-20]. ССКГО основана на использовании датчиков, регистрирующих количество продуктов деления в теплоносителе на выходе из активной зоны. При наличии дефекта типа «прямой контакт с теплоносителем» количество продуктов в теплоносителе, в части активной зоны, содержащей негерметичную оболочку, возрастает.

На рассматриваемом реакторе отсутствуют датчики запаздывающих нейтронов, контролирующие присутствие в теплоносителе осколков деления. Кроме того, методы [18-19] позволяют регистрировать только дефекты типа «прямой контакт топлива с теплоносителем», и не могут локализовать источник аномального роста ППН, обусловленный другими явлениями, например, «самоходом» одного из стержней СУЗ.

В работе [20] предлагается метод локализации возмущения реактивности в активной зоне рассматриваемого реактора в подкритическом состоянии. Для скачка реактивности известной величины в подкритическом состоянии реактора предлагается определить область активной зоны, в которой предположительно находится перемещаемый стержень СУЗ. Область определяется как фрагмент активной зоны между двумя подзонными камерами деления, регистрирующими аномальный рост ППН.

Применение метода [20] ограничено только состоянием реактора в заглушенном состоянии. Кроме того, метод требует калибровки для каждого

варианта загрузки активной зоны. Выбранный вид функции, описывающей зависимость сигнала камеры от расстояния, недостаточно точно отражает сигнал камеры, находящейся непосредственно под источником роста реактивности. В выбранной функции не учтена зависимость сигнала камеры от величины всплеска реактивности.

Во **второй главе** диссертации описан принцип работы каждого из исследованных алгоритмов. Всего предложено три алгоритма:

1. алгоритм, использующий геометрические преобразования;
2. алгоритм, использующий численное решение системы нелинейных уравнений;
3. алгоритм, использующий параметр Δ_j .

Описаны основные параметры активной зоны реактора, приведены характерные размеры и координаты, описывающие положение каждой ячейки в решётке активной зоны.

В предложенных алгоритмах используется полученная в ходе работы зависимость $\Psi(r)$ – функция относительного изменения сигнала подзонной камеры от расстояния до источника роста ППН, полученная из результатов испытаний на рассматриваемом реакторе в 2007-2008 годах. В ходе этих испытаний искусственно создавались локальные источники роста реактивности путём догрузки дополнительных топливных сборок в ТВС или путём извлечения поглощающих стержней СУЗ.

Функция $\Psi(r)$ имеет вид (1):

$$\Psi(r) = \begin{cases} A \cdot r^b + 1, & \text{при } 0 \leq r < 2 \\ C \cdot e^{D \cdot r}, & \text{при } r \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

В качестве единицы измерения расстояния используется шаг решётки активной зоны. График функции $\Psi(r)$ показан на *рисунке 1*.

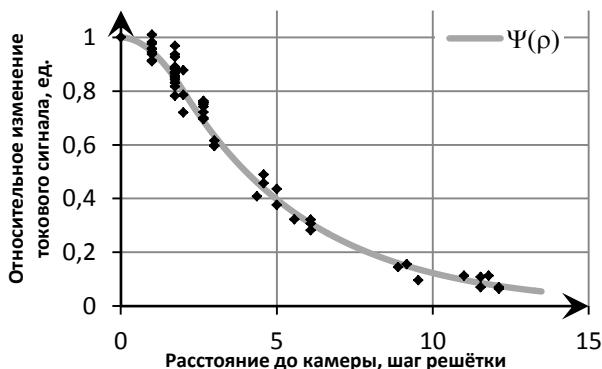


Рисунок 1. Функция относительного изменения сигнала камер от расстояния до источника роста ППН

Физический смысл функции $\Psi(r)$ – величина относительного изменения сигнала камеры, находящейся на расстоянии r от источника всплеска реактивности, по отношению к сигналу камеры, если бы она находилась непосредственно под источником ($r=0$).

Пусть в некоторой ячейке имеется источник всплеска реактивности и камера, находящаяся непосредственно под этой ячейкой, регистрирует изменение ППН на W процентов; тогда относительное изменение сигнала камеры, находящейся на расстоянии r будет равно:

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

Была проведена оценка соответствия выбранной радиально симметричной функции существующим теоретическим расчётам, описывающим вклад каждой из ТВС в сигнал подзонной камеры в зависимости от расстояния между камерой и ТВС.

Вклады в отклик подзонной камеры были рассчитаны для ТВС, находящихся на разном расстоянии от места расположения камеры. Все расчёты выполнялись для одинаковой мощности ТВС, соответствующей рождению одного нейтрона в секунду (1 н/с) во всём объёме ТВС. Согласно данным расчётам, более 95% сигнала камеры обусловлены мощностью ближайших четырёх рядов ТВС.

Расхождения теоретического сигнала ИК и сигнала, вычисленного с помощью эмпирической функции $\Psi(r)$, составило от 0 до 16%, в зависимости от взаимного расположения источника роста ППН и подзонной камеры. С учётом сложности моделирования процессов, происходящих в активной зоне рассматриваемого реактора и, соответственно, сложности предсказаний сигналов камер при различных изменениях в поле ППН, а также с учётом принципиально разного подхода к оценке сигнала камеры в существующих расчётах и в предлагаемой модели, расхождение не более 16% является приемлемым, что подтверждает достаточное соответствие существующих теоретических расчётов и выбранной упрощающей модели.

Также в одном из алгоритмов используется обратная функция $\Psi^{-1}(I)$, определяющая расстояние от камеры до источника всплеска реактивности, определяемое из отношения сигнала данной камеры к сигналу гипотетической камеры, расположенной непосредственно под ячейкой-источником роста ППН.

Алгоритм, использующий геометрические построения, работает следующим образом.

В качестве входных данных алгоритма используются координаты и величины относительных сигналов трёх подзонных камер. Используя функцию $\Psi(r)$, можно выразить относительные изменения сигналов 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 трёх детекторов, $r_{1,2,3}$ – расстояние от детекторов до источника всплеска ППН, W – теоретическое относительное изменение сигнала камеры, если бы она находилась непосредственно под ячейкой–

источником всплеска ППН. Таким образом, зная сигналы детекторов, можно выразить через расстояние от одного из детекторов r_1 расстояния от двух других детекторов до источника – r_2 и r_3 :

$$r_2 = \Psi^{-1}\left(\frac{I_2}{I_1} \cdot \Psi(r_1)\right), \quad r_3 = \Psi^{-1}\left(\frac{I_3}{I_1} \cdot \Psi(r_1)\right). \quad (4)$$

Суть алгоритма поиска источника заключается в поиске точки, расстояния от которой до детекторов удовлетворяет выражениям (4). Геометрический смысл задачи – поиск точки пересечения трёх окружностей с известными координатами центров и радиусами, связанными выражением (4). Геометрическая задача пояснена на *рисунке 2*.

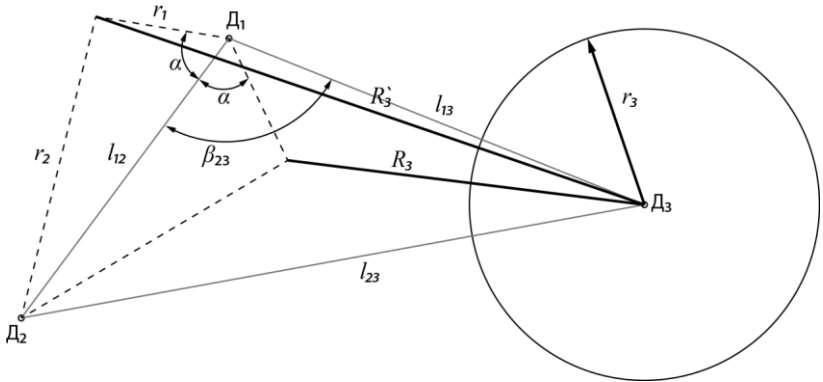


Рисунок 2 – Геометрическая задача поиска расстояния от точек пересечения двух окружностей до центра третьей окружности.

Из геометрической задачи выводятся функции $fr(r_1)$ и $fR(r_1)$, корни которых – значения радиуса первой окружности, при котором все три окружности пересекаются в одной точке.

$$fr(r_1) = r_1^2 + l_{13}^2 - 2 \cdot r_1 \cdot l_{13} \cdot \cos(\beta_{23} - \alpha) - \left[\Psi^{-1}\left(\frac{I_3}{I_1} \cdot \Psi(r_1)\right) \right]^2 \quad (5)$$

$$fR(r_1) = r_1^2 + l_{13}^2 - 2 \cdot r_1 \cdot l_{13} \cdot \cos(\beta_{23} + \alpha) - \left[\Psi^{-1}\left(\frac{I_3}{I_1} \cdot \Psi(r_1)\right) \right]^2 \quad (6)$$

В результате решения совокупности уравнений (10)-(11) получается значение расстояния от первого детектора до источника. Зная это расстояние, можно восстановить координаты предполагаемого источника.

Алгоритм, использующий решение системы нелинейных уравнений, работает следующим образом.

Как и в предыдущем алгоритме, в качестве входных данных используются координаты и величины относительных сигналов трёх подзонных камер I_1 , I_2 и I_3 , выраженные через амплитуду всплеска – W – и функцию от расстояния – $\Psi(r)$ (2).

Как и в предыдущем случае, для определённости три детектора упорядочиваются по величине относительного изменения сигнала так, что $I_1 > I_2 > I_3$.

Расстояния r_i можно выразить через известные координаты трёх детекторов – $x_{1,2,3}$ и $y_{1,2,3}$ – и неизвестные координаты источника – x и y , используя теорему Пифагора для координат в шестигранной решётке. Выражения, описывающие сигнал трёх подзонных камер деления, представляют собой систему (7) из трёх уравнений с тремя неизвестными – x , y , W :

$$\begin{cases} I_1 = W \cdot \Psi \left(\sqrt{\sin^2 60^\circ \cdot (x_1 - x)^2 + \sin^2 30^\circ \cdot (y_1 - y)^2} \right), \\ I_2 = W \cdot \Psi \left(\sqrt{\sin^2 60^\circ \cdot (x_2 - x)^2 + \sin^2 30^\circ \cdot (y_2 - y)^2} \right), \\ I_3 = W \cdot \Psi \left(\sqrt{\sin^2 60^\circ \cdot (x_3 - x)^2 + \sin^2 30^\circ \cdot (y_3 - y)^2} \right). \end{cases} \quad (7)$$

В данной работе для решения этой системы были использованы алгоритм градиентного спуска и алгоритм Левенберга-Марквардта.

В качестве начальных значений переменных x и y используются средние значения координат детекторов x_1 , x_2 , x_3 и y_1 , y_2 , y_3 , соответственно. В качестве начального значения переменной W используется максимальный из трёх сигналов – I_1 .

Алгоритм, использующий параметр Δ_j , заключается в нахождении для каждой ячейки значения параметра, характеризующего соответствие зависимости сигнала трёх камер от расстояния до источника и функции $\Psi(r)$. Для определённости упорядочим детекторы в порядке убывания относительного изменения сигнала так, что $I_1 > I_2 > I_3$.

При регистрации роста ППН тремя камерами параметр Δ_j для j -ой ячейки предлагается вычислять по формуле (8):

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^3 |I_i - W \cdot \Psi(r_{ij})|, \quad (8)$$

где r_{ij} – расстояния от рассматриваемой j -ой ячейки до i -ой камеры. Ячейкой-источником аномального роста энерговыделения считается J -ая ячейка, которой соответствует минимальный параметр Δ_j .

Также в данной работе рассматривалась возможность использовать параметр Δ_j для определения не конкретной неисправной ячейки, а «подозрительной» области, содержащей ячейки, соответствующие первым нескольким ячейкам с минимальными значениями Δ_j .

В **третьей главе** диссертации представлены результаты, полученные при тестировании разработанных алгоритмов с использованием экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний на рассматриваемом реакторе, в которых регистрировался сигнал подзонных камер экспериментального варианта системы

СКЭ при внесении в активную зону локальных возмущений по реактивности.

Алгоритм был реализован в виде программы на языке C++ для операционной системы QNX 6.5.0, которая будет использоваться в системе СКЭ рассматриваемого реактора.

Результаты предсказаний первого и второго алгоритмов полностью совпали, погрешность определения координат источника роста ППН не превысила одного шага решётки активной зоны.

При тестировании алгоритма, использующего параметр Δ_j , примерно в половине случаев минимальному параметру Δ_j соответствовала ячейка-источник, в других – ячейка соседняя с источником. Пример распределения параметра Δ_j по ячейкам показан на *рисунке 3*. В каждой рассматриваемой ячейке указаны её координаты и значение Δ_j . Три белыми кругами на каждом рисунке показано расположение трёх камер. Более тёмный цвет ячейки соответствует меньшему параметру Δ_j и, соответственно, более вероятному источнику роста реактивности. Двумя шестигранниками показаны поглощающие стержни СУЗ.

Также было проведено измерение быстродействия каждого из алгоритмов.

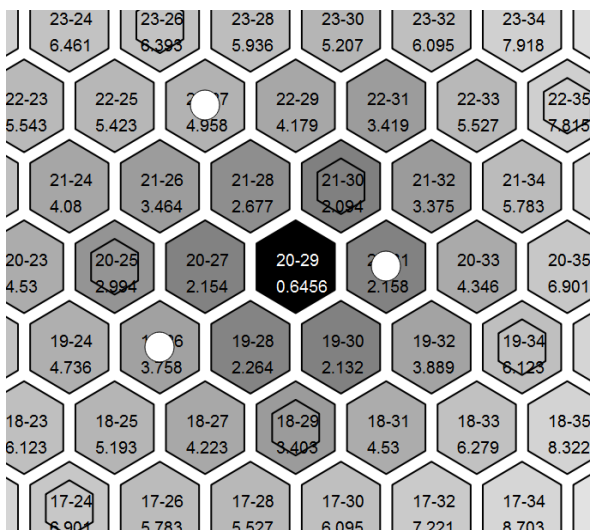


Рисунок 3 – Пример распределения параметра Δ_j в рассматриваемой прямоугольной области. Ячейка источник - 20–29.

В **четвёртой главе** диссертации приведён сравнительный анализ результатов работы разработанных методов. Приведено сравнение их погрешностей и быстродействия. Средняя, минимальная и максимальная погрешности всех трёх исследованных методов приведены в *таблице 1*.

Время исполнения каждого из алгоритмов представлено в *таблице 2*. При любой точности определения координат, наибольшим быстродействием обладает алгоритм, решающий уравнения (10)-(11), полученные путём геометрических построений.

Таблица 1. Сравнение погрешностей трёх методов

Тип алгоритм	Погрешность, шаг решётки		
	Средняя	Минимальная	Максимальная
Алгоритм, использующий геометрические преобразования	0,60	0,20	0,98
Алгоритм решения системы нелинейных уравнений	0,60	0,20	0,98
Алгоритм, использующий параметр Δ_j	0,54	0	1,73

Таблица 2. Сравнение времени выполнения различных алгоритмов локализации

Погрешность, шаг решётки		0,5	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
Время работы алгоритма, мс	Метод, использующий геометрические преобразования	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,057	0,07	0,07
	Метод решения системы по алгоритму Левенберга-Марквардта	0,20	0,40	0,88	1,27	1,65	2,035	2,41	2,90
	Метод решения системы по алгоритму градиентного спуска	0,31	0,97	3,99	7,66	11,32	15,28	18,93	22,80
	Метод, использующий параметр Δ_j	0,09	-	-	-	-	-	-	-

В **выводах** приведены все основные полученные результаты.

В **приложении 1** приведён исходный код программ, реализующих предложенные алгоритмы на языке C++ для операционной системы QNX 6.5.0, использованный в данных исследованиях.

В **приложении 2** приведён исходный код программы, используемой для оценки соответствия предлагаемой модели существующим расчётам вкладов отдельных ТВС в сигнал подзонной ионизационной камеры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главным результатом диссертационной работы является решение задачи локализации источника аномального роста энерговыделения в активной зоне реактора бассейнового типа по сигналу трёх подзонных камер деления.

В работе получены следующие основные результаты:

1. Алгоритм, использующий решение уравнений (5)-(6), и алгоритм, использующий решение системы нелинейных уравнений (7), позволяют определить координаты источника роста энерговыделения с погрешностью не больше одного шага решётки активной зоны. Алгоритм, использующий решение уравнений (5)-(6), наиболее быстродействующий из всех рассмотренных. Алгоритм, решающий систему (7), позволяет использовать сигналы более чем трёх подзонных камер для уточнения координат источника.

2. Алгоритм, использующий параметр Δ_j , позволяет однозначно определить поглощающий стержень СУЗ, ближайший к источнику локального роста энерговыделения. Данный алгоритм также можно использовать для получения наглядной картины распределения повышенного энерговыделения в области, содержащей источник локального роста ППН (см. *рисунки 3*).

3. Программные модули, протестированные в ходе данной работы, могут быть использованы в программе промышленного контроллера системы СКЭ, осуществляющего сбор и обработку сигналов подзонных камер деления.

В будущем для совершенствования работы предложенных алгоритмов возможно проведение дополнительных испытаний на рассматриваемом реакторе после его запуска с целью уточнения вида функции $\Psi(r)$. Также возможно проведение дополнительных испытаний для изучения и дальнейшего использования в алгоритмах искажения поля энерговыделения, обусловленного находящимися поблизости полностью или частично погруженными стержнями СУЗ, вносящими искажения в распределение, описываемое функцией $\Psi(r)$.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК

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. № 6, 2013 (www.science-education/113-10838)

2. Гринько С.О. Определение координат источника роста плотности потока нейтронов в ядерном реакторе по сигналу подзонных детекторов путём решения системы нелинейных уравнений. Вестник Российского университета дружбы народов № 4, 2013, сс. 29–36

3. Гринько С.О. Определение координат источника аномального роста плотности потока нейтронов в ядерном реакторе с использованием специального

параметра. Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» том 3, № 3, 2014, сс. 372–377.

Доклады на конференциях

1. Крюков С.И., Гринько С.О. Контроль энерговыделения и локализация участков резкого роста плотности потока тепловых нейтронов по активной зоне реактора «Руслан». 8-ая Курчатовская Молодёжная Школа. Сборник докладов, Москва, 2010, сс.27-30.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) *Fang W.H.* Trilateration and extension to Global Positioning System Navigation. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 9, 6, 1986, сс.715-717
- 2) *Grokinski H.L.* Position estimation using only multiple simultaneous range measurements. *IRE Transactions on Aeronautical and Navigational Electronics*, ANE-6, 1959, сс. 178-187
- 3) *Manolakis D.E.* Efficient solution and Performance Analysis of 3-D Position Estimation by Trilateration, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol.32, No.4, 1996, сс. 1239-1248
- 4) *Cox J., Partensky M.B.* Spatial Localization Problem and the Circle of Apollonius, *ArXiv Physics e-prints*, January 2007
- 5) *Ho K.C., Chan Y.T.* Solution and performance Analysis of Geolocation by TDOA, *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, vol.29, no.4, 1993 .p1311-1322
- 6) *Xiaochan Xu, Nageswara S. V. Rao, Sartaj Sahni.* A Computational Geometry Method for DTOA Triangulation, *Proceedings of the 10th International Conference on Information Fusion (FUSION)*, 2007
- 7) *Nageswara S. V. Rao, Mallikarjun Shankar, Yong Yang.* Localization Under Random Measurements with Application to Radiation Sources, *Proceedings of the 11th International Conference on Information Fusion (FUSION)*, June 2008
- 8) *Jren-Chit Chin.* Efficient and Robust Solutions for Sensor Network Detection and Localization, *Center for Education and Research Information Assurance and Security, Purdue University, West Lafayette, CERIAS Tech Report 2010-22*, 2010
- 9) *Pázsit I.* Investigation of the space-dependent noise induced by a vibrating absorber. *Atomkernenergie (ATKE)*, том 30, с29-35. 1977
- 10) *Pázsit I., Analytis G. Th.* Theoretical investigation of the neutron noise diagnostics of two-dimensional control rod vibrations in a PWR. *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 7. , 1980, pp. 171-183.
- 11) *Pázsit I., Glöckler O.* On The Neutron Noise Diagnostics of Pressurized Water Reactor Control Rod Vibrations. I. Periodic Vibrations. *Nuclear Science and Engineering*. том 85, с 167-177 , 1983

- 12) *Pázsit I., Glöckler O.* On The Neutron Noise Diagnostics of Pressurized Water Reactor Control Rod Vibrations II. Stochastic Vibrations. Nuclear Science and Engineering. том 88, с 77-87, 1984
- 13) *Pázsit I., Glöckler O.* On The Neutron Noise Diagnostics of Pressurized Water Reactor Control Rod Vibrations III. Application at a Power Plant. Nuclear Science and Engineering. том 99, с 313-328, 1988
- 14) *Pázsit I.* On the possible use of the neutron current in core monitoring and noise diagnostics. Annals of Nuclear Energy, том 24, выпуск 15, стр.1257-1270, 1997
- 15) *Lindén P., Karlsson J.K.-H., Dahl B., Pázsit I., Por G.* Localisation of a neutron source using measurements and calculation of the neutron flux and its gradient. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, том 438 выпуск 2-3, стр.345-355, 1999
- 16) *Avdic S., Lindén P., Pázsit I.* Measurement of the neutron current and its use for the localisation of a neutron source Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, том 457, выпуск 3, стр.607-616, 2001
- 17) *Митин В.И., Семченков Ю.М., Калинушкин А.Е.* Развитие системы внутриреакторного контроля ВВЭР – Москва, Атомная энергия, том 106, № 5, 2009 – с.278 – 285.
- 18) *Бабушкин А.А., Лисицын Е.С., Жилкин А.С. и др.* Система КГО и СОДС реактора БН-600. Доклад на конференции «Системы и средства радиационного контроля на АЭС». – Нововоронежская АЭС, 1984
- 19) *Жилкин А.С., Осипов С.Л., Сергеев В.А., Лисицын Е.С. и др.* Авторское свидетельство № 1669311, 1991.
- 20) *Гусев В.В., Крюков С.И., Самонин В.Ю.* Контроль локальных возмущений подкритичности на перегрузках в активной зоне заглушенного реактора «Р» с помощью системы контроля подкритичности. – Российский научный центр «Курчатовский институт» (Москва): Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика ядерных реакторов, № 1, 2005 – с. 69 – 76.