

На правах рукописи

Насонова Варвара Алексеевна

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ НЕЙТРОНОВ В ЯДЕРНОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ
РЕАКТОРЕ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ В РАЗМНОЖАЮЩИХ
СВОЙСТВАХ СРЕДЫ

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор _____

МОСКВА - 2013

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Загребаев А.М., НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, главный научный
сотрудник, ОАО «НИКИЭТ»
Постников В.В.

кандидат физико-математических наук, заведующий
лаборатории, ОАО «ВНИИАЭС»
Моисеев И.Ф.

Ведущая организация: РНЦ «Курчатовский институт»

Защита диссертации состоится 17 мая 2013 г. в 15 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета Д212.130.09 в НИЯУ МИФИ по адресу:
115409, Москва, Каширское ш., 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан " ____ " апреля 2013 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре,
заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук, профессор



Леонов А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Основной проблемой современного развития ядерной энергетики является повышение безопасности ядерных энергетических реакторов, решение этой задачи подразумевает математическое моделирование объектов и процессов. При этом, отличительной особенностью реактора как объекта моделирования является наличие большого числа пространственно распределенных возмущающих факторов, например, вибрации тепловыделяющих сборок, колебания органов управления, случайные колебания расхода теплоносителя и др. По этой причине актуальным представляется подход к реактору как к объекту со случайными параметрами и, в соответствии с этим подходом, разработка его математической модели и исследование его статистических свойств для последующего решения ряда научно-практических задач, направленных на повышение безопасности эксплуатации мощных ядерных реакторов.

Цель работы – математическое моделирование статистических характеристик поля нейтронов в ядерном реакторе и исследование возможностей получения на их основе дополнительной информации для повышения безопасности эксплуатации реактора.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие основные задачи:

- разработана математическая модель и методика расчета статистических характеристик поля нейтронов в реакторе с пространственно распределенными обратными связями и системой регулирования;
- разработан программный комплекс, реализующий предложенную математическую модель;
- получены основные модельные и экспериментальные (на основе обработки архивов эксплуатационных параметров реакторов РБМК и ВВЭР) статистические характеристики плотности потока нейтронов и проведено их сопоставление;
- исследовано влияние пространственного распределения размножающих свойств среды, нейтронно-физических и теплофизических обратных связей, и параметров системы регулирования на статистические характеристики поля нейтронов;
- рассмотрено несколько методов восстановления коэффициента обратной связи по статистическим характеристикам.

Объектом исследования являются ядерные энергетические реакторы на тепловых нейтронах (РБМК и ВВЭР).

Предметом исследования являются статистические характеристики плотности потока нейтронов.

Научная новизна работы.

- Разработана математическая модель и методика для определения статистических характеристик поля нейтронов в ядерном энергетическом реакторе.
- Разработан программный комплекс, реализующий математическую модель и позволяющий проводить статистические исследования в широком диапазоне изменения параметров модели, вплоть до изменения ее структуры.
- Проведены численные исследования модельных статистических характеристик поля нейтронов в реакторе.
- Проведена статистическая обработка реальных данных с энергоблоков реакторов типа РБМК и ВВЭР и сопоставление с результатами модельных исследований.
- Показано, что при приближении реактора к порогу ксеноновых колебаний увеличивается дисперсия плотности потока нейтронов, а величина дисперсии зависит от коэффициента обратной связи. Это означает принципиальную возможность определения в пассивном эксперименте коэффициента обратной связи по дисперсии плотности потока нейтронов.
- На основе анализа пространственного распределения дисперсии плотности потока нейтронов, предложена компоновка топлива профилированного по высоте, обеспечивающая устойчивость по отношению к возникновению ксеноновых колебаний при практически реализуемых уровнях плотности потока нейтронов.
- Предложен способ определения коэффициента обратной связи по скорости спада автокорреляционной функции плотности потока нейтронов.

Практическая значимость работы.

- Создана математическая модель и разработан программный комплекс для проведения статистических исследований поля нейтронов при случайных возмущениях в свойствах среды.
- Показана принципиальная возможность использования статистической информации о плотности потока нейтронов для контроля и диагностики параметров, важных для безопасности, например, коэффициентов обратных связей в пассивном эксперименте при работе реактора в режиме нормальной эксплуатации на номинальном уровне мощности.

- Предложена неоднородная по пространству загрузка реактора, которая существенно увеличивает уровень мощности, при которой начинаются ксеноновые колебания.

Основные положения, выносимые на защиту.

- Математическая модель и методика моделирования статистических характеристик поля нейтронов в ядерном реакторе с распределенными обратными связями;
- результаты исследований основных статистических характеристик плотности потока нейтронов и их зависимости от различных параметров моделирования;
- результаты статистической обработки архивов эксплуатационных параметров энергоблоков с реакторами РБМК и ВВЭР и их сравнение с результатами, полученными на модели;
- методика определения порога ксеноновых колебаний по статистическим характеристикам;
- методика определения коэффициентов обратных связей в пассивном эксперименте.

Достоверность научных положений, результатов и выводов основана на применении корректных математических моделей, сравнении результатов моделирования с экспериментальными данными.

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

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на конференциях МИФИ (2005-2008, 2010); на международном научно-техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (Алушта, 2007 – 2009, 2011); на XV семинаре по проблемам физики реакторов (Москва, 2008), на международной конференции «Дни науки» (Прага, 2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 работ в научных журналах и сборниках трудов международных и российских конференций и семинаров, в том числе 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК, монография, препринт.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 157 стр., содержит 132 рисунка, 36 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 90 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе диссертации приведен краткий обзор литературы по темам расчета и использования статистических характеристик плотности потока нейтронов в задачах определения параметров. Особое внимание уделено методу шумовой диагностики. Рассмотрены принципы, известные методы и алгоритмы восстановления коэффициентов реактивности в ядерном реакторе. Проанализированы их достоинства и недостатки. Поставлена задача исследования возможности определения коэффициентов обратных связей по статистическим характеристикам плотности потока нейтронов.

Во второй главе приводятся методика моделирования статистических характеристик поля нейтронов и основные уравнения математической модели: стохастическое уравнение для плотности потока нейтронов; уравнения обратных связей; замыкание системы уравнений через коэффициенты обратных связей; математическая модель системы регулирования; математическая модель генератора случайных возмущений. Также здесь описываются численные методы решения уравнений модели и ее программная реализация.

На рис. 1 приведена структурная схема математической модели реактора с обратными связями при случайных возмущениях в свойствах среды.



Рис. 1. Структурная схема математической модели реактора с обратными связями при случайных возмущениях в свойствах среды.

Так как для установления принципиальных закономерностей между параметрами реактора и статистическими характеристиками плотности потока нейтронов размерность задачи не имеет принципиального значения, то в дальнейшем используется одномерная модели реактора, что существенно упрощает моделирование статистического эксперимента. Будем рассматривать реактор как плоскую одномерную пластину, в которой могут перемещаться органы регулирования. В данной работе математическая модель рассматривается в двух вариантах: во-первых, «высотная модель», применительно к реактору РБМК (и

возможно применение к реактору ВВЭР, после исключения обратных связей по паросодержанию и температуре графита). И во-вторых, «радиальная модель» поля нейтронов по сечению активной зоны реактора РБМК вдоль диаметра (см. рис. 2). В последнем случае, температура теплоносителя и паросодержание в каждой точке вдоль диаметра активной зоны считается усредненной по высоте канала.

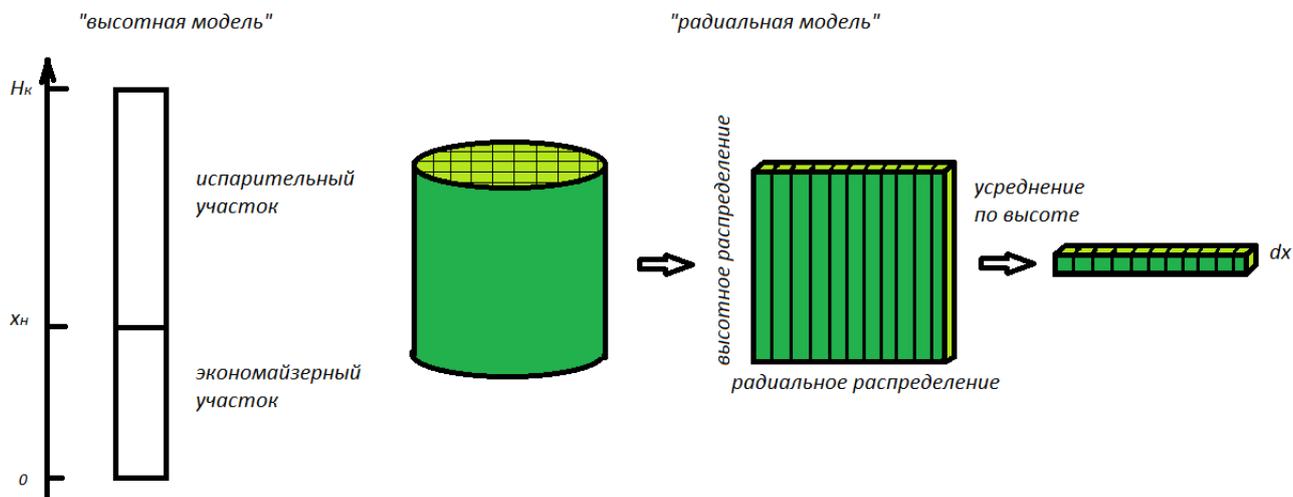


Рис. 2. Процесс сведения расчета к одномерному случаю.

Математическая модель поля нейтронов в реакторе с обратными связями

Распределение плотности потока нейтронов в активной зоне с учетом действия обратных связей описывается в одноступенчатом диффузионном приближении, при этом учитывается одна усредненная группа запаздывающих нейтронов и приближение мгновенного скачка:

$$0 = \frac{d}{dx} \left(D(x) \frac{d}{dx} \varphi(x, t) \right) + [(1 - \beta) K_\infty(x, t) - 1] [\Sigma_a(x) + \xi(x, t)] \varphi(x, t) + \lambda C(x, t) - \sigma_X X(x, t) \varphi(x, t) - \sigma_{Sm} S_m(x, t) \varphi(x, t) - \Sigma_p(x, t) \varphi(x, t), \quad (1)$$

$$\varphi(0) = \varphi(H) = 0$$

где $\Sigma_p(x, t)$ – макроскопическое сечение поглощения органов регулирования, причем перемещение органов регулирования имитируется изменением сечения поглощения; $\varphi(x, t)$ – плотность потока нейтронов в точке с координатой x в момент времени t ; $D(x)$ – коэффициент диффузии нейтронов; $\Sigma_a(x, t)$ – макроскопическое сечение поглощения; K_∞ – коэффициент размножения; $\xi(x, t)$ – флуктуирующий параметр, отражающий случайные изменения размножающих свойств среды; C – концентрация источников запаздывающих нейтронов с постоянной распада λ и долей запаздывающих нейтронов β ; X – концентрация ядер ксенона; σ_X – поперечное сечение захвата нейтронов ядрами ^{135}Xe ; S_m – концентрация ядер самария; σ_{Sm} – микроскопическое сечение поглощения нейтронов ядрами самария; H – размер реактора.

Уравнение для концентрации ядер-предшественников запаздывающих нейтронов:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \beta K_{\infty} \Sigma_a \varphi - \lambda C \quad (2)$$

Уравнения ксенонового отравления:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial t} &= \gamma_Y \Sigma_f \varphi - \lambda_Y Y \\ \frac{\partial X}{\partial t} &= \lambda_Y Y - \lambda_X X - \sigma_X X \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

где Y – концентрация ядер йода; λ_Y – постоянная распада ядер ^{135}I ; λ_X – постоянная распада ядер ^{135}Xe ; γ_Y – выход ^{135}I на деление ^{235}U тепловыми нейтронами; Σ_f – макроскопическое сечение деления.

Уравнения отравления самарием:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Pm}{\partial t} &= \gamma_P \Sigma_f \varphi - \lambda_P Pm \\ \frac{\partial Sm}{\partial t} &= \lambda_P Pm - \sigma_{Sm} Sm \varphi \end{aligned} \quad (4)$$

где Pm – концентрация ядер прометия; λ_P – постоянная распада ядер прометия; γ_P – выход ^{149}Pm на деление ^{235}U тепловыми нейтронами.

Уравнение для температуры топлива:

$$\frac{\partial T_T}{\partial t} = \frac{E_f \Sigma_f \varphi}{c_T \rho_T} - \frac{T_T - T_{TH}}{\tau_T} \quad (5)$$

где E_f – энергия на один акт деления; c_T – удельная массовая теплоемкость топлива; ρ_T – плотность топлива; τ_T – постоянная времени топлива.

Уравнение для температуры графита:

$$\frac{\partial T_{ГР}}{\partial t} = \frac{\gamma E_f \Sigma_f \varphi}{c_{ГР} \rho_{ГР}} - \frac{T_{ГР} - T_{ГН}}{\tau_{ГР}} \quad (6)$$

где $c_{ГР}$ – удельная массовая теплоемкость графита; $\rho_{ГР}$ – плотность графита; $\tau_{ГР}$ – постоянная времени графита; γ – доля тепла, выделенного в графите.

Уравнения для температуры теплоносителя:

$$T_{TH}(x, t) = \begin{cases} T_{ВХ} + \frac{1}{GC_P} \int_0^x q_l(z, t) dz, & \text{для } x < x_H \\ T_H, & \text{для } x \geq x_H \end{cases} \quad (7)$$

Уравнение по паросодержанию:

$$\begin{aligned} y(x, t) &= \frac{1}{Gr} \int_{x_H}^x q_l(z, t) dz \\ \eta &= \left[1 + \frac{\rho'' (1-y)}{\rho' y} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

где ρ'' - плотность пара; r - удельная теплота парообразования; y - массовое паросодержание; η - объемное паросодержание; G - расход воды; ρ' - плотность воды; C_p - теплоемкость воды; T_H - температура насыщения; T_{BX} - температура воды при входе; q_l - удельное линейное энерговыделение; x_H - координата начала кипения.

Связь коэффициента размножения с изменением теплофизических параметров активной зоны описывается следующим образом (замыкание системы уравнений через коэффициенты обратных связей):

$$K_{\infty}(x, t) = K_{\infty 0}(x) + \alpha_T \delta T_T + \alpha_{TН} \delta T_{TН} + \alpha_{ГР} \delta T_{ГР} + \alpha_{\eta} \delta \eta = \frac{\nu_f \Sigma_f(x)}{K_{эф} \Sigma_a(x)} + \\ + \alpha_T (T_T(x, t) - T_{T0}(x)) + \alpha_{TН} (T_{TН}(x, t - \tau_2) - T_{TН0}(x)) + \alpha_{ГР} (T_{ГР}(x, t) - T_{ГР0}(x)) + \\ + \alpha_{\eta} (\eta(x, t) - \eta_0(x)) \quad (9)$$

где $K_{\infty 0}$ - коэффициент размножения, обусловленный данной конфигурацией загрузки; ν_f - среднее число нейтронов деления; $K_{эф}$ - эффективный коэффициент размножения нейтронов; $\alpha_T, \alpha_{TН}, \alpha_{ГР}, \alpha_{\eta}$ - коэффициенты обратных связей по температуре топлива, температуре теплоносителя, температуре графита, паросодержанию соответственно; $\delta T_T, \delta T_{TН}, \delta T_{ГР}, \delta \eta$ - отклонения, соответственно, температуры топлива, температуры теплоносителя, температуры графита и объемного паросодержания от стационарного состояния; τ_2 - время задержки, связанное с временем прохождения воды по внешнему контуру.

Математическая модель системы регулирования

Работа системы автоматического регулирования описывается законом релейного регулирования. Рассматривается отдельно интегральная система регулирования по мощности и локальная система регулирования, которая поддерживает форму поля в пределах некоторых заданных уставок. Перемещение органов регулирования моделируется изменением сечения поглощения.

В случае интегрального регулирования по мощности изменение сечения поглощения происходит во всех точках активной зоны на одну и ту же величину, рассчитанную исходя из соотношений:

$$\Sigma_{адоб} = \begin{cases} 0, & \text{при } \left| \frac{W(t) - W_0}{W_0} \right| < y_0 \\ k \frac{W(t) - W_0}{W_0}, & \text{при } \left| \frac{W(t) - W_0}{W_0} \right| \geq y_0 \end{cases}, \quad (10)$$

где $\Sigma_{адоб}$ - дополнительное поглощение, вносимое при перемещении стержней регулирования; W_0 - планируемое значение мощности реактора; $W(t)$ - текущее значение мощности; k - коэффициент усиления; y_0 - пороговое значение, при достижении которого включается регулятор.

Система локального регулирования отслеживает отклонения плотности потока нейтронов за пределы допустимых значений и вводит стержни, обеспечивающие дополнительное поглощение не во всю зону, а только в область, в которой произошло отклонение. Отклонения фиксируются в точке расположения датчика, а дополнительное поглощение вводится во всю зону, за которую отвечает датчик, ширина зоны и места расположения датчиков могут варьироваться. Математические соотношения аналогичны (10):

$$\Sigma_{\text{адоб}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } \left| \frac{\varphi(t, x_i) - \varphi_0(x_i)}{\varphi_0(x_i)} \right| < c_0 \\ k_1 \frac{\varphi(t, x_i) - \varphi_0(x_i)}{\varphi_0(x_i)}, & \text{при } \left| \frac{\varphi(t, x_i) - \varphi_0(x_i)}{\varphi_0(x_i)} \right| \geq c_0 \end{cases}, \quad (11)$$

где $\Sigma_{\text{адоб}}(x)$ - дополнительное поглощение, вносимое при перемещении стержней регулирования в точку с координатой x ; $\varphi_0(x_i)$ - планируемое значение плотности потока нейтронов в точке расположения датчика; $\varphi(t, x_i)$ - текущее значение плотности потока нейтронов в точке расположения датчика; k_1 - коэффициент усиления; c_0 - пороговое значение, при достижении которого включается регулятор.

Математическая модель генератора шума

Для имитации случайных возмущений используется генератор шума, моделирующий возмущения с заданными законами распределения: равномерным или нормальным, или с заданным видом корреляционной функции (для довольно гладких функций).

Для моделирования случайных величин с равномерным законом распределения использовался датчик случайных чисел, встроенный в компилятор. Для моделирования случайных величин с нормальным законом распределения использовалась центральная предельная теорема. Корректность моделирования была проверена с помощью критерия согласия Пирсона.

Для моделирования коррелированных случайных величин использовался метод формирующего фильтра. Уравнение для фильтра имеет вид:

$$a_2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dx(t)}{dt} + a_0 x(t) = b_1 \frac{d\xi(t)}{dt} + b_0 \xi(t), \quad (12),$$

где $x(t)$ - случайная величина с заданной корреляционной функцией, $\xi(t)$ - белый шум.

Для такого вида уравнений аналитически известен вид корреляционной функции. Коэффициенты уравнения формирующего фильтра находились с помощью метода наискорейшего спуска из условия минимизации отклонения эмпирической и теоретической корреляционных функций. Оценки показали, что при использовании

такого подхода к генерированию случайных величин средняя квадратическая относительная ошибка в определении корреляционной функции не превышает 4%.

Для удаления помех и получения сигнала в заданном интервале частот использовался полосовой фильтр с окном Блэкмана.

Метод численной реализации математической модели

Для решения системы уравнений был выбран метод конечных разностей, при этом использовался шаблон, представленный на рис.3.

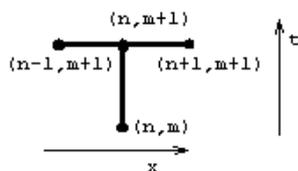


Рис.3. Применяемый шаблон для конечно-разностного метода

После применения указанного шаблона для аппроксимации производных по времени и пространству, полученная система уравнений относительно плотности потока нейтронов имеет трехдиагональный вид и может быть решена методом прогонки. На каждом временном шаге расчет плотности потока нейтронов осуществляется методом итерации источника, при этом критичность поддерживается при помощи системы АР (изменение сечения поглощения), начальные концентрации и температуры рассчитываются исходя из предположения, что реактор находится в стационарном состоянии, а в качестве граничных условий выбираются нулевые значения плотности потока нейтронов на границе реактора.

Разработанный программный комплекс реализует описанную выше математическую модель и предназначен для изучения статистических характеристик плотности потока нейтронов при случайных возмущениях в технологических параметрах. Функционально комплекс разделен на четыре модуля: расчетный, ввода исходных данных, вывода результатов и статистической обработки. Программный комплекс позволяет динамически настраивать вид модели, т.е. выбирать, какие обратные связи будут входить в расчет (включая настройки системы регулирования), задавать параметры этих обратных связей: константы, вид и значение коэффициентов обратных связей, также можно производить настройку тех характеристик, которые будут выводиться на экран и в файл.

В третьей главе приведены основные результаты статистических исследований. Исследования проводились как на данных, полученных с действующих энергоблоков, так и на данных, полученных с помощью разработанного программного комплекса. Так как вид статистических характеристик существенно зависит от текущих параметров реактора, при которых они были получены, то есть на них сильно влияет место расположения датчика, параметры обратных связей, параметры загрузки и др.,

то были произведены исследования влияния отдельных параметров на статистические характеристики.

Было установлено, что вид математического ожидания и дисперсии определяется совокупностью значений уровня шума, размера реактора и числа зон. Увеличение размера реактора и уровня шума приводят для математического ожидания к отклонению от фундаментального решения (синусоиды) и его уплощению, а для дисперсии характерно появление пиков и перемещение их к краям реактора (рис.4).

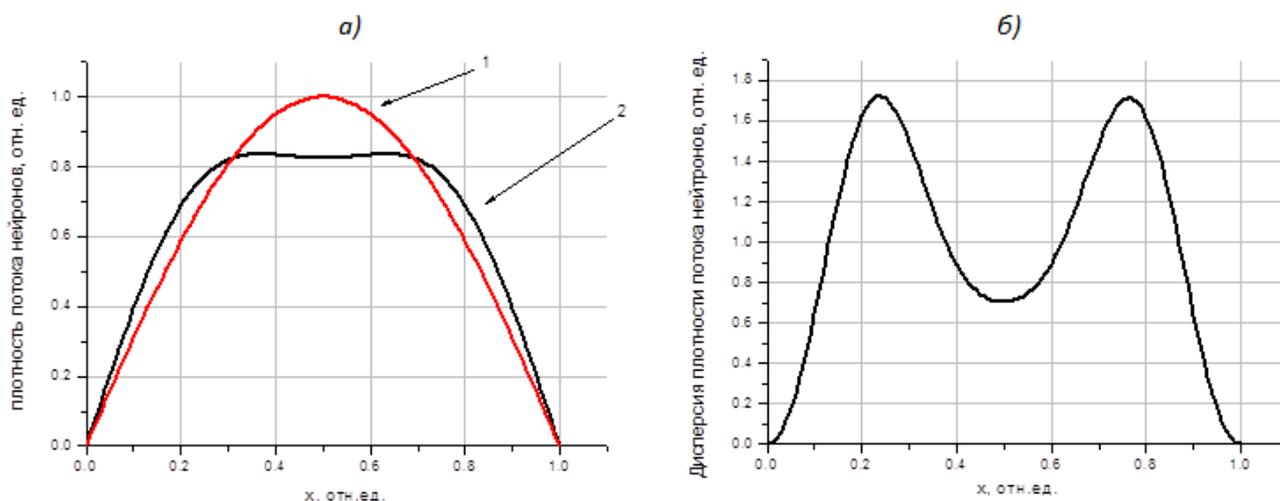


Рис. 4. а) 1 – распределение плотности потока нейтронов при однородной загрузке; 2 – математическое ожидание плотности потока нейтронов; б) дисперсия плотности потока нейтронов.

Наличие в рассматриваемой системе автоматического регулирования существенно влияет на вид получаемых характеристик. Во-первых, изменяется форма дисперсии плотности потока нейтронов за счет того, что система АР не дает существенно отклониться первой гармонике. Во-вторых, меняется характер автокорреляционной функции плотности потока нейтронов – она приближается по поведению к функции для более сильного отрицательного коэффициента обратной связи. При внесении в систему ЛАР вид статистических характеристик немного меняется. Дисперсия численно становится меньше, при этом ее форма сохраняется. Существенно меняется закон распределения плотности потока нейтронов (рис.5) – появляются дополнительные пики в местах срабатывания ЛАР. При учете влияния локального регулирования также важно учитывать место расположения датчика ЛАР, так как это существенно влияет на качество регулирования и в некоторых случаях может привести к разбалансированности вместо стабилизации.

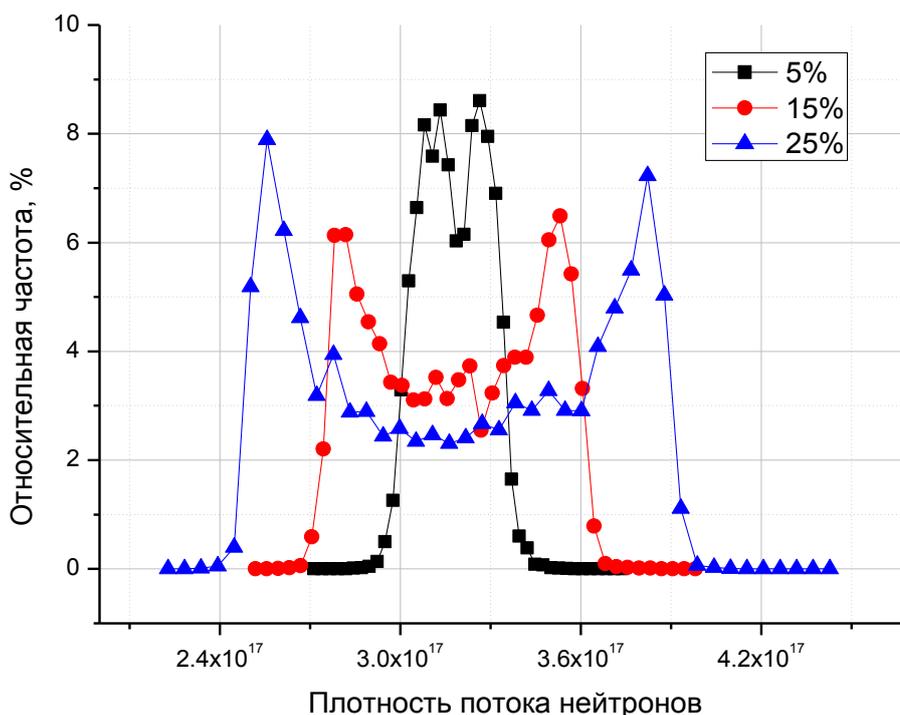


Рис. 5. Зависимость закона распределения плотности потока нейтронов от уставки ЛАР.

Особое внимание было уделено влиянию коэффициентов обратных связей на статистические характеристики: математическое ожидание, дисперсию, закон распределения, автокорреляционную функцию (спектральную плотность). Для однородной загрузки реактора были получены следующие зависимости:

- математическое ожидание плотности потока нейтронов практически не зависит от наличия обратных связей (из-за действия локального автоматического регулирования);
- дисперсия плотности потока нейтронов растет к периферии активной зоны, при этом ее форма существенно не меняется, а абсолютная величина сильно зависит от обратных связей, действующих в реакторе;
- дисперсия плотности потока нейтронов постепенно увеличивается с ростом коэффициента обратной связи;
- вид закона распределения плотности потока нейтронов в выбранной точке активной зоны существенно не меняется при изменении коэффициента обратной связи;
- вид автокорреляционной функции плотности потока нейтронов зависит от коэффициента обратной связи – убывание функции происходит тем быстрее, чем меньше значение коэффициента (рис.6).

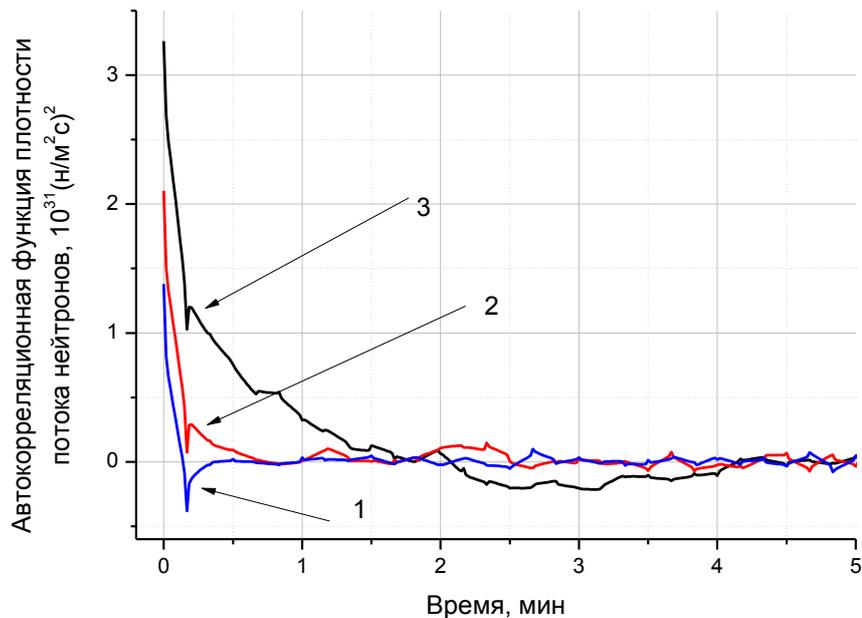


Рис. 6. Автокорреляционная функция плотности потока нейтронов в точке в зависимости от значения коэффициента обратной связи. 1 – $\alpha = -10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; 2 – $\alpha = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; 3 – $\alpha = 5 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Были проведены статистические исследования данных из архивов эксплуатационных параметров реакторов РБМК (Курская АЭС) и ВВЭР (Тяньваньская АЭС). Для реактора РБМК определены основные статистические характеристики поканальной мощности реактора, общей мощности реактора, токов датчиков.

Для поканальной мощности реактора были выявлены следующие закономерности:

- математическое ожидание мощности канала уменьшается к краю АЗ, также можно увидеть небольшое уменьшение в самом центре;
- дисперсия распределена намного более равномерно, она практически везде одинакова, за исключением нескольких локальных всплесков;
- распределение поканальной мощности реактора во времени нельзя считать нормальным: во всей активной зоне практически нет каналов с нормальным законом распределения мощности, в то время как суммарная мощность реактора имеет нормальный закон распределения;
- закон распределения поканальной мощности отличается в центре и по краям активной зоны, при этом он наиболее близок к нормальному в средней части активной зоны;
- автокорреляционная функция для точки из центра АЗ быстрее затухает, т.е. в центре точки менее коррелированы по времени, чем по краям.

Приведены результаты статистической обработки показаний 4 секций ДКЭВ, в целом все датчики показывают одинаковую тенденцию: меньшее математическое ожидание и большую дисперсию в крайних секциях (рис.7), что соответствует теоретическим исследованиям и исследованиям на модели.

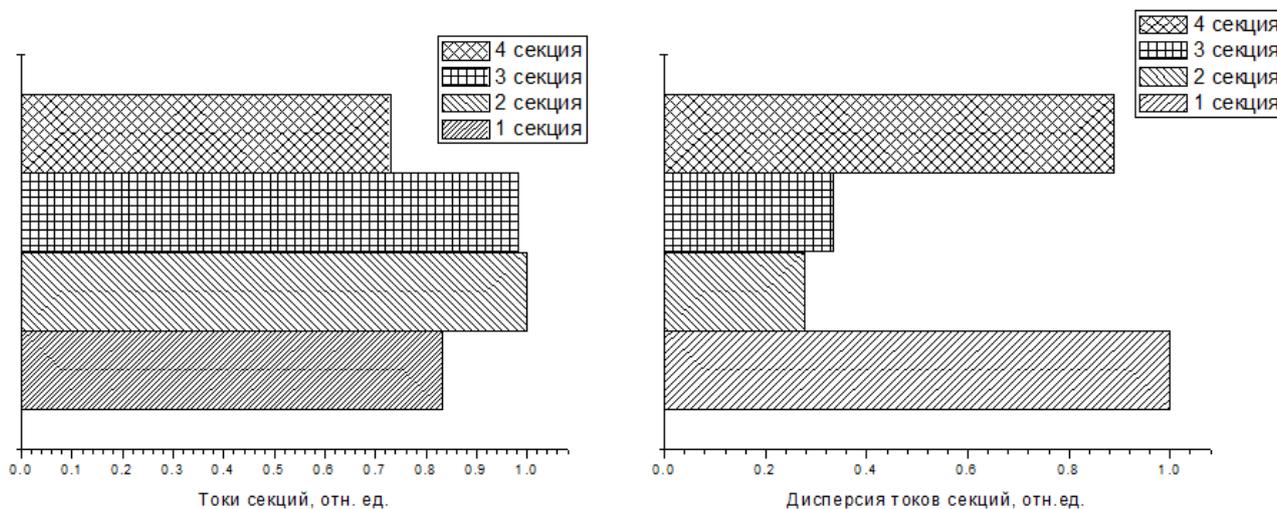


Рис. 7. Математическое ожидание и дисперсия токов датчика

В то время как математические ожидания токов секций для различных датчиков не сильно разнятся, их дисперсии могут различаться в разы и даже на порядки, при этом отклонения крайних секций больше центральных в 2-3 раза. Была сделана попытка определения причины того, почему дисперсии токов так различаются. В связи с этим были проведены исследования зависимости дисперсии датчика от его местоположения в активной зоне (т.е. от его окружения). В качестве окружения были взяты ближайшие 4 канала. Сильнее всего зависимость проявляется от энерговыработки окружения.

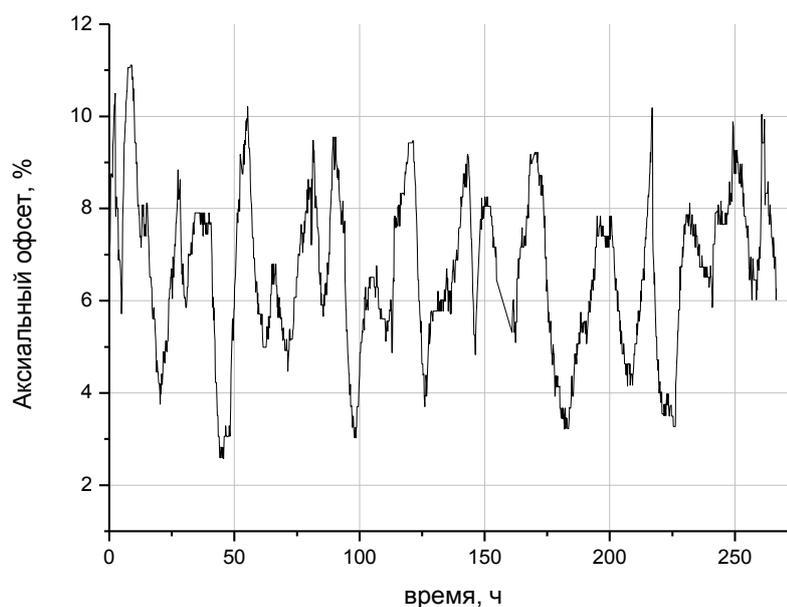


Рис. 8. Аксиальный офсет датчика;

Также был проведен анализ поведения сигнала датчика во времени, если посмотреть на показания токов датчика или его аксиальный офсет (рис.8), то видно, что в системе явно присутствуют колебания, при этом, когда ток 1 и 2 секций увеличивается, то токи 3 и 4 секций уменьшаются и наоборот, т.е. мы явно наблюдаем перекосы поля по высоте. Из анализа автокорреляционной функции (рис. 9) видно, что для всех секций присутствует явная колебательность и ее период соответствует периоду ксеноновых колебаний. При этом крайние секции быстрее затухают (т.е. показания крайних секций датчика менее коррелированы во времени). Если говорить о взаимной корреляции между датчиками, то для всех секций датчики сильно коррелированы с близлежащими датчиками (причем это сильнее проявляется для крайних секций). Для более отдаленных датчиков для разных секций коррелированность может быть различной (как отрицательная, так и положительная), при этом большую согласованность областей коррелирования можно наблюдать между 1 и 2 секциями и 3 и 4 секциями (т.е. в пределах половины высоты реактора), а также между центральными секциями, что соответствует функции взаимной корреляции между секциями одного датчика.

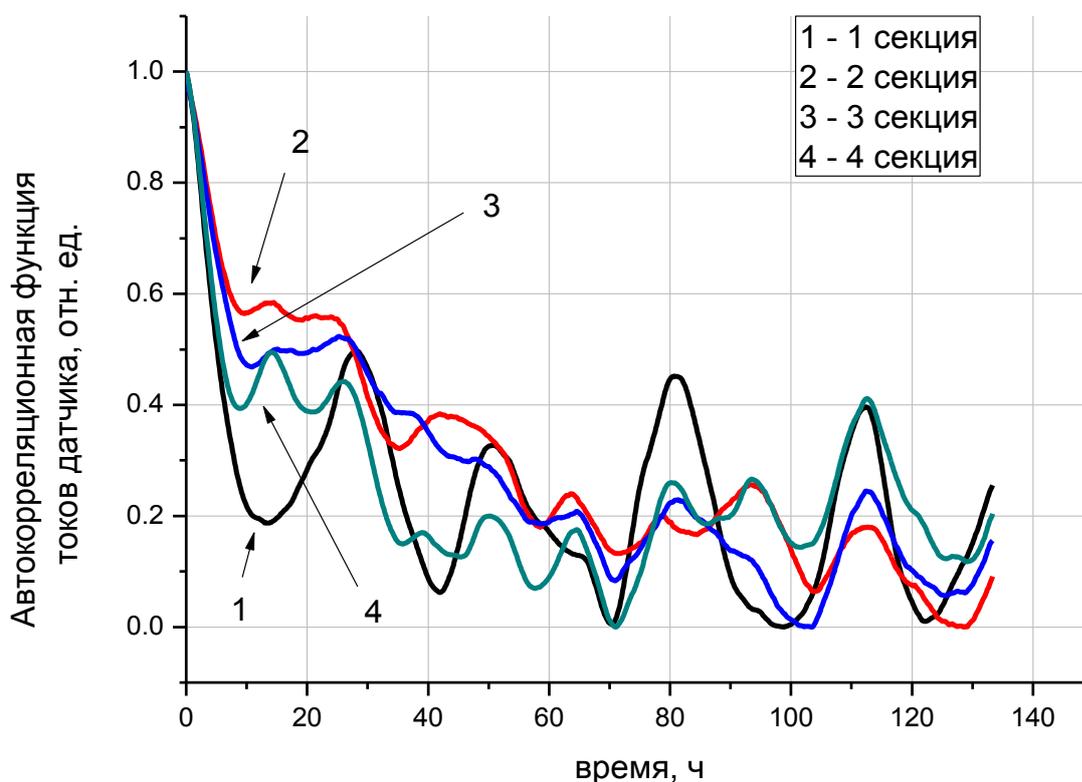


Рис. 9. Автокорреляционная функция токов датчика.

Для реактора ВВЭР приведены результаты статистической обработки показаний ДПЗ. Так же, как и для РБМК, тенденция в целом сохраняется: для математического ожидания меньшие значения в крайних секциях, при этом форма близка к синусоиде, а для дисперсии небольшое значение в центре и два характерных пика ближе к краю реактора. Если говорить о взаимной корреляции датчиков, находящихся в одном канале измерения, то было выявлено, что есть положительная корреляция между датчиками, находящимися в одной половине реактора, и отрицательная с датчиками, находящимися в другой половине. Также для всех, кроме центрального датчика законы распределения токов датчиков далеки от нормального, при этом чем дальше от центра, тем дальше от нормальности.

Сравнение результатов статистических исследований на модели реактора и реальных данных показало качественное совпадение. Например, одинаковая форма математического ожидания и дисперсии плотности потока нейтронов и токов датчиков, различие законов распределения в центре и по краям активной зоны, сходные зоны коррелированности.

Четвертая глава посвящена использованию статистических характеристик для определения порога ксеноновых колебаний и восстановления коэффициента обратной связи.

Приводятся результаты аналитического определения порога ксеноновых колебаний и сравниваются с численными значениями, полученными на модели. Так как результаты хорошо согласуются, то все дальнейшие исследования, для которых аналитическое решение получить нельзя, проводятся только на модели. Проводятся исследования зависимости порога начала ксеноновых колебаний от значения коэффициента обратной связи и уровня мощности. Исследование статистических характеристик плотности потока нейтронов показало, что при приближении реактора к порогу ксеноновых колебаний изменяется вид дисперсии плотности потока нейтронов, а именно, пики дисперсии увеличиваются и перемещаются ближе к краю реактора. Наблюдается зависимость роста дисперсии потока при ксеноновых колебаниях от величины отрицательного коэффициента обратной связи (рис. 10). Таким образом, принципиально существует возможность определения коэффициента обратной связи с использованием статистической информации о плотности потока нейтронов в режиме нормальной эксплуатации реактора на номинальном уровне мощности.

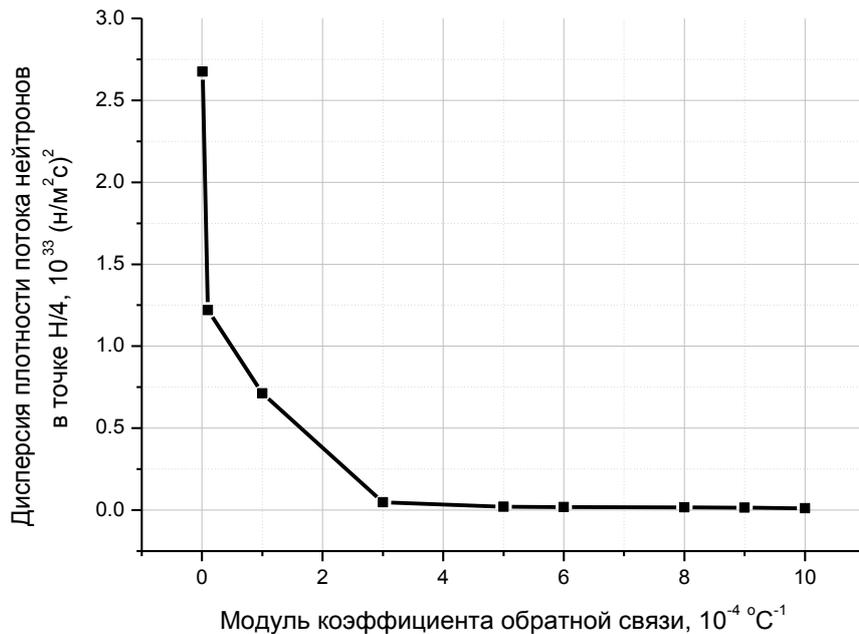


Рис. 10. Зависимость дисперсии от коэффициента обратной связи.

Были проведены исследования по определению зон, наиболее чувствительных к внесению шума; ими оказались центр и край реактора.

Также было изучено влияние на порог ксеноновых колебаний различных факторов. Было обнаружено, что неоднородный по пространству коэффициент обратной связи раздвигает границы неустойчивости реактора. В то же время можно подобрать неоднородную по пространству загрузку, которая существенно увеличит мощность, при которой начинаются ксеноновые колебания. Исследования показали, что расположение областей с измененными свойствами (меньшим коэффициентом размножения) в местах пиков дисперсии плотности потока нейтронов, рассчитанной при однородной загрузке реактора, дает существенное увеличение в мощности по сравнению с однородным случаем, при которой начинаются ксеноновые колебания.

Также приведены результаты исследований по возможности восстановления коэффициента обратной связи по шумам. Описан метод восстановления коэффициента обратной связи по автокорреляционной функции плотности потока нейтронов. Подробно рассматривается методика восстановления коэффициентов обратных связей на основе корреляционного подхода, приводятся основные формулы и результаты. Также приведены результаты по восстановлению коэффициента обратной связи с помощью методов, предложенных ранее другими исследователями. Показана принципиальная возможность восстановления коэффициентов обратных связей на основе статистической информации. Практическая же реализация предложенных методов требует доработки в плане повышения точности

В заключении приведены все основные полученные результаты.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель для определения статистических характеристик поля нейтронов в ядерном энергетическом реакторе. Модель включает уравнение для плотности потока нейтронов со случайными параметрами, уравнения обратных связей, уравнения системы регулирования, генераторы шумов с заданными свойствами.

2. Разработан программный комплекс, реализующий математическую модель и позволяющий проводить статистические исследования в широком диапазоне изменения параметров модели, вплоть до изменения ее структуры.

3. Проведены численные исследования модельных статистических характеристик поля нейтронов в реакторе. Показано что вид и параметры основных статистических характеристик: математического ожидания, дисперсии, закона распределения, корреляционных и спектральных плотностей определяется совокупностью значений шума, параметров реактора и свойствами системы регулирования. Наличие или отсутствие какой-либо обратной связи, а также отсутствие или наличие интегральной автоматической системы регулирования (АР) и локальной автоматической системы регулирования (ЛАР) существенно влияют на вид статистических характеристик. Помимо изменения значений дисперсий существенно меняются законы распределения плотности потока нейтронов в фиксированной точке реактора.

4. Проведена статистическая обработка реальных данных с энергоблоков реакторов типа РБМК и ВВЭР и сопоставление с результатами модельных исследований. Анализ показал хорошее качественное согласие модели и эксперимента при описании формы математического ожидания и дисперсии плотности потока нейтронов, дисперсии токов датчиков, законов распределения в центре и по краям активной зоны, сходство зон коррелированности, хорошее качественное совпадение автокорреляционных функций диагностирующих наличие высотных ксеноновых колебаний.

5. Показано, что при приближении реактора к порогу ксеноновых колебаний увеличивается дисперсия плотности потока нейтронов, а величина дисперсии зависит от коэффициента обратной связи. Это означает принципиальную возможность определения в пассивном эксперименте коэффициента обратной связи по дисперсии плотности потока нейтронов.

6. На основе анализа пространственного распределения дисперсии плотности потока нейтронов, предложена компоновка топлива профилированного по высоте, обеспечивающая устойчивость по отношению к возникновению ксеноновых колебаний при практически реализуемых уровнях плотности потока нейтронов.

7. Результаты исследования зависимости коэффициента обратной связи от статистических характеристик показали согласие с результатами, изложенными в работах Тая, Пора и Демазире, посвященных экспериментальному определению коэффициентов реактивности по реакторным шумам.

8. Предложен способ определения коэффициента обратной связи по скорости спада автокорреляционной функции плотности потока нейтронов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК

1. Загребаев А. М., Насонова В. А., Овсянникова Н. В. Статистические исследования плотности потока нейтронов в ядерном реакторе при случайных возмущениях свойств среды. Атомная энергия, № 2, Том 111, Август 2011, С. 88-92

2. Загребаев А.М., Насонова В.А. Исследования статистических характеристик плотности потока нейтронов при случайных возмущениях в свойствах среды. Естественные и технические науки №6. 2010. стр. 562-564

3. Загребаев А.М., Насонова В.А. Вероятностные характеристики плотности потока нейтронов в ядерном реакторе при случайных возмущениях в свойствах среды. Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, №4 2009. С.71-78.

4. Загребаев А.М., Насонова В.А. Определение порога возбуждения ксеноновых колебаний при неоднородной загрузке реактора. Естественные и технические науки №6. 2010. стр. 565 - 566

5. Загребаев А.М., Насонова В.А. Программный комплекс моделирования поля нейтронов в ядерном реакторе при случайных возмущениях в технологических параметрах "Информационно-измерительные и управляющие системы", №6, т.9, 2011, с. 59-65

6. А.М.Загребаев, В.А. Насонова "О пороге ксеноновых колебаний при неоднородной по высоте загрузке реактора". Известия вузов. Ядерная Энергетика. 2011, №4., 5-12.

Тезисы выступления на конференциях

1. Загребаев А.М., Насонова В.А. Разработка математической модели реактора для проведения статистических исследований. Научная сессия МИФИ-2005. Сборник научных трудов. Т. 8. Нетрадиционная энергетика. Ядерная энергетика. М.: МИФИ, 2005. С. 190-191.

2. Загребаев А.М., Насонова В.А. Сравнительная эффективность сеточного метода и метода галеркина при проведении статистических исследований. Научная

- сессия МИФИ-2005. Сборник научных трудов. Т. 8. Нетрадиционная энергетика. Ядерная энергетика. М.: МИФИ, 2005. С. 192 - 193.
3. Загребаев А.М., Насонова В.А. О влиянии коэффициентов реактивности на дисперсию плотности потока нейтронов при возникновении ксеноновых колебаний. Научная сессия МИФИ-2006. Сборник научных трудов. Т. 8. Физико-технические проблемы нетрадиционной энергетике и мощная импульсная электрофизика. Физико-технические проблемы ядерной энергетике. М.: МИФИ, 2006. С. 82 - 83.
 4. Загребаев А.М., Насонова В.А. Статистические исследования аксиального поля нейтронов в реакторе РБМК по суточному архиву данных. Научная сессия МИФИ - 2007. Сборник научных трудов. - 2007. - Т.8.117-119
 5. Загребаев А.М., Насонова В.А. Учебно-исследовательский программный модуль «динамика ядерного реактора». Научная сессия МИФИ - 2008. Сборник научных трудов. Т.1. Физико-технические проблемы ядерной энергетике. С. 90 - 92
 6. Загребаев А.М., Насонова В.А. О пороге ксеноновых колебаний при пространственно–распределенной обратной связи. Научная сессия МИФИ - 2008. Сборник научных трудов. Т.1. Физико-технические проблемы ядерной энергетике. С. 92 – 94
 7. А.М. Загребаев, В.А. Насонова Исследование влияния аксиального профилирования топливной загрузки на пороговое значение плотности потока нейтронов для возникновения ксеноновых колебаний. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, аннотации докладов, том 1, ядерная энергетика, с.41.
 8. Загребаев А.М., Насонова В.А., Овсянникова Н.В.. Развитие статистического подхода к ядерному реактору как объекту контроля и управления. Materialy VIII mezinarodni vedecko – prakticka conference «Dny vedy – 2012» Dil 82. Matematika: Praha. Publishing House « Education and Science» s.r.o - 96 str.
 9. А.М. Загребаев, В.А.Насонова. Влияние аксиального профилирования топливной загрузки на порог ксеноновых колебаний. Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации Тезисы докладов XX международного научно-технического семинара. Г. Алушта, 18-24 сентября 2011г., с. 104-105.
 10. А.М. Загребаев, В.А. Насонова Определение порога ксеноновых колебаний при неоднородной загрузке реактора. ТРУДЫ XVII международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», Алушта, Сентябрь 2009г. С.239.
 11. А.М. Загребаев, В.А. Насонова Ядерный реактор как стохастический объект контроля и управления. ТРУДЫ XVII международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», Алушта, Сентябрь 2008г.

12. А.М. Загребаев, В.А. Насонова Использование статистических характеристик плотности потока нейтронов для определения параметров ксеноновых колебаний. ТРУДЫ XVI международного научно-технического семинара. «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» Сентябрь 2007г. Алушта. С.54-55.

Монография

А.М. Загребаев, В.А. Насонова, Н.В. Овсянникова Математическое моделирование ядерного реактора при случайных возмущениях технологических параметров: Монография. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011.-180с.

Препринт

Математическое моделирование и исследование статистических характеристик плотности потока нейтронов в ядерном реакторе при случайных возмущениях. Препринт – Препринт МИФИ 002-2008 / А.М.Загребаев, В.А. Насонова ; МИФИ.- Москва, 2008. -40с.

Учебное пособие

Загребаев А.М., Крицына Н.А., Кулябичев Ю.П., Насонова В.А., Овсянникова Н.В. Методы обработки статистической информации в задачах контроля ядерных энергетических установок. Учебное пособие - Москва: МИФИ, 2008.- 388 с.