

На правах рукописи

Морева Светлана Леонидовна

**СИНТЕЗ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПОЛЯМИ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ
АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ**

Специальность: 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург на кафедре системного анализа и управления

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Першин Иван Митрофанович, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург, профессор кафедры системного анализа и управления

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Колесников Анатолий Аркадьевич, Южный федеральный университет, заведующий кафедрой синергетики и процессов управления

доктор технических наук, профессор Душин Сергей Евгеньевич, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», профессор кафедры автоматики и процессов управления

Ведущая организация: Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО), г. Санкт – Петербург

Защита диссертации состоится «23» декабря 2013 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.07 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)» по адресу 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)».

Автореферат разослан «22 » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.07
к.т.н., доцент

Цехановский Владислав
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Теоретические и прикладные исследования системных связей и закономерностей функционирования систем с распределенными параметрами позволяют проектировать эффективные системы управления сложными технологическими процессами. В этом направлении широко известны работы Э.Я. Рапопорта, А.Г. Бутковского, А.И. Егорова, Т.К. Сиразетдинова, Г.Л. Дегтярева, В.А. Коваля, Л.М. Пустыльниковца, А.А. Воронова, И.М. Першина. В рассматриваемых работах исследованы общие свойства систем с распределенными параметрами и предложены методы анализа и синтеза систем управления. Вместе с тем, специфика каждого конкретного распределенного объекта требует адаптации известных результатов к решению задач анализа и синтеза. Сказанное в полной мере относится к описанию процессов в реакторных зонах АЭС, связывающих скорости течения теплоносителя, состояние температурного поля, теплотворную способность топлива. Математические модели таких объектов описываются дифференциальными уравнениями в частных производных и связывают различные физические процессы.

Большое распространение в атомной энергетике получили гетерогенные каналные реакторы с графитовым замедлителем и водяным кипящим теплоносителем. Энергия теплоносителя преобразуется в электрическую энергию, которая поступает потребителям. Оптимальные режимы работы турбогенераторов предполагают, что поступающий перегретый пар имеет заданную температуру. Температура пара зависит от температурного поля внутри реактора и скорости течения теплоносителя по каналам реактора. Несмотря на достигнутые теоретические и практические результаты в области управления объектами с распределенными параметрами, до настоящего времени на некоторых энергоблоках АЭС скорость течения теплоносителя регулируется вручную. Автоматизация управления процессом стабилизации температуры пара на уровне, соответствующем оптимальному режиму работы генераторов, является **актуальной** задачей.

Цели работы и основные задачи исследования. Целью работы является разработка математических моделей тепловых процессов в активной зоне реакторов и методика синтеза системы управления температурными полями теплоносителя в технологических каналах активной зоны атомного реактора канального типа.

В соответствии с указанной целью в работе сформулированы и решены следующие основные задачи:

- разработана математическая модель процессов в активной зоне атомных реакторов канального типа и описаны соответствующие граничные условия;
- построена дискретная модель процессов в активной зоне атомных реакторов;
- разработана методика синтеза систем управления температурными полями в технологических каналах активной зоны атомных реакторов;

- разработан вычислительный алгоритм и пакет прикладных программ для анализа и синтеза системы управления температурными полями в активной зоне атомного реактора;

- произведен синтез системы управления температурными полями активной зоны атомного реактора канального типа (РБМК-1000).

Объектом исследования диссертационной работы является разработка систем управления температурными полями в активной зоне атомных реакторов, обеспечивающими нормальное функционирование и безопасность эксплуатации энергоблоков.

Предметом научных исследований являются математическое описание процессов теплообмена в активной зоне атомных реакторов канального типа и методы синтеза систем управления температурными полями.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались: теория дифференциальных уравнений, теория систем автоматического управления, теория систем с распределенными параметрами, методы математического моделирования динамических систем, методы синтеза систем с распределенными параметрами.

Обоснованность научных положений и достоверность результатов исследований подтверждается корректным использованием апробированных методов исследования; сравнением результатов анализа и моделирования с данными экспериментов на объекте РБМК-1000 Ленинградской АЭС; апробацией полученных материалов диссертационной работы в виде докладов на научно - технических конференциях и публикациями в периодической печати.

Получены и выносятся на защиту следующие научные результаты:

- пространственная нестационарная математическая модель тепловых процессов в активной зоне канальных реакторов АЭС;
- дискретная математическая модель тепловых процессов;
- методика синтеза распределенных систем управления параметрами активной зоны реакторов.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

- разработана математическая модель описывающая процессы активной зоны канальных реакторов, которая описывается уравнениями в частных производных и связывает различные физические процессы - скорость течения теплоносителя, состояние температурного поля в реакторе, область перехода вода-пар;

- на базе разработанной математической модели составлена дискретная математическая модель процессов в активной зоне реактора, основанная на применении конечно-разностного метода, с обоснованием выбора шагов дискретизации по пространственным переменным;

- адаптирован метод синтеза систем с распределенными параметрами на класс систем управления температурными полями теплоносителя в технологических каналах активной зоны атомных реакторов канального типа (получена методика);

– на основе разработанной методики синтезирована система управления температурными полями активной зоны атомного реактора канального типа (РБМК-1000);

– разработан вычислительный алгоритм и прикладные программы, позволяющие моделировать температурные поля активной зоны канального реактора в системе управления с распределенными параметрами.

Практическая ценность работы. В работе рассматривается решение важной технической задачи – синтез систем управления сложными технологическими процессами активной зоны реактора, обеспечивая при этом безопасность эксплуатации АЭС. Разработаны методика, вычислительные алгоритмы и прикладные программы для анализа и синтеза систем управления рассматриваемого типа объектов. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при проведении модернизации реакторов РБМК (системы регулирования расходов теплоносителя в технологических каналах реактора), а также при проектировании запорно-регулирующих клапанов для контроля и регулирования расхода теплоносителя в реакторах канального типа.

Реализация результатов работы. Научные и прикладные результаты, полученные в диссертации, используются в учебном процессе Национального минерально-сырьевого университета «Горный» в программах дисциплин: «Алгоритмизация и управление техническими системами», «Моделирование систем управления».

Результаты диссертационного исследования внедрены в научную и проектную деятельность Научно-внедренческого центра Международного исследовательского института, г. Москва, что подтверждается актом о внедрении результатов.

Апробация работы. Научные и прикладные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XII Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления», Санкт-Петербург, СЗТУ, 19-21 мая 2011г.; IV Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика», Таганрог, ТТИ ЮФУ, 11-13 октября 2011г.; III Международной научной конференции «Актуальные проблемы народнохозяйственного комплекса: инновации инвестиции», Москва, 26 января 2012г.; Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах», Санкт-Петербург, 9-10 февраля 2012г.; I Международной научно-практической конференции «Технические науки – основа современной инновационной системы», г. Йошкар-Ола, 25 апреля 2012г.; X Международной Четаевской конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление», Казань, 12-16 июня 2012г.; Международной молодежной научной конференции «Математическая физика и ее приложения», Пятигорск, 28-30 июня 2012г.; XIX и XX Международных научно-технических конференциях «Машиностроение и техносфера XXI века», Севастополь, 2012г., 2013г.; Международной научно-практической конференции: «Актуальные вопросы современной науки:

экономика, управление проектами, политология, психология, право, педагогика, социология, медицина, философия», Санкт-Петербург, 29-30 марта 2013г.; Всероссийской научной конференции «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу», Пятигорск, 9-10 апреля 2013г.; Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика», Пятигорск 7-11 октября 2013г.

Публикации. Материалы диссертационного исследования опубликованы в семнадцати научных работах, в том числе в четырех изданиях, включенных в перечень ведущих рецензируемых изданий, утвержденных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (190 наименований), приложений. Материал диссертации изложен на 134 страницах основного текста, содержит 30 рисунков и 2 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертации обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, выделены объект и предмет исследования, приведены методы исследования, научная новизна, практическая ценность работы и результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен обзор современного состояния диагностики реакторных установок. Произведен анализ реакторов атомных электростанций как систем с распределенными параметрами.

Представлен обзор методов синтеза регуляторов для систем с распределенными параметрами, которые существуют на сегодняшний день: аналитическое конструирование оптимальных регуляторов (АКОР); параметрический синтез регуляторов; конечномерная аппроксимация систем с распределенными параметрами; структурный метод анализа и частотный метод синтеза.

Приведен подход к решению задачи управления температурными полями системой управления с подвижным управляющим воздействием в виде жидкого теплоносителя на примере цилиндра, имеющего конечные размеры.

Во **второй главе** представлено описание объекта управления - атомной электростанции. В работе рассмотрены типичные реакторы атомных электростанций.

Рассмотрены гетерогенные каналные реакторы с графитовым замедлителем и водяным кипящим теплоносителем. В качестве топлива используются уран-эрбиевые таблетки. Реактор состоит из цилиндрической графитовой кладки замедлителя, размещаемой в бетонной шахте. Основным элементом реактора является активная зона, состоящая из вертикальных графитовых блоков, через которую проходят специальные каналы для органов регулирования и технологические каналы (ТК) с ядерным топливом, охлаждаемые водой. Внутренняя полость реактора заполнена прокачиваемой через кладку азотно-гелиевой смесью с небольшим избыточным давлением. Этим обеспечивается предотвращение выгорания графита.

Основная задача безопасной эксплуатации реактора РБМК – постоянное поддержание необходимого охлаждения активной зоны. Теплоноситель (вода) подается в ТК реактора для отвода тепла от тепловыделяющих сборок (ТВС) и

от графитовой кладки при помощи контура многократной принудительной циркуляции.

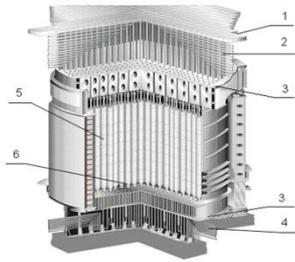


Рис. 1. Активная зона реактора

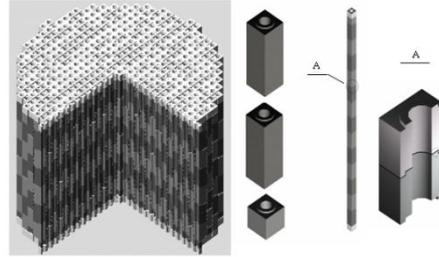


Рис. 2. Вид графитовой кладки

Из ТК паро-водяная смесь отводится в барабаны-сепараторы, где разделяется на воду и сухой насыщенный пар. Вода возвращается на вход в ТК, а пар поступает на турбогенераторы. Отклонение температуры поступающего пара (ПП) приводит к потерям в генерации энергии. Температура ПП зависит от температурного поля внутри реактора и скорости течения теплоносителя. В канальных реакторах существует возможность регулирования расхода теплоносителя по каждому ТК с помощью запорных клапанов (ЗРК). Управление ЗРК на сегодняшний день, производится вручную. Управление расходом теплоносителя через реактор (изменение скорости течения теплоносителя) позволяет регулировать температурное поле в активной зоне, а как следствие высоту экономайзерной зоны (зеркала перехода жидкости в пар) и обеспечивает заданную температуру пара, поступающего в генератор.

Сформулирована задача синтеза распределенного регулятора для системы управления параметрами экономайзерной зоны.

В третьей главе исследованы взаимосвязи между процессами в активной зоне гетерогенных канальных реакторов. Построена математическая модель, описывающая процессы в активных зонах реакторов, разработана дискретная математическая модель, а так же представлен алгоритм и программный код программного обеспечения для моделирования процессов в активной зоне реакторов.

При анализе ядерных установок важная роль принадлежит расчету тепловыделяющей системы. Ее математической моделью является, выведенное на основе первого закона термодинамики, уравнение теплопроводности.

На рисунках 3 и 4 представлены схема технологического канала в проекции на оси системы координат и вид ТК в активной зоне.

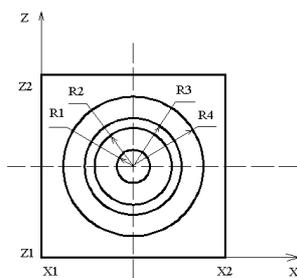


Рис. 3. Схема ТК

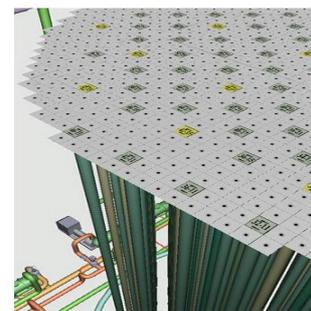
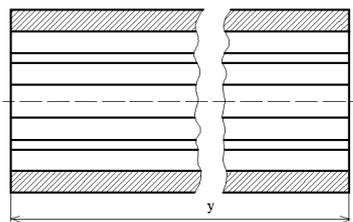


Рис. 4. Вид ТК

Технологические каналы расположены в вертикальных графитовых блоках, сечением $x * z$. Блоки по вертикальной оси имеют сквозные отверстия (на схеме радиус R4), предназначенные для размещения технологических каналов. Центральная часть ТК представляет собой циркониевую трубу (на схеме внутренний радиус трубы R2, внешний – R3). На циркониевую трубу для обеспечения теплового контакта с блоками кладки надеты графитовые кольца. R1 – радиус тепловыделяющей сборки (ТВС).

В работе рассмотрена часть активной зоны в количестве 21 графитового блока. Ниже представлен фрагмент математической модели для одной произвольно выбранной ячейки графитовой кладки.

Дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к графитовой кладке:

$$\frac{\partial T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial t} = a_{\Gamma} \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial z^2} \right] + \frac{a_{\Gamma} W_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma} V_{\Gamma}}, \quad (1)$$

$$X4 < x < X5, \quad Y1 < y < Y2, \quad Z2 < z < Z3,$$

где a_{Γ} – коэффициент температуропроводности графита, x, y, z – пространственные координаты, W_{Γ} – мощность, выделяемая при торможении нейтронов, λ_{Γ} – коэффициент теплопроводности графита, V_{Γ} – объём графитовой кладки.

Уравнение теплопроводности при анализе тепловых процессов в технологических каналах, удобнее записывать в цилиндрических координатах.

Дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к циркониевой трубе:

$$\frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial t} = a_{\text{Ц}} \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial y^2} \right], \quad (2)$$

$$Y1 < y < Y2, \quad R2 < R < R3,$$

где $a_{\text{Ц}}$ – коэффициент температуропроводности циркония.

Дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к теплоносителю в технологическом канале:

$$\frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial t} = a_T \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial y^2} \right] -$$

$$- \vartheta(R,t) \cdot \frac{\partial T_{p,f}(y,\varphi,R,t)}{\partial y}, \quad (3)$$

$$Y1 < y < Y2, \quad R1 < R < R2,$$

где ϑ – скорость движения теплоносителя в канале, a_T – коэффициент температуропроводности теплоносителя.

Определим скорость движения теплоносителя из соотношения

$$\vartheta = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\eta_{\omega} \cdot \rho}},$$

где $g(r, t)$ - скорость движения теплоносителя; ρ - плотность теплоносителя; η_ω - потери напора в канале; ΔP - разность давлений на входе и на выходе канала.

Площадь «живого» сечения каналов регулируется ЗРК (рисунок 5).

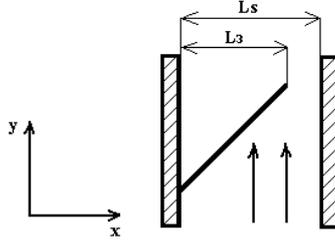


Рис. 5. Запорно-регулирующий клапан:

L_s - размер внутреннего диаметра трубы, L_3 - текущее положение заслонки.

Потери напора в каналах постоянного сечения могут быть определены из следующего соотношения:

$$\eta_\omega = 1 + \xi_M, \quad \xi_M = \frac{1,6 \cdot L_s}{L_s - L_3},$$

где ξ_M - потери напора, вследствие изменения «живого» сечения.

В разработанной математической модели присутствуют уравнения, записанные в прямоугольной и цилиндрической системе координат. Для их стыковки были выделены зоны цилиндрической формы с радиусом R_4 в графитовых блоках, они совпадают с границами сквозных отверстий в графитовых блоках (рисунок 3). Для этих зон были составлены дополнительно дифференциальные уравнения теплопроводности.

Дифференциальное уравнение теплопроводности применительно к выбранной ячейке графитовой кладки в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_\Gamma \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial y^2} \right] + \frac{a_\Gamma W_\Gamma}{\lambda_\Gamma V_\Gamma},$$

$$Y1 < y < Y2, \quad \Phi < \varphi < \Phi2, \quad R3 < R < R4. \quad (4)$$

Представленные дифференциальные уравнения отражают общий характер процесса. Чтобы получить математическую модель объекта, соответствующую рассматриваемой задаче, были заданы условия однозначности.

Граничные условия внутри ячейки:

- для циркониевой трубы и графита:

$$T_{Ц}(y, \varphi, R3, t) = T_\Gamma(y, \varphi, R3, t), \quad \lambda_{Ц} \frac{\partial T_{Ц}(y, \varphi, R3, t)}{\partial R} = \lambda_\Gamma \frac{\partial T_\Gamma(y, \varphi, R3, t)}{\partial R},$$

- для теплоносителя и циркониевой трубы:

$$T_{Ц}(y, \varphi, R2, t) = T_T(y, \varphi, R2, t), \quad \lambda_{Ц} \frac{\partial T_{Ц}(y, \varphi, R2, t)}{\partial R} = \lambda_T \frac{\partial T_T(y, \varphi, R2, t)}{\partial R}.$$

Граничные условия с соседними ячейками:

- между ячейками (p, f) и (p+1, f):

$$T_{p,f}(X5, y, z, t) = T_{p+1,f}(X5, y, z, t), \quad \lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{p,f}(X5, y, z, t)}{\partial X} = \lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{p+1,f}(X5, y, z, t)}{\partial X},$$

- между ячейками (p, f) и (p, f-1):

$$T_{p,f}(x, y, Z2, t) = T_{p,f-1}(x, y, Z2, t), \quad \lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{p,f}(x, y, Z2, t)}{\partial Z} = \lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{p,f-1}(x, y, Z2, t)}{\partial Z},$$

- между ячейками (p, f) и (p-1, f):

$$T_{p,f}(X4, y, z, t) = T_{p-1,f}(X4, y, z, t), \quad \lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{p,f}(X4, y, z, t)}{\partial X} = \lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{p-1,f}(X4, y, z, t)}{\partial X},$$

- между ячейками (p, f) и (p, f+1):

$$T_{p,f}(x, y, Z3, t) = T_{p,f+1}(x, y, Z3, t), \quad \lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{p,f}(x, y, Z3, t)}{\partial Z} = \lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{p,f+1}(x, y, Z3, t)}{\partial Z}.$$

Аналогично дифференциальные уравнения теплопроводности были составлены и для остальных рассматриваемых ячеек.

При моделировании рассматривались тепловые процессы, протекающие в графитовой кладке, состоящей из графитовых блоков. В технологическом канале располагается тепловыделяющая сборка, омываемая теплоносителем. Положения ЗРК будем рассматривать как функции входа, а контрольные точки во внутренних углах графитовых кладок как функции выхода. Эти точки выбраны не случайно. В реакторе в этих точках на стыках графитовых блоков расположены пятизонные термопары – датчики измерения температуры графита. На рисунке 6 представлены рассматриваемые ячейки, ориентированные в горизонтальной плоскости осей пространственных координат X-Z, ось Y в данном случае является осью ординат. Система дифференциальных уравнений (1-4) решалась методом «сеток». Для этого была составлена дискретная модель тепловых полей активной зоны реактора. В процессе составления дискретной модели решались задачи «стыковки» граничных условий, задачи обоснования выбора шагов дискретизации по пространственным переменным, задачи обеспечения устойчивости вычислительной схемы, а также «стыковки» декартовой и цилиндрической систем координат.

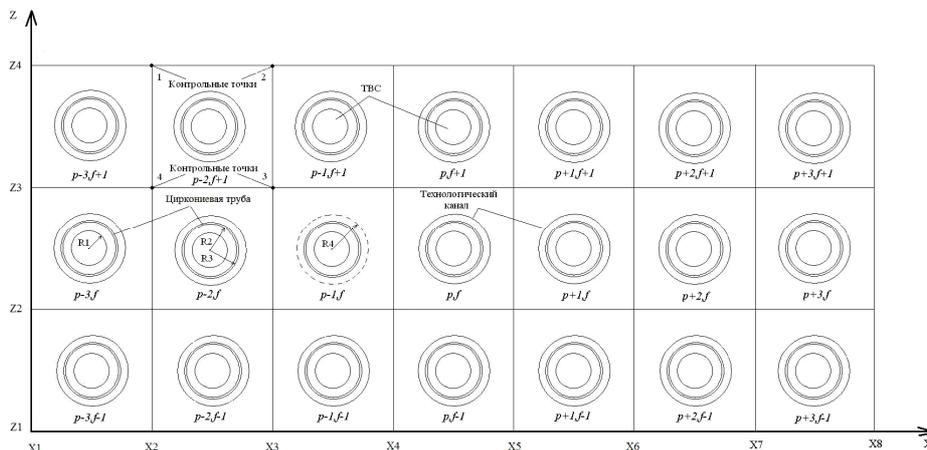


Рис. 6. Схема расположения рассматриваемых ячеек ТК:

R1 – радиус ТВС, R2 – радиус внутренней поверхности циркониевой трубы, R3 – радиус внешней поверхности циркониевой трубы, R4 – радиус сквозного отверстия в графитовом блоке.

На рисунке 7 представлена схема наложения сетки на ячейки графитовой кладки.

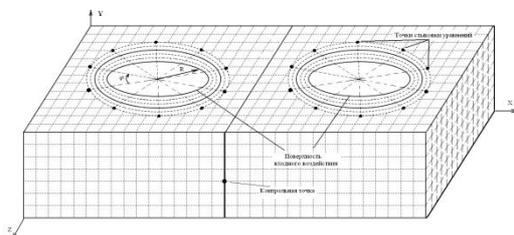


Рис. 7. Схема наложения сетки на ячейки графитовой кладки

Рассмотрим методику составления дискретной модели объекта на примере одного элемента – ячейки (p, f) , представленного на рисунке 6.

Для численного решения уравнений в частных производных применим метод сеток или разностный метод. Произведем замену:

$$y = i; \quad \varphi = k; \quad R = j; \quad x = l; \quad z = m.$$

Дискретный аналог для уравнения теплопроводности графита в декартовых координатах (1) имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta T(i, m, l, t) = a_{\Gamma} \Delta t \cdot & \left[\frac{T(i, m, l-1, t) - 2T(i, m, l, t) + T(i, m, l+1, t)}{\Delta x^2} + \right. \\ & \left. + \frac{T(i, m-1, l, t) - 2T(i, m, l, t) + T(i, m+1, l, t)}{\Delta z^2} + \right. \\ & \left. + \frac{T(i-1, m, l, t) - 2T(i, m, l, t) + T(i+1, m, l, t)}{\Delta y^2} \right] + \frac{a_{\Gamma} W_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma} V_{\Gamma}} \Delta t, \end{aligned}$$

где a_{Γ} – коэффициент температуропроводности графита, x, y, z – пространственные координаты, W_{Γ} – мощность, выделяемая при торможении нейтронов, λ_{Γ} – коэффициент теплопроводности графита, V_{Γ} – объём графитовой кладки, $\Delta t, \Delta y, \Delta x, \Delta z$ – шаги дискретизации по времени и пространственным координатам соответственно.

Дискретный аналог для уравнения теплопроводности графита в цилиндрических координатах (4) записывается как:

$$\begin{aligned} \Delta T(i, k, j, t) = a_{\Gamma} \Delta t \left[\frac{T(i-1, k, j, t) - 2T(i, k, j, t) + T(i+1, k, j, t)}{\Delta y^2} + \right. \\ \left. + \frac{T(i, k, j-1, t) - 2T(i, k, j, t) + T(i, k, j+1, t)}{\Delta R^2} + \frac{T(i, k, j, t) - T(i, k, j-1, t)}{\Delta R \cdot B} + \right. \\ \left. + \frac{T(i, k-1, j, t) - 2T(i, k, j, t) + T(i, k+1, j, t)}{\Delta \varphi^2 \cdot B \cdot B} \right] + \frac{a_{\Gamma} W_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma} V_{\Gamma}} \Delta t. \end{aligned}$$

Аналогично, записывая дискретные аналоги уравнений (2)-(3), получим дискретную модель объекта управления.

Разработано программное обеспечение, отвечающее требованиям доступности и наглядности для пользователей (оперативного персонала, ведущего контроль технологического процесса).

С помощью разработанного программного обеспечения были рассчитаны значения температур в контрольных точках, соответствующих местам расположения термопар, которые установлены в графитовой кладке на реакторе. На рисунке 8 представлены результаты моделирования.

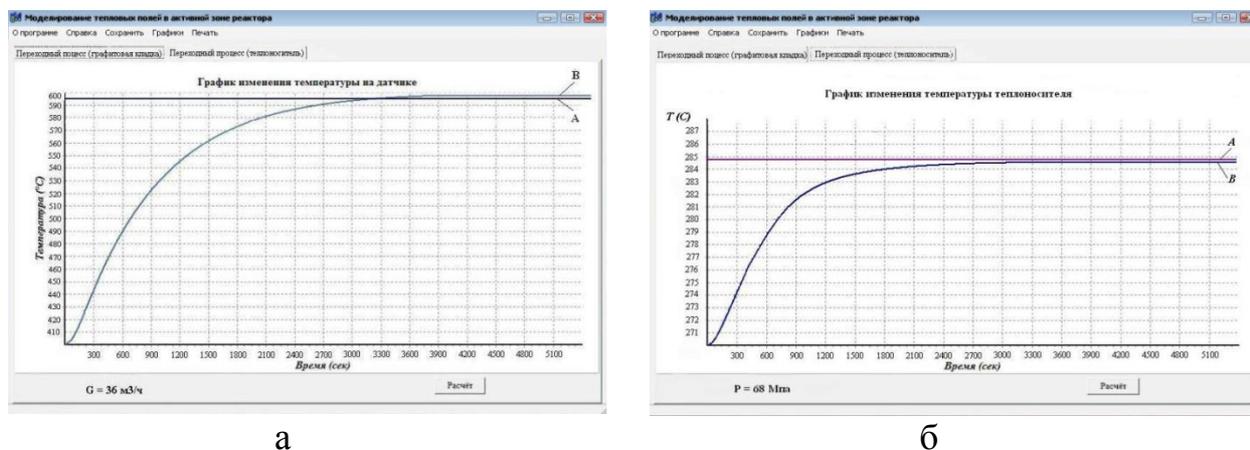


Рис. 8. Графики переходного процесса: а - в контрольной точке № 2, б - в теплоносителе на выходе из канала.

На рисунке 8 графики А соответствуют данным, полученным с ИВС «Скала-микро», графики В - данным, полученным расчетным путём.

Результаты моделирования были проверены с помощью информационно-вычислительной системы «Скала-микро» Ленинградской атомной электростанции, обеспечивающей контроль над работой реактора. Значения, полученные путем моделирования, совпали с показаниями датчиков, которые установлены в графитовой кладке реактора. Результаты моделирования показали, что переходные процессы обладают заданными показателями качества. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности разработанной математической модели.

В четвертой главе рассмотрена процедура синтеза распределенной системы управления. Представлены описание системы управления, методика синтеза распределенного регулятора для управления параметрами активной зоны реактора, синтез распределенного регулятора для системы управления температурным полем активной зоны канального реактора. Приведены результаты моделирования работы замкнутой системы управления.

Для безопасной эксплуатации АЭС необходимо постоянное охлаждение активной зоны реактора РБМК. Теплоноситель подается в ТК реактора для отвода тепла от ТВС и графитовой кладки, и осуществляется при помощи контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ). Теплоноситель подается в каждый ТК активной зоны снизу от раздаточного коллектора через индивидуальный запорно-регулирующий клапан. Регулировка ЗРК производится, в настоящее время, вручную. Для регулирования расхода теплоносителя и управления температурным полем активной зоны канального реактора в работе предлагается использовать распределенный высокоточный регулятор (РВР). Синтез распределенной системы управления позволит значительно повысить скорость реакции при возможных отклонениях параметров активной зоны реактора. В качестве исполнительного механизма

(ИМ) предлагается использовать шаговый двигатель, т.к. он соответствует требованию высокой точности позиционирования.

На рисунке 9 показаны структурные схемы управления ЗРК.

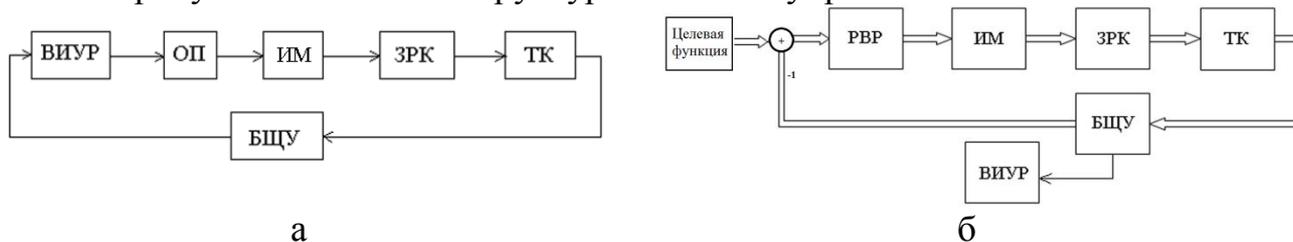


Рис. 9. Структурные схемы управления ЗРК: а – действующего на АЭС, б – предложенного в работе: ВИУР – ведущий инженер по управлению реактором, ОП – оперативный персонал, БЩУ – блочный щит управления, РВР – распределенный высокоточный регулятор, ИМ – исполнительный механизм.

При предлагаемом способе управления расходом теплоносителя автоматизируется регулировка ЗРК, т.е. оперативный персонал осуществляет только контроль технологических параметров активной зоны.

В качестве целевой функции системы управления используются параметры зоны перехода вода-пар. Управляющее воздействие на объект - положение запорно-регулирующей аппаратуры, связанное с объемом воды, проходящим через канал.

Ставится задача определения параметров РВР для системы управления параметрами зоны перехода (вода-пар) рассмотренного выше объекта управления.

Методика синтеза рассмотрена на примере синтеза системы управления параметрами реактора РБМК-1000. Основные параметры рассматриваемого реактора представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры реактора РБМК-1000

| Описание, единицы измерения | Величина |
|---|----------|
| Электрическая мощность, МВт | 1000 |
| Тепловая мощность, МВт | 3200 |
| Массовый расход теплоносителя, кг/с | 10416 |
| Давление пара на входе турбины, МПа | 6.5 |
| Температура пара на входе турбины, °С | 280 |
| Температура питательной воды, °С | 165 |
| Диаметр активной зоны, м | 11.8 |
| Высота активной зоны, м | 7 |
| Диаметр канальной трубы, мм | 88 |
| Толщина стенки канальной трубы, мм | 4 |
| Число топливных каналов | 1661 |
| Число твэлов в тепловыделяющей кассете | 2x18 |
| Максимальная мощность канала, МВт | 3.0 |
| Диаметр твэла, мм | 13.5 |
| Диаметр тепловыделяющей кассеты, мм | 79 |
| Глубина выгорания топлива, МВт·сут/кг U | 21.6 |
| Масса графита, кг | 1700000 |
| Температура графита, °С | 500-700 |
| Число регулирующих стержней | 211 |

Методика синтеза распределенного регулятора для управления параметрами активной зоны реактора состоит из следующих этапов:

1. Идентификация динамических характеристик объекта управления. Математическая модель объекта управления описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, не имеющих аналитического решения. Используя дискретную модель объекта управления, определим реакцию объекта на выбранные пространственные моды входного воздействия. Для рассматриваемого объекта управления передаточные функции по каждой моде входного воздействия аппроксимируются передаточными функциями вида:

$$W_{\eta}(S) = \frac{K_{\eta}}{T_{\eta} \cdot S + 1} \cdot e^{-\tau_{\eta} \cdot S}, \quad (\eta = 1, 2, \dots) \quad (5)$$

Значения параметров K_{η} , T_{η} , τ_{η} определяются по результатам численного моделирования.

Для проведения частотного анализа разложим входное воздействие $U(x, z, t)$ в ряд Фурье. Учитывая граничные условия, входное воздействие может быть представлено в виде:

$$U(x, z, t) = L_3 + 0.1 \cdot L_s \cdot \sin(\Psi_{\eta} \cdot x_i) \cdot \sin(\bar{\Psi}_{\gamma} \cdot z_i), \quad (6)$$

где L_s - размер внутреннего диаметра трубы, L_3 - текущее положение

заслонки, $\Psi_{\eta} = \pi \cdot \frac{\eta}{x_L}$, $\bar{\Psi}_{\gamma} = \pi \cdot \frac{\gamma}{z_L}$.

$L_3 = 0.5 \cdot (L_s)$ – в начальный момент заслонка на половину открыта.

Ракцию объекта на каждую составляющую ряда (6) будем искать в виде:

$$T_{\eta, \gamma}(x, y, z, t) = H_{\eta, \gamma}(y, t) \cdot \sin(\Psi_{\eta} \cdot x) \cdot \sin(\bar{\Psi}_{\gamma} \cdot z).$$

Область распределения входного воздействия по первой и третьей пространственной моде, принятых при экспериментальных исследованиях, показана на рисунке 10.

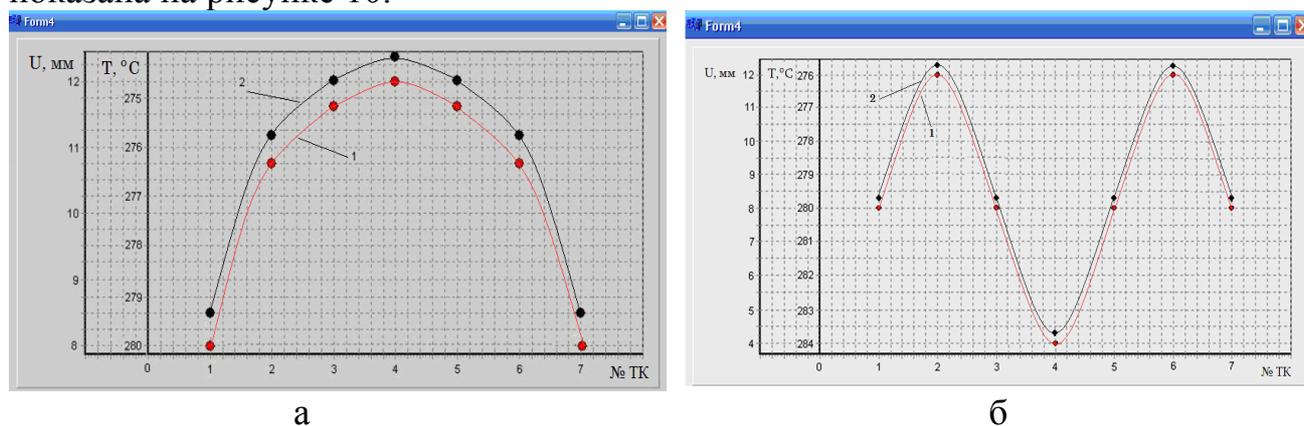


Рис.10. Область распределения входного воздействия: а – по первой пространственной моде, б – по третьей пространственной моде: 1 – функция входа – положение ЗРК, 2 – функция выхода – температура в контрольной точке, № ТК – номер технологического канала, Т – температура теплоносителя, U – открытие ЗРК.

Для двух пространственных мод входного воздействия ($\eta = 1, 3$) были проведены экспериментальные исследования и вычислены значения параметров передаточной функции (5):

$$K_1 = 1.0257; \quad T_1 = 0.7125; \quad \tau_1 = 0.1002; \quad K_3 = 1.0392; \quad T_3 = 0.6232; \quad \tau_3 = 0.1002.$$

2. Синтез регулятора. Для системы управления объектом, передаточные функции которого по выбранным пространственным модам заданы в виде (6), требуется синтезировать РВР. При этом на запасы устойчивости разомкнутой системы наложено ограничение: запас устойчивости по фазе - $\Delta \varphi \geq \pi / 6$.

Передаточная функция распределенного высокоточного регулятора имеет вид:

$$W(x, y, s) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{s} + E_2 \cdot \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot s,$$

где: E_1, E_2, E_4 - коэффициенты усиления, ∇^2 - лапласиан, n_1, n_2, n_4 - весовые коэффициенты.

Для решения поставленной задачи определяются желаемые точки среза модуля разомкнутой системы для двух выбранных пространственных мод - $G_1 = 20.75$; $G_3 = 186.73$.

Определим частоты среза модуля разомкнутой системы:

$$-\pi + \Delta \varphi = -\omega \tau (G_i) - \arctg (T(G_i) \cdot \omega), \quad (i = 1, 3),$$

$$i = 1, \omega_1 = 2.84, \quad i = 3, \omega_3 = 2.92.$$

Определим значения модуля объекта управления для выбранных пространственных мод

$$M_1 = \frac{K_1}{((T_1 \cdot \omega_1)^2 + 1)^{\frac{1}{2}}} = 0.51, \quad M_3 = \frac{K_3}{((T_3 \cdot \omega_3)^2 + 1)^{\frac{1}{2}}} = 0.78.$$

Так как ω_1, ω_3 являются частотами среза модуля разомкнутой системы, то вычисленные коэффициенты усиления регулятора в этих точках равны:

$$\bar{M}_1 = (M_1)^{-1} = 1.96, \quad \bar{M}_3 = (M_3)^{-1} = 1.28,$$

$$\Delta M = \frac{\bar{M}_3}{M_1} = 0.65, \quad n_1 = \frac{-1 + \Delta M - \Delta M \cdot G_1 + G_3}{\Delta M - 1} = 1828.71,$$

$$E_1 = \frac{\bar{M}_1}{\left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G_1}{n_1} \right]} = 1.76.$$

Подставляя вычисленные значения в $\Delta \omega^2 = \frac{\omega_3^2}{\omega_1^2}$, получим $\Delta \omega^2 > 1$.

Произведя вычисления, получим:

$$n_2 = \infty, \quad n_4 = 2856.17, \quad E_4 = 2.5, \quad E_2 = 0.02.$$

Передаточная функция синтезированного распределенного высокоточного регулятора имеет вид:

$$W(x, y, s) = 1.75 \cdot \left[\frac{1827.71}{1828.71} - \frac{1}{1828.71} \cdot \nabla^2 \right] + 2.5 \cdot \left[\frac{2855.17}{2856.17} - \frac{1}{2856.17} \cdot \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{s} + 0.02 \cdot s$$

Каждому положению ЗРК соответствует свое значение температуры в контрольной точке. При моделировании рассматривался один выбранный технологический канал.

Объект управления и структурная схема системы управления приведены на рисунках 11 и 12.

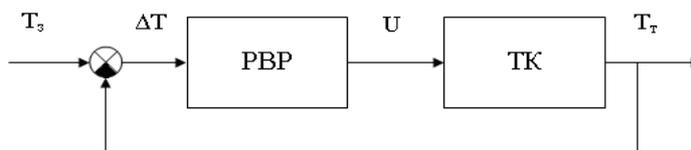
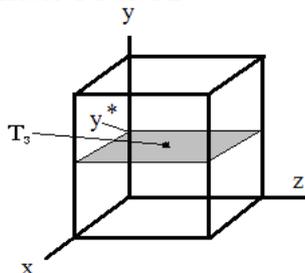


Рис. 11. Объект управления Рис. 12. Структурная схема системы управления

где: T_3 - заданное значение поля температур $T_3(x, y)$, T_T - текущие значение температуры $T_T(x, z, y = y^*)$, y^* - заданное значение, $\Delta T = T_3 - T_T$.

Используя численные модели объекта и регулятора, было осуществлено моделирование работы замкнутой системы управления. Результаты показаны на рисунках 13 и 14.

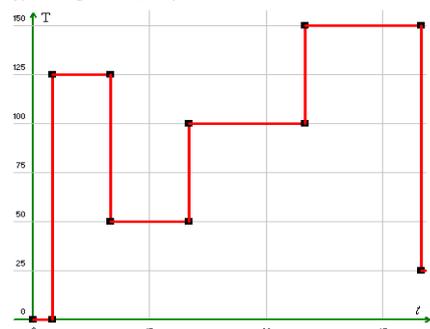


Рис. 13. Входное воздействие

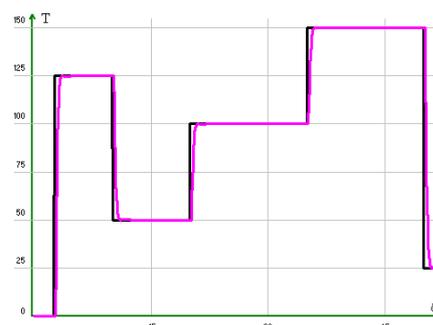


Рис. 14. Функция выхода

Результаты моделирования показали, что управление в замкнутой системе реализуется в соответствии с заданными требованиями.

Применение РВР позволяет синтезировать системы управления сложными тепловыми процессами активной зоны канального реактора, обеспечивая при этом безопасность эксплуатации АЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты диссертации направлены на развитие теории и практики моделирования и управления технологическими процессами в атомных реакторах канального типа.

Основные научные результаты:

Распределенная математическая модель канального реактора позволяет анализировать нестационарные тепловые процессы, протекающие в активной зоне канального реактора.

На основе разработанной математической модели составлена дискретная математическая модель тепловых процессов, основанная на применении конечно-разностного метода, позволяющая исследовать динамические

характеристики рассматриваемого объекта управления и моделировать поведение замкнутых распределенных систем управления.

Разработанная методика синтеза распределенных систем управления параметрами активной зоны канального реактора позволяет формировать требуемые температурные поля.

Повышение качества управления температурными полями активной зоны атомного реактора (при помощи регулирования расхода теплоносителя через активную зону реактора) обеспечивается применением распределенного высокоточного регулятора, реализация которого достигается на основе разработанного программного обеспечения. Введение регулятора в систему позволяет значительно увеличить скорость отклика при возможных отклонениях расхода воды через активную зону реактора.

Разработка автоматической системы управления рассматриваемым процессом обеспечит заданные технологические параметры пара на выходе из активной зоны АЭС, что обеспечит оптимальные режимы работы электрических генераторов.

Разработанные прикладные программы позволяют моделировать температурные поля активной зоны канального реактора в системе управления с распределенными параметрами.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Морева С.Л., Ляшенко А.Л. Математическое моделирование тепловых процессов в активной зоне реактора // Научное Обозрение. - Москва.: Изд. ООО «АПЕКС-94», - № 2.-2012. – С. 182-188.

2. Морева С.Л., Золотов О.И., Ляшенко А.Л. Разработка математической модели температурных полей активной зоны реактора РБМК-1000 // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, - № 4.-2012. – С. 79-84.

3. Кучеренко И.А., Илюшин Ю.В., Ляшенко А.Л., Морева С.Л. Анализ температурного поля цилиндрического объекта управления // Научное Обозрение. - Москва.: Изд. ООО «АПЕКС-94», - № 3.-2013. – С. 71 - 75.

4. Морева С.Л. Синтез распределенного ПИД-регулятора для системы управления теплоносителем в канальном реакторе // Научное Обозрение. - Москва.: Изд. ООО «АПЕКС-94», - № 7.-2013. – С. 78-82.

Публикации в других изданиях

5. Морева С.Л., Ляшенко А.Л. Моделирование тепловых полей в активной зоне реактора РБМК-1000 // Труды XII Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления II часть». – СПб.:СЗТУ, 2011. – С. 88–94.

6. Морева С.Л., Ляшенко А.Л. Математическое моделирование системы с распределенными параметрами на примере активной зоне реактора РБМК-1000 // Материалы IV Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». – Таганрог.: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 218 – 225.

7. Морева С.Л., Соколов В.В., Ляшенко А.Л. Разработка программного обеспечения для моделирования системы с распределенными параметрами на примере активной зоне реактора РМБК-1000 // Материалы IV Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». – Таганрог.: Изд-во ГТИ ЮФУ, 2011. – С. 237-243.

8. Морева С.Л. Математическая модель активной зоны реактора как объекта управления с распределенными параметрами // Материалы Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах». Том 4.-СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 111-116.

9. Морева С.Л., Ляшенко А.Л. Разработка программного комплекса для моделирования тепловых процессов в активной зоне реакторных установок // Журнал «Народное хозяйство» № 1/2012. - Москва.:Изд-во МИИ Наука. – С. 243-248.

10. Морева С.Л. Разработка методики моделирования тепловых процессов в активной зоне реакторных установок на примере реактора РМБК-1000 // Труды X Международной Четаевской конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление». Том 4. - Казань.: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012.- С. 184-190.

11. Морева С.Л., Ляшенко А.Л. Разработка методики мониторинга тепловых полей в графитовой кладке реакторных установок // Материалы I Международной научно-практической конференции «Технические науки – основа современной инновационной системы». - Йошкар-Ола.: Коллоквиум, 2012. – С. 21-24.

12. Морева С.Л., Ляшенко А.Л. Разработка методики расчета настроек оптимального ПИ-регулятора для системы с распределенными параметрами // Материалы Международной молодежной научной конференции «Математическая физика и ее приложения». Том 2. – Пятигорск.: Изд-во СКФУ, 2012. – С. 31-34.

13. Морева С.Л., Ляшенко А.Л. Частотный анализ систем с распределенными параметрами // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». Выпуск 1,2(44).- Донецк.: Изд-во ЧП «Технополис», 2012.- С. 149-154.

14. Морева С.Л. Разработка системы управления расходом теплоносителя в канальном реакторе // Материалы всероссийской научной конференции «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу». – Пятигорск. ФГАОУ ВПО «СКФУ» (филиал) в г. Пятигорске 2013.-Т2 (ч.II) – С.44-47.

15. Морева С.Л. Разработка методики построения математических моделей тепловых процессов для проведения мониторинга активной зоны реактора // Материалы Международной заочной научно-практической конференции: «Актуальные вопросы современной науки: экономика, управление проектами, политология, психология, право, педагогика, социология, медицина, философия». - СПб.: Изд-во КультИнформПресс, 2013.- С. 168-171.

16. Морева С.Л., Ляшенко А.Л. Разработка адаптивного управления для системы с распределенными параметрами // Сборник трудов XX

Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века».- Донецк.: ДонНТУ, 2013. Т.2. – С. 95-98.

17. Морева С.Л. Синтез распределенного регулятора для системы управления температурным полем активной зоны реактора // Материалы Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». - Пятигорск. ФГАОУ ВПО «СКФУ» (филиал) в г. Пятигорске, 2013. – С. 233-240.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве:

[1, 2, 11-13, 16] - построение математических моделей, отражающих взаимосвязи между процессами в активной зоне реакторов канального типа; [3, 5, 6] - разработка математических алгоритмов для моделирования процессов в активной зоне реактора; [7, 9] - разработка алгоритмов для компьютерного моделирования системы управления рассматриваемого класса объектов.

