

УДК 621.039.56

## Совершенствование систем внутриреакторного контроля реакторов типа ВВЭР на основе оптических систем

С.А. Качур

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur\_62@mail.ru

Статья поступила 10.06.2021 г.; после доработки 15.06.2021 г.

### Аннотация

Дан анализ работ, выполненных в Севастопольском национальном университете ядерной энергии и промышленности, с использованием оптических систем для исследования парогенерирующих каналов с целью совершенствования систем внутриреакторного контроля реакторов типа ВВЭР

**Ключевые слова:** космический аппарат, реакторная установка, сети Петри, модель, циклограмма.

## Improvement of in-reactor control systems for VVER-type reactors based on optical systems

S.A. Kachur

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur\_62@mail.ru

Received 10.06.2021 y.; received in final form 15.06.2021 y.

### Abstract

The analysis of the works carried out at the Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry using optical systems for the study of steam generating channels in order to improve the systems of in-reactor control of VVER-type reactors is given.

**Keywords:** in-reactor control system, thermohydraulic process, optical system, information and measurement system.

### Введение

Развитие АЭС идет по пути роста единичной мощности РУ, что позволяет снизить удельный вес затрат на капитальное строительство и эксплуатацию АЭС. Увеличение мощности реактора приводит к увеличению размеров и возрастанию энергонапряженности его активной зоны. Рост удельной мощности приводит к сокращению проектных запасов до предельных состояний топлива и конструкционных материалов. При увеличении размеров активной зоны ухудшается стабильность пространственного распределения нейтронного поля в активной зоне [1].

В этих условиях для обеспечения безопасной эксплуатации реакторной установки необходимо наличие точной и оперативной информации

о распределении полей энерговыделения, температуры и других теплотехнических и ядерно-физических параметров внутри активной зоны. Эту задачу выполняют системы внутриреакторного контроля (СВРК), в состав которых, в общем случае, входят датчики, линии связи, электронная измерительная аппаратура, а также ЭВМ, алгоритмы и программы обработки полученной информации. На основании полученной от датчиков первичной информации рассчитываются и выводятся к оператору энергоблока обобщенные параметры, характеризующие режим работы активной зоны; их также можно использовать для автоматизации управления работой реактора в качестве сигналов защиты при возникновении аномальных ситуаций. В последнем случае резко

возрастают требования к достоверности вырабатываемой информации и надежности работы СВРК в целом, так как она становится частью системы управления и защиты реакторной установки [2, 3].

В настоящее время рассматриваются различные варианты построения измерительно-информационных систем (ИИС) для определения профиля тепловыделения [4-7], которые позволят расширить возможности современных СВРК, а также использование нейронных сетей для повышения быстродействия СВРК [8]. В качестве основы для дальнейших исследований рассматривается оптическая ИИС, представленная в работах [5, 6].

Цель статьи – анализ работ, проведенных в Севастопольском национальном университете ядерной энергии и промышленности, с использованием оптических систем для исследования парогенерирующих каналов для совершенствования систем внутриреакторного контроля реакторов типа ВВЭР.

### **Экспериментальная установка и автоматизированная система сбора и обработки информации для моделирования аварийных теплогидравлических процессов**

В Севастопольском национальном университете ядерной энергии и промышленности была разработана и построена экспериментальная установка для моделирования стационарных и нестационарных теплогидравлических процессов и вероятных аварийных режимов в кольцевой тепловыделяющей сборке водо-водяного энергетического ядерного реактора [9].

Тяжелая авария водо-водяного энергетического реактора, вызванная разгерметизацией первого контура даже при своевременном сбросе аварийной защиты приводит к выбегу температуры ТВС, что может привести к плавлению оболочки ТВЭЛ или даже ее воспламенению при отсутствии достаточного охлаждения.

Проблема исследования теплофизических процессов при аварийных режимах в каналах активной зоны ВВЭР сводится к решению двух задач теплообмена: внутренней и внешней. Под внутренней задачей понимается оценка температурного поля ТВЭЛ, а решение внешней задачи сводится к определению структуры потока теплоносителя, охлаждающего ТВЭЛ. К числу изучаемых относятся вопросы, связанные с определением границ начала интенсивного поверхностного кипения и начала объемного кипения, иден-

тификации кризиса кипения и исследования кинематических характеристик паровых пузырей при поверхностном и объемном кипении.

Для разработки математических моделей состояния ТВС необходимы результаты экспериментальных исследований быстрых теплогидравлических процессов в ТВС при аварийных режимах, вызванных различными внешними и внутренними возмущениями (разгерметизация контура, высвобождение мощности, остановка циркуляционных насосов и др.) Обеспечение задач как физического, так и математического моделирования аварийных режимов в ТВС ВВЭР настоятельно требует создания специализированных экспериментальных теплофизических установок.

Приведем краткое описание экспериментальной установки.

Основой экспериментальной установки является циркуляционный контур высотой около 4 метров (рис. 1). Принятые на рис 5.5 обозначения: 1 — экспериментальный участок; 2 — подъемный участок; 3 — компенсатор давления; 4 — опускной канал; 5 — циркуляционный насос; 6, 10, 12, 13, 16, 19, 21 — клапаны; 7 — дроссельная шайба; 8 — подогреватель; 9 — расходомер; 11 — охладитель; 14 — воздуходувка; 15 — баллон с азотом высокого давления; 17 — ресивер; 18 — распылитель воды; 20 — змеевик; 22, 23 — ФЭУ; 24 — источник света; 25 — линза; САФЭ — система автоматизации физического эксперимента.

В нижней части циркуляционного контура установки смонтирован экспериментальный участок 1, имеющий вид массивного кольцевого канала с центральным тепловыделяющим элементом. Кольцевой канал переходит в подъемный (тяговый) участок 2, на котором пароводяная смесь является подъемной силой при режимах с естественной циркуляцией. Верхняя часть тягового участка имеет компенсатор давления 3 и переливное устройство для отвода воды в опускной канал 4. В опускном канале поток воды проходит через теплообменник, охлаждаемый встречным потоком обычного или увлажненного воздуха. Охлаждение опускного потока воды воздухом способствует получению плавных динамических характеристик циркуляционного контура установки. После опускного канала поток воды попадает в циркуляционный насос 5. При естественной циркуляции поток теплоносителя имеет возможность проходить в обход циркуляционного насоса. Измерение расхода осуществляется с помощью датчиков расхода двух типов (трубка ВТИ или прецизионный датчик турбинного типа).

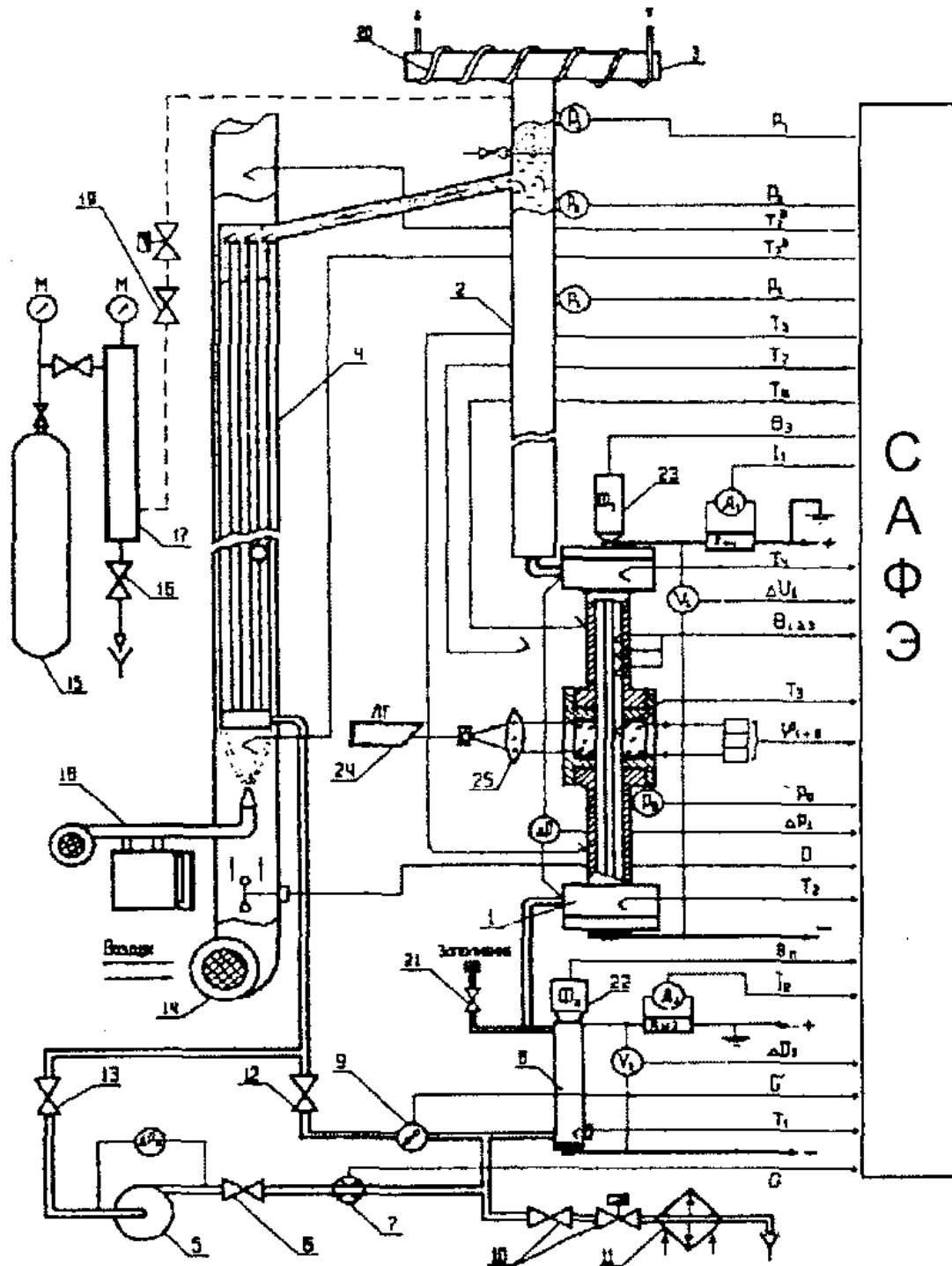


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Главной особенностью кольцевого канала ТВС является наличие прозрачного участка, уплотненного в корпусе толстыми оптическими стеклами, рассчитанными на давление до 15,0 МПа.

Луч света от источника, проходящий через прозрачный участок кольцевого канала, попадает на приемное устройство (детектор) и далее через

аналого-цифровой преобразователь в ЭВМ. Данная оптикоэлектронная система, называемая системой технического зрения, предназначена для измерения истинного паросодержания в пароводяном потоке. С помощью этой системы возможно изучение и измерение внутренних характеристик процессов кипения (показатели паросодержания и скопления паровых пузырьков);

изучение процессов конденсации паровых пузырьков в недогретой жидкости.

Методика измерения температуры тепловыделяющего элемента, как было сказано ранее, отличается от традиционно используемых методов и основана на измерении теплового излучения от внутренней полости ТВЭЛ. Для этого в верхней торцевой части экспериментального участка 1 установлен датчик измерения теплового излучения от горячего пятна внутренней полости ТВЭЛ.

Сигнал датчика детектируется фотоэлектронным умножителем, усиливается и затем через АЦП поступает в ЭВМ. При достижении предельной температуры ТВЭЛ ( $650^{\circ}\text{C}$ ) срабатывает аварийная защита, отключающая электрическую цепь генератора тока нагревателя.

Применение безынерционных оптических каналов измерения температуры ТВЭЛ и паросодержания теплоносителя позволяет с достаточной скоростью измерять и фиксировать опытные данные о процессах теплообмена в ТВС. Подобная измерительная информация может быть использована для определения вектора состояния безопасности ТВС.

В экспериментальной установке применяются оптический датчик температуры, детектирующий тепловое излучение от внутренней полости

тепловыделяющего элемента и оптический метод измерения паросодержания потока теплоносителя. Указанные методы измерений позволяют в реальном масштабе времени регистрировать чрезвычайно важные экспериментальные данные о быстрых переходных процессах в кольцевом канале тепловыделяющей сборки при кризисном и закризисном режимах.

### Оптическая измерительно-информационная система для измерения истинных характеристик двухфазного потока

В работе [6] предложен состав и принцип действия ИИС измерения истинных характеристик двухфазного потока на основе принципа технического зрения. Функциональная схема ИИС представлена на рис.2. Принятые на рисунке обозначения: 1 — источника света; 2 — оптический рассеиватель; 3 — экспериментальный канал; 4 — боковые стенки экспериментального канала, уплотненные плоскими толстостенными стеклами; 5 — объектив видеокамеры; 6 — чувствительный элемент видеокамеры; 7 — программно-аппаратный комплекс системы технического зрения; 8 — видеопроцессор; 9 — ПЭВМ; 10 — накопитель; 11 — видеоконтрольное устройство.

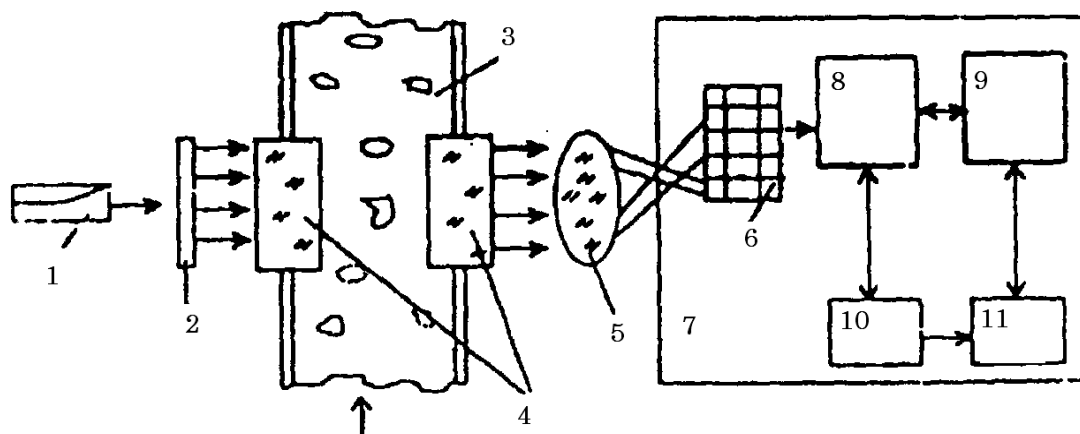


Рис. 2. Принципиальная схема измерительной системы для истинных измерений характеристик двухфазного потока

Световой поток от источника (1), пройдя через оптический рассеиватель (2) и экспериментальный канал (3), боковые стенки которого уплотнены плоскими толстостенными стеклами (4), попадает в объектив (5) видеокамеры (6). В программно-аппаратном комплексе системы технического зрения (СТЗ) (7) формируется ти-

повая картина исследуемого двухфазного потока. Аппаратные средства (7) обеспечивают фиксацию, хранение фрагментов изображения, а также выполняют вычисление истинных характеристик. Чувствительный элемент видеокамеры (6) выполнен на основе ПЗС матрицы, которая позволяет обеспечивать фиксирование без силь-

ных искажений объектов, движущихся со значительными угловыми скоростями в поле кадра. Это достигается сравнительно малым временем фиксации изображения на матрице (до  $10^{-5}$  с) при формировании на выходе камеры стандартного телевизионного видеосигнала с частотой полукадров 50 Гц (100 Гц). Видеопроцессор (8) управляет контроллером ввода изображений (КВИЗ), встроенным ПЗУ и осуществляет предварительную обработку (сжатие), фиксацию и хранение прямоугольных фрагментов нескольких кадров монохроматического изображения. Видеопроцессор осуществляет управление ПЭВМ (9) в моменты пересылки информации, имеющей доступ к элементам изображения для их последующей окончательной обработки. В зависимости от быстродействия ПЭВМ и сложности заданной обработки информации время формирования, расчета и выдачи всех характеристик исследуемого объекта изменяется, и может превысить время 0,02 с.

Для контроля за работоспособностью системы и визуализации протекания процессов в объекте применяется видеоконтрольное устройство (ВКУ) (11). В процессе экспериментального исследования поступающая с телекамеры аналоговая видеоинформация непрерывно записывается в реальном масштабе времени в накопитель (10). Сохраняемая в накопителе видеоинформация в дальнейшем может быть воспроизведена в любой момент времени и проанализирована.

Анализ изображений двухфазного потока, получаемых как результат исследования теплогидравлических процессов в зафиксированных ИИС кадрах, позволяет сделать следующие выводы:

- в кадрах при парогазосодержаниях (до 50%) возможно выделить отдельные пузыри при глубине резко изображаемого пространства 5-10 мм;

- в зависимости от разрешающей характеристики оптического канала и измерительного тракта ИИС, возможно фиксировать изображение пузырей с линейным размером до 0,05 мм;

- следует учитывать, что газовые пузырьки в воде имеют, как правило, правильные геометрические формы, близкие к сфере или эллипсоиду, в то же время границы паровых пузырьков при низких давлениях приобретают сложные, непредсказуемые очертания;

- с увеличением объемного паросодержания в воде толщина просвечивания двухфазной жидкости должна уменьшаться и при паросодержании близкому к 0,5, технологический процесс регистрации отдельных пузырьков и их групп

становится неэффективен;

- основным недостатком применяемого оптического метода является то, что исследуемые изображения повреждаются шумами и помехами различного происхождения, например шумами видеодатчика, ошибками в каналах передачи информации и др.

Распространенный подход минимизации влияния шумов основан на использовании эвристических методов пространственной обработки, среди которых используются алгоритмы, осуществляющие сверку изображений в окне со специально подобранной сглаживающей матрицей — маской.

Однако алгоритмы фильтрации и сглаживания, устраняя высокочастотных, одновременно приводят к потере мелких деталей изображения и к размыванию границ объекта, что напоминает эффект расфокусировки. Поэтому основным этапом обработки изображений является выделение границ объектов по перепаду функции яркости. Этот этап называется бинаризацией.

Экспериментальная установка для применения оптической ИИС представляла собой барботажный участок с вводом воздуха в нижнюю его часть [10]. Через плоские прозрачные стенки из оптического стекла, отделяющих гидравлическую полость, осуществлялись измерения истинных характеристик адиабатного двухфазного потока в пузырьковом режиме: истинного паросодержания и групповой скорости всплывания.

Одна из сторон описываемой ИИС является то, что с ее помощью не только можно судить о структуре двухфазного потока, но и имеется возможность определения истинного паросодержания двумя способами: способом технического зрения и способом расчета корреляционных функций.

Первый способ основан на вычислении доли сечений, занятых паром, к доли сечений общего поля зрения. Вторым способом заключается в вычислении корреляционных функций последовательности кадров и вычислении истинной скорости пара.

### **Метод идентификации внутриреакторных аномалий на основе показаний оптической измерительно-информационной системы и сетей Петри**

Одним из фундаментальных принципов повышения надежности является принцип разнообразия, определяющий применение в разных системах (либо в пределах одной системы в раз-

ных каналах) различных средств и/или аналогичных средств, основанных на различных принципах действия для осуществления заданной функции.

При использовании этого принципа стремятся обеспечить повышение уровня безопасности, исключив методические или типовые недостатки, свойственные оборудованию и таким образом, расширив возможности предотвращения нарушений [4, 7].

Руководствуясь принципом разнообразия, необходимостью совершенствования СВРК с целью получения более полной информации о состоянии реактора, используя существующие эмпирические модели, формулы расчета параметров и статистические данные экспериментов о процессе теплообмена, предлагается метод идентификации внутриреакторных аномалий на основе показаний измерительно-информационной оптической системы [11].

Пусть имеется апостериорная информация, получаемая в дискретные моменты времени от измерительно-информационной системы (ИИС) на основе волоконно-оптических датчиков [6] либо от оптической ИИС. Задача идентификации состояния активной зоны реактора с помощью ИИС включает две взаимосвязанные подзадачи.

1) Идентификация структуры  $S$ , т.е. расположения точек поверхностного и/или объемного кипения в каналах, в результате итеративного поиска наиболее «горячих» точек (НГТ) — максимумов пространственного распределения объемного паросодержания  $\alpha$ . Решение получают на основе использования расширения сетей Петри, предложенного в части 1.

2) Идентификация вектора параметров  $x_{\text{вх}}$  объекта, т.е. определение объемного парообразование  $\alpha$  в определенных структурой  $S$  точках с указанием стадии процесса кипения для каждой точки (I — отсутствие кипения, II — поверхностное кипение, III — объемное кипение, IV — критический процесс кипения). Решение получают в классе моделей с дискретным временем как преобразование

$$[x_{\text{вх}}, S[k]] = \Phi(S[k-1], x_{\text{вых}}[k], M, a, C, k)$$

где  $\Phi$  — преобразование на основе метода наиболее «горячих» точек (МНГТ) и расширения стохастической СП;  $S$  — структура схемы измерения по площади активной зоны реактора;  $x_{\text{вх}}$  — вектор входных параметров процесса;  $x_{\text{вых}}$  — вектор выходных параметров, полученный в результате измерений профиля парообразования в ячейках;  $M$  — статистическая модель состояния

в локальной точке;  $a$  — параметры статистической модели;  $C$  — сеть Петри;  $k$  — номер дискретного момента времени.

Процесс идентификации состояния реактора определяется двумя составляющими: 1) математической структурой модели (априорная информация); 2) измерительной информацией (апостериорная информация). Априорная информация определяет вид математического описания объекта с точностью до коэффициентов (параметров), а апостериорная позволяет численно выразить параметры или коэффициенты математического описания при заданной структуре.

Предлагаемая модель ситуации описывает состояние случайного процесса поверхностного и/или объемного кипения вблизи оболочек твэлов в локальной области канала под воздействием совокупности внешних возмущений случайного характера.

Поскольку местоположение точек кипения априорно не задано, схема эксперимента (измерений) представляется с помощью систем линейных алгебраических уравнений и таблиц покрытий, в которых переменными являются соответственно параметр  $\alpha$  объемное паросодержание и параметр  $d$  диаметр пузыря пароводяной смеси в рассматриваемых точках. В условиях большой априорной неопределенности состояние каналов активной зоны описывается нормальным распределением таких параметров как  $\alpha$  и  $d$ . На основе статистической информации, полученной в результате проведения измерений, рассчитываются значения параметров распределений: оценки математического ожидания и дисперсии.

Структура метода наиболее «горячих» точек (МНГТ) во многом определяется возможностями измерительно-информационной системы (ИИС). ИИС включает аппаратный комплекс (совокупность датчиков и вычислительную технику) и программный комплекс (программно реализованное устройство управления датчиками и программный комплекс обработки результатов измерений). Пусть используется измерительная система на основе волоконно-оптических датчиков (ВОП-датчиков) с сопряженными с ними источниками света.

Предположим, что число используемых в методе датчиков  $k$  и соответственно  $k$  источников света объединено в кольцевую волоконно-оптическую структуру, расположенную по периметру верхней шахты реактора, т.е. каждому датчику или источнику света соответствует определенный сектор этой кольцевой структуры. Разобьем активную зону реактора на  $l$  областей, каждая из которых включает  $p$  зон, состоящих из  $n$

межзонных ячеек, охватывающих  $m$  каналов. Точность метода определяется размером ячейки. Направления измерения датчиков фиксируются под таким углом, чтобы на первом этапе можно было определить объемное паросодержание для всех центров областей, на втором — для центров выбранных зон, на третьем — для центров выбранных межзонных ячеек, на четвертом — два ортогональных профиля тепловыделения ячейки, позволяющих определить объемное парообразование каналов. Причем, для определения информации в конкретных точках (центры ячеек) необходимо выполнение трех условий: а) местоположение центров областей, зон совпадает с ячейками; б) не менее двух линий направления наблюдения пересекается в точке; в) не существует других точек пересечения, кроме указанных.

Измерения производятся в дискретные моменты времени. Устройство управления вырабатывает вектор управляющих сигналов активизации датчиков (подключения источников света), определяя схему измерения в текущий момент времени. Результатом компьютерной обработки информация по  $l$ -у активизированному датчику (направлению наблюдения) измерительной системы в текущий момент времени является:

Использование адаптивной системы управления оптической ИИС на основе МНГТ и моделей СП позволяет примерно в  $10\div 20$  раз повысить быстродействие СВРК при диагностике внутриреакторных аномалий, связанных с нарушением теплообмена.

## Заключение

Проведен анализ научной деятельности И.А. Попова и его учеников в создании экспериментальной установки, разработке оптической системы, методов и моделей обработки информации о состоянии парогенерирующего канала. Выполненные работы позволили моделировать стационарные и нестационарные теплогидравлические процессы и вероятные аварийные режимы в кольцевой тепловыделяющей сборке водо-водяного энергетического ядерного реактора

## Список литературы

1. Мякишев Д.В. и др. Повышение достоверности результатов измерений в информационном пространстве энергоблоков АЭС // Датчики и системы. – 2003. – №7. – С. 29.
2. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынов Г.Б. Методы оценки и обеспечения безопасности

- ЯЭУ – М.: Энергоиздат, 1988. – 136с.
3. Брагин В.А., Батенин И.В., Голованов М.Н. и др. Системы внутри реакторного контроля АЭС с реакторами ВВЭР – М.: Энергоиздат, 1987. – 128с.
4. Волков С.Д., Кебадзе Б.В., Куликов Б.И., Болтенко Э.А. Применение волоконно-оптических датчиков для определения параметров двухфазного потока // Методы и средства измерения тепло физических параметров. Сб. науч. трудов ФЭИ – Обнинск, 1996. – С.220-223.
5. Попов И.А., Ловягин В.А., Сайда Д.М., Матузаев К.Б. Оптическая измерительная система технического зрения для измерения истинных характеристик двухфазного потока // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.5. двухфазные течения. дисперсные потоки и пористые среды – М.: Издательство МЭИ. – 1998. – С.79-81.
6. Попов И.А., Ловягин В.А., Сайда Д.М., Матузаев К.Б. Паросодержание двухфазного адиабатического потока по результатам измерений оптической измерительной системой технического зрения // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.5. двухфазные течения. дисперсные потоки и пористые среды – М.: Издательство МЭИ. – 1998. – С.82-84.
7. Свириденко И.П., Горячев В.В., Покровский Ю.Н. Датчики для измерения профиля тепловыделения // Методы и средства измерения тепло физических параметров. Сб. науч. трудов ФЭИ – Обнинск, 1996. – С.89-97.
8. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928с.
9. Попов И.А., Домашев Е.Д., Сычев Е.Н., Журавлев А.А. Экспериментальная установка и автоматизированная система сбора и обработки информации для моделирования аварийных теплогидравлических процессов // Пром. теплотехника. – 2007. – Т.29, №2. – С.62-68.
10. Нигматулин Б.И., Мелихов О.И., Соловьев С.Л. Состояние и развитие отечественных системных теплогидравлических кодов для моделирования аварийных и нестационарных процессов на АЭС // Теплоэнергетика. – 2001. – №3. – С.17-20.
11. Попов И.А., Качур С.А. Метод идентификации паросодержания в камере смешения ядерного реактора ВВЭР // Сб.наук.тр.СНУЯЭиП – Вып.2(30). – Севастополь: СНУЯЭиП, 2009. – С.36-43.

## References

1. Myakishev D.V. Improving the reliability of measurement results in the information space of NPP power units. *Datchiki i sistemy*. 2003, No. 7, pp. 29.
2. Bahmetev A.M., Samoylov O.B., Usinov A.M. *Metodi ochenki i obespecheniya bezopasnosti YaEU* [Methods of assessment and providing of the

- NPE safety ]. Moscow, Energoizdat, 1988, 136p.
3. Bragin V.A., Batenin I.V., Golovanov M.N. *Sistemy vnutrireaktornogo kontrolya AES s reaktorami tipa VVER* [Systems into the reactor control of APP with the PWR reactors]. Moscow, Energoizdat, 1987, 128p.
  4. Volkov S.D., Kebabze B.V., Kulikov B.I., Boltenko E.A. The use of fiber-optic sensors to determine the parameters of the two-phase flow. *Metody i sredstva izmereniya teplofizicheskikh parametrov. Sb. Nauch. trudov FEI, Obninsk*, 1996, pp. 220-223.
  5. Popov I.A., Lovyagin V.A., Sajda D.M., Matuzaev K.B. Optical measurement system of technical vision for measuring the true characteristics of a two-phase flow. Proceedings of the Second Russian National Conference on Heat Exchange, Moscow, *Izdatel'stvo MEI*, 1998, V.5, pp.79-81.
  6. Popov I.A., Lovyagin V.A., Sajda D.M., Matuzaev K.B. The vapor content of a two-phase adiabatic flow according to the results of measurements by an optical measuring system of technical vision. Proceedings of the Second Russian National Conference on Heat Exchange, Moscow, *Izdatel'stvo MEI*, 1998, V.5, pp. 82-84.
  7. Sviridenko I.P., Goryachev V.V., Pokrovskij Ya.N. Sensors for measuring the heat dissipation profile. *Metody i sredstva izmereniya teplofizicheskikh parametrov. Sb. Nauch. trudov FEI, Obninsk*, 1996, pp. 89-97.
  8. Ostrejkovskij V.A. *Ekspluatatsiya atomnyh stancij* [Exploitation of the atomic stations] Moscow, Energoatomizdat, 1999, 928 p.
  9. Popov I.A., Domashev E.D., Sychev E.N., Zhuravlev A.A. Experimental setup and automated system of data collection and processing for simulation of emergency thermal-hydraulic processes. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2007, Vol. 29, No 2, pp. 62-68.
  10. Nigmatulin B.I., Melihov O.I., Solov'yov S.L. The state and development of domestic system thermo-hydraulic codes for modeling emergency and non-stationary processes at nuclear power plants. *Teploenergetika*, 2001, No. 3, pp. 17-20.
  11. Popov I.A., Kachur S.A. A method for identifying the vapor content in the mixing chamber of a VVER nuclear reactor. *Sevastopol: Sb.nauch.tr. SNUYaEiP*, 2009, No 2(30), pp. 36-43.