

На правах рукописи

Сидоров Михаил Юрьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК
РБМК-1000 В ПОДКРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ**

Специальность 05.14.03. – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2003

Работа выполнена на кафедре атомных и тепловых энергетических установок
ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет»

Научный руководитель - доктор технических наук,
Лебедев Валерий Иванович

Консультант - доктор технических наук,
Василенко Вячеслав Андреевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
Симановский Валентин Михайлович

кандидат физ.-мат. наук, доцент,
Ельшин Александр Всеволодович

Ведущая организация – ФГУП «Санкт-Петербургский научно-
исследовательский и проектно-
конструкторский институт
«Атомэнергопроект»»

Защита состоится 7 октября 2003 года в 18 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный политехнический университет» по адресу: 195251,
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, в аудитории 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ
СПбГПУ.

Автореферат разослан «___» _____ 2003 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

К.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Характерной особенностью канальных реакторов РБМК-1000 является то, что в активной зоне заключено несколько десятков областей, в которых при определенных условиях может образоваться локальная критичность. Это требует обеспечение надежного контроля нейтронного потока в любом состоянии реакторной установки (РУ).

Опыт эксплуатации РУ РБМК-1000 показал, что на заглушенном, остановленном реакторе, когда плотность нейтронного потока составляет от 10^{-7} до 10^{-3} % $N_{\text{ном}}$, штатные средства контроля нейтронной мощности не обладают достаточной степенью чувствительности. Останов реактора, нахождение его в подкритическом состоянии и вывод в критическое состояние связаны с прохождением диапазона мощности, требующего более совершенных аппаратных средств контроля заглушенного состояния активной зоны, чем ныне существующие.

В этой связи, возникает необходимость повышения ядерной безопасности реактора РБМК-1000 в подкритических (остановочных, стояночных и пусковых) режимах работы.

Система контроля подкритичности, способная фиксировать изменения уровня мощности реактора в подкритическом состоянии и при выходе в критическое состояние, должна стать надежным инструментом контроля и управления нейтронно-физическими процессами в активной зоне.

Цели работы. Цель исследований в данной диссертации – исследование режимов работы РУ РБМК-1000 в подкритическом состоянии с помощью системы внутриреакторного контроля подкритичности реактора (СВРК ПР) и повышение уровня ядерной безопасности реактора РБМК-1000. Для этого поставлены следующие задачи диссертационного исследования:

1. Изучение конструкции активной зоны реактора РБМК-1000. Обобщение результатов измерений подкритичности различными методами и системами.
2. Экспериментальное исследование изменения степени подкритичности реактора в зависимости от режимов работы РУ и состава активной зоны.
3. Анализ полученных экспериментальных нейтронно-физических характеристик активной зоны РБМК-1000 с помощью расчетных программ.
4. Разработка дополнений к методике определения подкритичности реактора РБМК-1000.

Научная новизна. По мнению автора, к новым результатам относятся полученные экспериментальным путем значения эффективности стержней СКУЗ, ТВС, столбов воды в ТК и РК СУЗ подкритического реактора РБМК-1000.

Научно-обоснованная методика определения подкритичности, разработанная автором, может быть использована при проектировании и эксплуатации систем контроля подкритичности на АЭС с канальными реакторами.

Методика выполнения работы, достоверность и обоснованность результатов.

В данной работе используются методы экспериментального и теоретического исследования. Полученные расчетные величины и экспериментальные данные подтверждены протоколами измерений нейтронно-физических характеристик РУ РБМК-1000 Ленинградской и Курской атомных станций. Разработанные в диссертации модели процессов в активной зоне подкритического реактора основаны на сравнении с расчетами и экспериментами, полученными в работах предыдущих авторов. Также при получении расчетных величин в работе использовались программные средства, аттестованные для физических расчетов активных зон реакторов РБМК-1000.

Практическая ценность работы. Практическая ценность полученных автором результатов состоит в возможности проводить более глубокое изучение состояния активной зоны реакторов РБМК-1000.

Полученные данные позволяют дополнительно контролировать правильность планирования перегрузок в течение кампании. Кроме того, появляется возможность вносить более точные поправки в показания датчиков системы физического контроля распределения энерговыделения.

Результаты непрерывного контроля изменения плотности нейтронного потока на остановленном реакторе позволяют определить новые подходы к определению перечня ядерно-опасных работ.

Анализ результатов, полученных с помощью СВРК ПР, естественным образом обуславливает начало разработки и создания комплексной системы управления и защиты подкритического реактора.

На основании результатов измерения в процессе опорожнения КО СУЗ были внесены изменения в «Инструкцию по опорожнению каналов СУЗ и аварийного бака СУЗ реактора РБМК-1000 первой очереди ЛАЭС» инв.№Р-644 арх. ПТО Ленинградской АЭС.

Результаты исследования намечено использовать для внесения дополнений в «Комплексную методику определения физических и динамических характеристик РБМК-1000» РДЭО-0137-98.

Автор выносит на защиту:

1. Рекомендации по определению количества подвесок ионизационных камер (ПИК), необходимого для полномасштабного контроля активной

зоны подкритического реактора РБМК-1000, места их установки и их эффективный радиус чувствительности.

2. Расчетные и экспериментальные величины вклада в нейтронный поток подкритического реактора элементов активной зоны.

3. Заключение о методе определения подкритичности реакторов РБМК-1000 с помощью аппаратуры СВРК ПР.

4. Методику определения подкритичности реактора РБМК-1000.

5. Способы повышения КИУМ энергоблоков РБМК-1000 с помощью использования СВРК ПР.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены на заседании научно-технического совета Ленинградской АЭС и получили положительную оценку экспертов.

Также основные результаты исследований апробированы на научных конференциях:

1. Межвузовская научная конференция «XXVIII неделя науки СПбГТУ», доклад «Вопросы повышения маневренности и безопасности реактора РБМК-1000» Санкт-Петербургский государственный технический университет, 10 ноября 2000 г.

2. Международная научная конференция «Полярное сияние – 2002. Ядерное будущее: безопасность, экономика и право», доклад «Проверка аппаратуры контроля нейтронного потока реактора РБМК-1000, при пусковых режимах работы ЯЭУ и выходе на МКУ», Санкт-Петербург, Государственный региональный образовательный центр, 2 февраля 2002 г.

3. Международная научная конференция «Полярное сияние – 2003. Ядерное будущее: безопасность, экономика и право», доклад «Некоторые результаты испытаний системы внутрореакторного контроля подкритичности реактора на первом и втором энергоблоках Ленинградской АЭС», Санкт-Петербург, Государственный региональный образовательный центр, 31 января 2003 г.

Публикации результатов работы. Основные результаты работы отражены в пяти публикациях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. В конце приведены библиографический список из 52 источников, приложения, в которых представлены элементы конструкции реактора, графики изменения подкритичности, процессы вывода в критическое состояние и уравнения математических моделей подкритичной активной зоны. Диссертация выполнена на 188 стр., из них 132 – текстовая часть, 5 - библиографический список, 51 - приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении выполнен обзор работ, посвященных опыту эксплуатации РУ РБМК-1000, который позволил выявить режимы эксплуатации реактора в подкритическом состоянии, для которых требуется непрерывный контроль плотности нейтронного потока по объему активной зоны. В процессе эксплуатации и ремонта остановленного реактора необходим контроль степени подкритичности, которая для проведения ядерно-опасных работ должна составлять не менее 2% ($k_{эфф} < 0,98$). В соответствии с «Комплексной методикой определения физических и динамических характеристик реакторов РБМК-1000», для определения подкритичности реактора используется метод «сброса» стержней СКУЗ из критического состояния, который позволяет контролировать мгновенное значение подкритичности, и не отслеживает его изменение во времени.

В настоящее время актуальной становится задача оснащения всех РБМК-1000 системами непрерывного контроля величины подкритичности реактора в любом состоянии активной зоны и разработка рекомендаций по их использованию.

На основании обзора литературных источников сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

Первая глава посвящена особенностям конструкции активной зоны РБМК-1000, анализу нейтронно-физических процессов, протекающих в подкритическом реакторе и оценке возможностей системы внутриреакторного контроля подкритичности реактора (СВРК ПР).

Активная зона энергоблоков №1 и №2 с РБМК-1000 Ленинградской АЭС представляет собой цилиндр (диаметр 11,8 м, высота 7 м), в котором размещены: 2488 графитовые колонны, 1693 технологических канала (ТК) с тепловыделяющими сборками (ТВС) или дополнительными поглотителями, 189 рабочих каналов системы управления и защиты (РК СУЗ) с поглощающими стержнями, 4 канала камеры деления и 156 каналов охлаждения отражателя. Теплоносителем контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) является вода, которая подается в ТК, где при температуре ~ 273 °С происходит образование пароводяной смеси. В РК СУЗ также подается вода, с температурой не более 85 °С. Через графитовую кладку продувается смесь гелия с азотом.

Регулирование плотности нейтронного потока реактора осуществляется за счет перемещения стержней системы контроля, управления и защиты (СКУЗ).

Любое изменение состава активной зоны (извлечение стержня, перегрузка ТВС и т.д.) приводит к возмущению плотности нейтронного потока, который стабилизируется в зависимости от размножающих свойств реактора. Конструктивной особенностью РБМК-1000 является

большое количество квазиавтономных критических масс, которые обладают различными размножающими свойствами. Каждая такая критическая масса создает свой подкритический нейтронный поток. Установившийся нейтронный поток при подкритичности $\delta k_{эфф} = k_{эфф} - 1$, ($k_{эфф} < 1$) при наличии источника нейтронов:

$$\Phi_{уст} = \Phi_{ист} \cdot \frac{1}{1 - k_{эфф}} = \Phi_{ист} \cdot M, \quad (1)$$

где $\Phi_{ист}$ – нейтронный поток от источника нейтронов нейтрон/см²·с;
 $M = 1/(1 - k_{эфф})$ – коэффициент умножения подкритической активной зоны.

Зависимость, определяющая скорость изменения плотности потока нейтронов при линейном изменении степени подкритичности:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_{уст}}{[1 - k_{эфф}(t)]^2} \frac{dk_{эфф}}{dt}, \quad (2)$$

где $n_{ист}$ – поток нейтронов, создаваемый источником нейтрон/см³;
 $k_{эфф}$ – коэффициент размножения.

По мере приближения к критическому состоянию скорость нарастания плотности потока нейтронов быстро увеличивается, хотя скорость уменьшения степени подкритичности остается постоянной. Это важная особенность кинетики размножения нейтронов, которую необходимо учитывать для обеспечения ядерной безопасности при пуске реактора РБМК-1000.

Для контроля изменения плотности потока нейтронов подкритического реактора РБМК-1000 разработана система внутрореакторного контроля подкритичности (СВРК ПР), которая обеспечивает контроль плотности нейтронного потока в подкритическом состоянии и при выводе реактора на минимальный физический уровень мощности (МФУ). СВРК ПР производит вычисление степени подкритичности реактора и текущего значения реактивности, а также фиксирует относительное изменение скорости счета.

СВРК ПР предназначена для выдачи информации о текущем значении плотности потока тепловых нейтронов в относительных единицах, выдачи текущего значения реактивности, вычисления степени подкритичности, усреднения значения подкритичности по каналам, с учетом геометрии и состава активной зоны.

В состав СВРК ПР входят:

- датчики ПИК-бмт, устанавливаемые в центральные отверстия ТВС (сб.49) и имеющие пять чувствительных элементов, равномерно распределенных по высоте активной зоны;
- стойка с аппаратурой, служащая для обработки сигналов датчиков;

- 2 компьютера, предназначенные для отображения информации о значении реактивности и скорости счета в реальном времени.

Текущее значение подкритичности реактора (ρ) в процессе изменения состава активной зоны (например, извлечения стержней ручного регулирования (РР)) определяется по модели обращенного решения уравнений точечной кинетики реактора с источником при использовании измеренного значения $\Phi(t)$:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{O}(t)}{dt} &= (\rho - \beta_{\text{эфф}}) \cdot \hat{O}(t) / \Lambda + \sum_i \lambda_i \cdot C_i(t) + Q_{\text{эфф}}(t), \\ \frac{dC_i(t)}{dt} &= \beta_i \cdot \Phi(t) / \Lambda + \lambda_i \cdot C_i(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Phi(t)$ – плотность нейтронного потока, нейтр/см²·с; $Q_{\text{эфф}}$ – мощность источника нейтронов, нейтр/см²·с; $\Lambda = \tau_m / k$ – время генерации нейтронов в реакторе, с; ρ – реактивность (подкритичность); β_i – доля запаздывающих нейтронов i -ой группы; λ_i – постоянная распада, 1/с; C_i – концентрация ядер-излучателей 1/м³.

Вторая глава посвящена анализу результатов испытаний СВРК ПР на энергоблоках Ленинградской АЭС.

На энергоблоках №1 и №2 Ленинградской АЭС, находящихся в расхоложенном и разотравленном состоянии, с помощью СВРК ПР были проведены измерения плотности нейтронного потока и возмущения реактивности при извлечении-установке стержней СКУЗ, перегрузке ТВС, опорожнении-заполнении ТК, опорожнении-заполнении РК СУЗ, опорожнении-заполнении контура охлаждения СУЗ, извлечении-установке ТК, извлечении-установке РК СУЗ, установке в реактор различного оборудования, выводе реактора в критическое состояние, определении подкритичности реактора, определении эффективности отдельных стержней РР, определении эффективности групп стержней РР, определении эффективности стержней БАЗ и УСП. Также измерено распределение плотности нейтронного потока по высоте подкритического РБМК-1000 в топливе и в замедлителе.

Анализ результатов измерений показал, что при извлечении (погружении) стержней СКУЗ в подкритическом реакторе нейтронный поток имеет локальный всплеск. Его величина зависит от места расположения датчика, типа стержня, состава и загрузки активной зоны.

На основании измерений полного двойного хода стержней СКУЗ на энергоблоке №1 Ленинградской АЭС были выявлены районы, в которых отклик СВРК ПР на возмущение нейтронного потока отличаются от среднего значения по всему реактору. Это связано с неравномерностью топливной загрузки. Также отмечено, что СВРК ПР регистрирует

возмущение реактивности, связанное с незначительным изменением положения стержня СКУЗ (рис. 1).

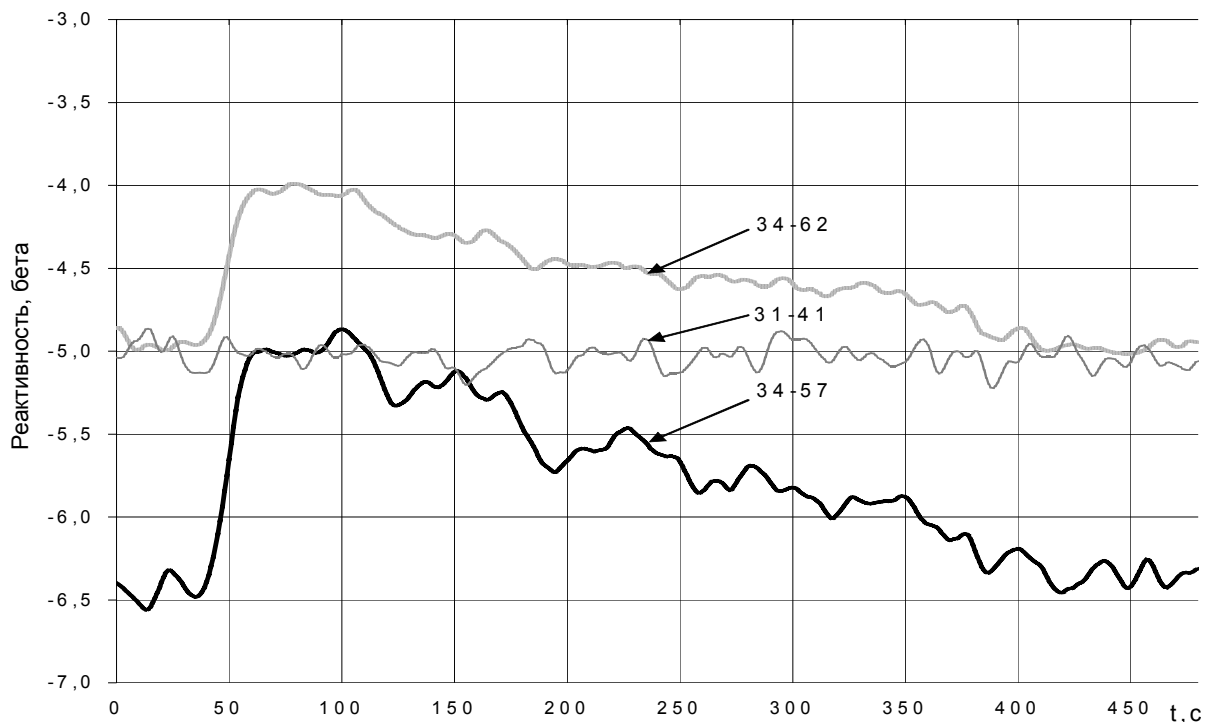


Рис. 1. Извлечение ст. РР 32-61 и погружение с шагом 1 м

На Ленинградской АЭС были впервые измерены эффекты реактивности при опорожнении и заполнении контура охлаждения СУЗ подкритического реактора без вывода реактора в критическое состояние. При опорожнении наблюдался незначительный отрицательный эффект реактивности $-0,39 \beta_{эфф}$. За счет плавного опорожнения КО СУЗ было отмечено, что при сливе воды из облучательных каналов значение подкритичности по датчику 26-56 изменялось немонотонно (рис. 2). Результаты подтвердились при заполнении КО СУЗ. На основании этого был сделан вывод о различных знаках одного и того же эффекта в разных частях активной зоны. При выводе реактора в критическое состояние осуществлялся контроль изменения степени подкритичности реактора (рис. 3). В состоянии глубокой подкритичности отклик СВРК ПР на изменение степени подкритичности регистрировался ближайшими датчиками. При 35...40 извлеченных стержнях СКУЗ возмущение нейтронного потока от каждого последующего извлекаемого стержня фиксировалось всеми датчиками СВРК ПР. На основании этого был сделан вывод о полном перекрытии всех квазиавтономных активных зон реактора РБМК-1000. Таким образом, с помощью СВРК ПР при подкритичности $\sim 0,3\%$ ($k_{эфф} > 0,997$) появляется возможность отслеживать изменение плотности нейтронного потока и периодов для всего реактора при изменении положения стержня СКУЗ. Это существенно упрощает контроль за процедурой вывода реактора в критическое состояние и повышает ядерную безопасность.

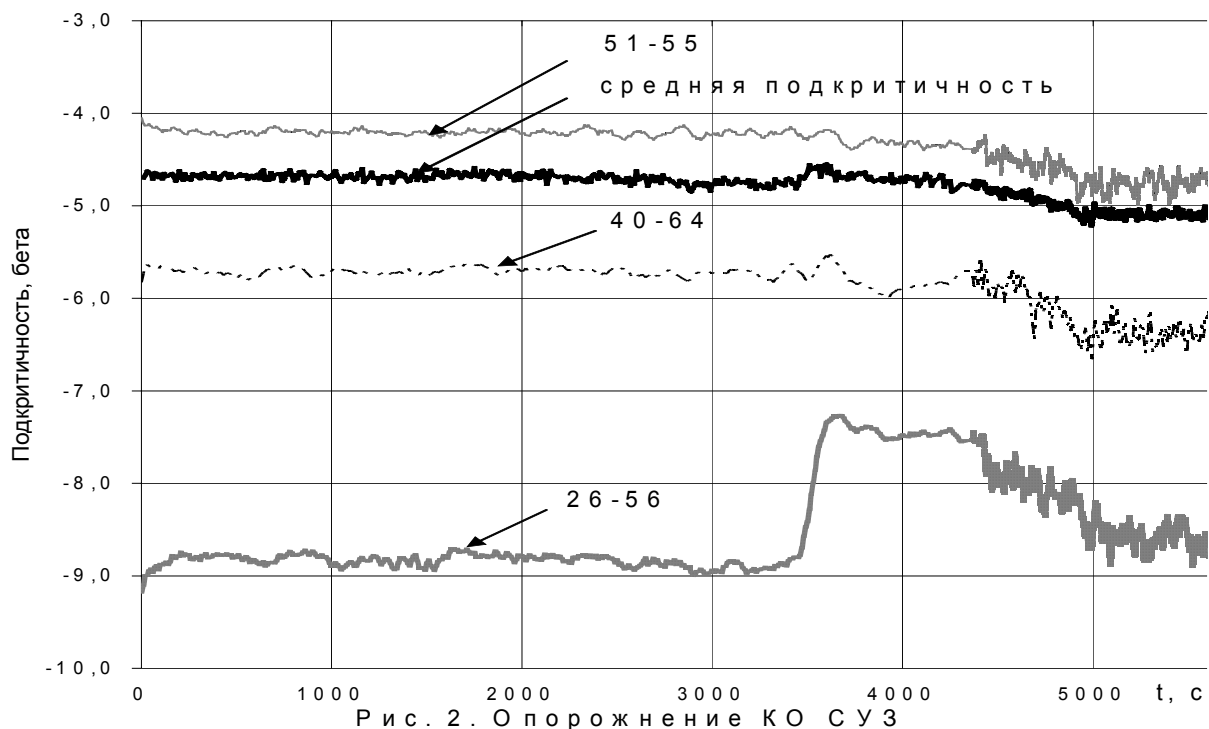


Рис. 2. Опорожнение КОСУЗ

Традиционно определение распределения плотности нейтронного потока по высоте активной зоны РБМК-1000 осуществлялось методом активации медных проволочек, устанавливаемых в центральные отверстия ТВС на МФУ. Этот метод неудобен и неоперативен. При непосредственном участии автора, с помощью СВРК ПР были измерены высотные распределения плотности потока нейтронов подкритического реактора №2 РБМК-1000 Ленинградской АЭС (рис. 4). Расхождения полученных экспериментальных данных связаны с тем, что активационный метод используется только в критическом состоянии РУ и не учитывает изменение профиля нейтронного поля по высоте при выводе реактора в критическое состояние реактора. Расчеты показали, что оптимальным местом расположения датчика с одной ионизационной камерой по высоте является точка, отстоящая на 2,5 м от верха активной зоны. Относительное изменение плотности нейтронного потока в этой точке (при изменении подкритичности) прямопропорционально интегральному изменению плотности потока по всей высоте активной зоны. Полученные значения поправок на распределения плотности потока по высоте предложено внести в расчетные модели определения подкритичности реактора.

По результатам расчетов по программе «Тройка» и испытаний автором было определено минимальное количество датчиков для полномасштабного контроля подкритичности с помощью СВРК ПР: 18 датчиков ПИК-6мт или 24 датчика ПИК-5мт, имеющих одну чувствительную секцию.

Автором рекомендованы места установки датчиков нейтронного потока. Эти места должны быть максимально приближены к стержням БАЗ. Это связано с тем, что на плотность потока нейтронов вокруг БАЗ

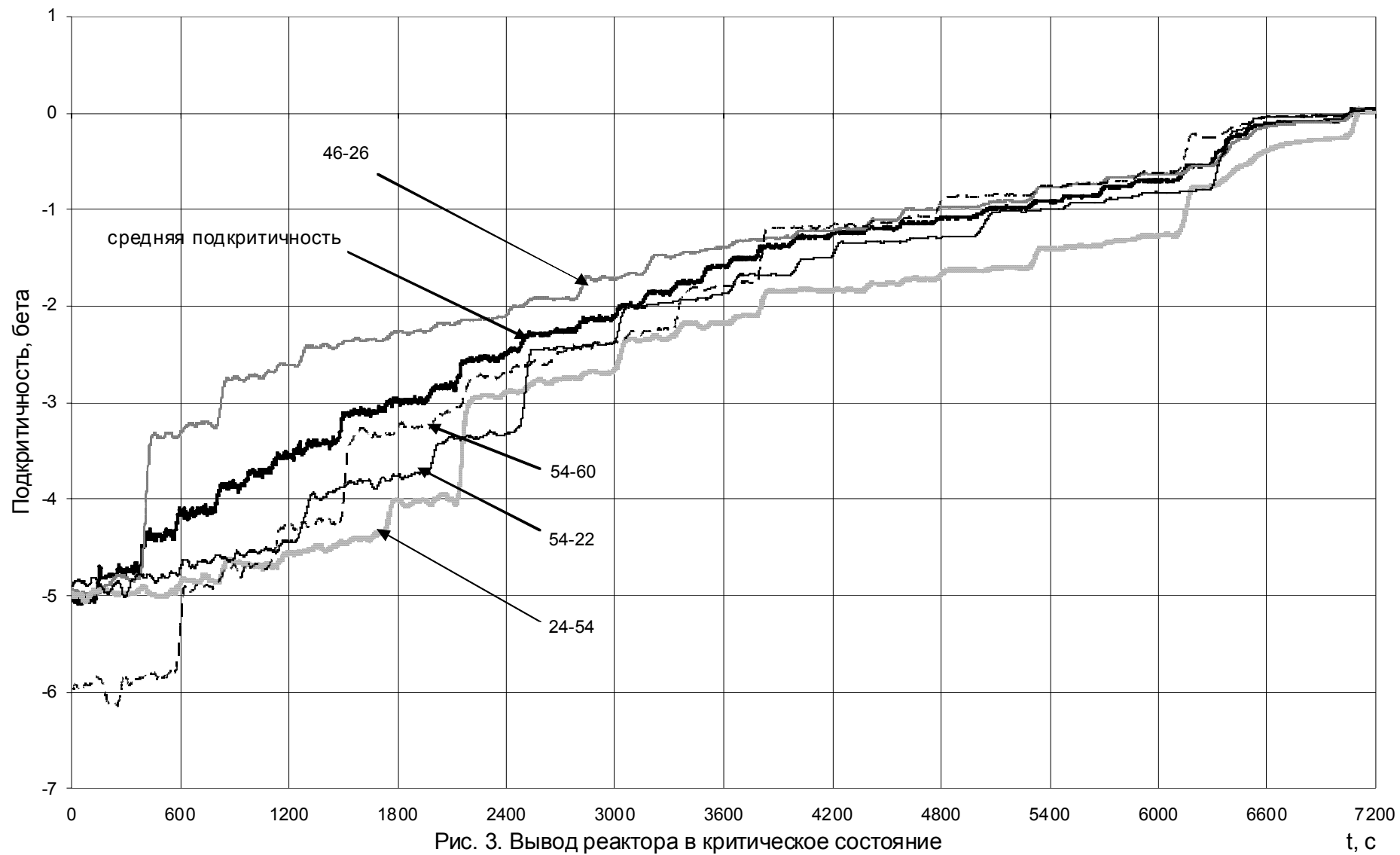
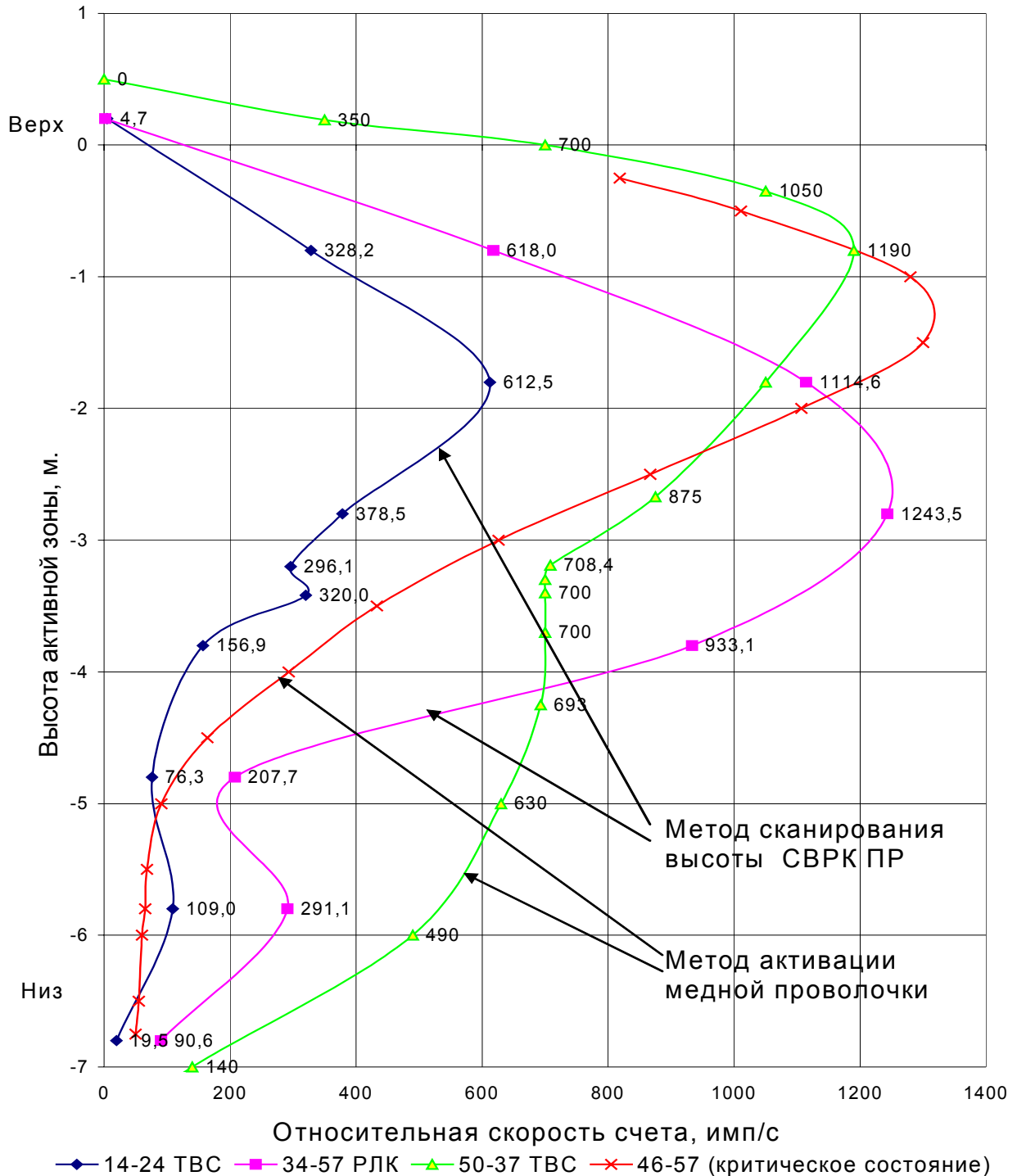


Рис. 4. Относительное распределение плотности нейтронного потока по высоте на энергоблоке №2.



оказывают минимальное влияние погруженные стержни СКУЗ. Сами стержни БАЗ, расположенные в крайнем верхнем положении, не оказывают влияния на плотность нейтронного потока.

Третья глава посвящена разработке и обоснованию применения методики определения подкритичности реактора РБМК-1000.

Методика основана на результате решения уравнения точечной кинетики для случая критической стационарной системы. Ее сущность состоит в перемещении стержней РР (источников возмущения), которое осуществляют последовательно в предварительно выбранных квазиавтономных областях разбиения активной зоны. Отклик нейтронного поля в каждой из таких областей описывается физически адекватной функцией, параметры которой определяют из условий аппроксимации ею зависимости экспериментально полученных значений относительного изменения сигналов датчиков от расстояния до источника возмущения. По значениям параметров функции-отклика и соотношениям, связывающим их с материальным параметром реакторной среды и коэффициентом размножения нейтронов, для каждой из областей разбиения находят значение локальной подкритичности. Оценку значения подкритичности реактора в целом осуществляют по области с минимальным значением локальной подкритичности.

Для экспериментального определения локального изменения реактивности, можно использовать функцию влияния стержня СКУЗ (j-поглотителя):

$$\bar{\varphi}_j(r) = \frac{\bar{\Phi}_{j0}(r) - \bar{\Phi}_j(r)}{\bar{\Phi}_{j0}(r)} = 1 - \frac{\bar{\Phi}_j(r)}{\bar{\Phi}_{j0}(r)}, \quad (4)$$

где $\bar{\Phi}_{j0}(r)$, $\bar{\Phi}_j(r)$ - усреднённые по H_3 значения плотностей нейтронного потока $\Phi_0(r)$, $\Phi(r)$, j-стержня в крайнем верхнем и крайнем нижнем положениях;

$H_3 = H_{аз} + 2\Delta_H \approx 810$ см – эффективная высота активной зоны РБМК-1000.

После перемещения j-поглотителя от крайнего верхнего до крайнего нижнего положения изменение профиля нейтронного поля от $\bar{\Phi}_{j0}(r)$ до $\bar{\Phi}_j(r)$ происходит не мгновенно, а после завершения переходного процесса, определяемого кинетикой распада «избыточных» ядер-излучателей запаздывающих нейтронов. Это отражается нестационарным уравнением диффузии:

$$-\frac{\partial \bar{O}(r,t)}{vD_j \partial t} = \nabla_r^2 \bar{O}_j(r,t) - \bar{\gamma}_{rj}^2 \bar{O}_j(r,t) + \bar{Q}_j / D_j, \quad (5)$$

где $v \approx 2,5 \cdot 10^5$ см/с - средняя скорость тепловых нейтронов. Предполагается, что исходное (невозмущённое) состояние активной зоны соответствует околоскритическому с $\Delta k_{эф} \approx 0,00005$. Решение этого уравнения:

$$\bar{\varphi}_j(r, t) \approx \bar{\varphi}_j(r, \infty) \left[1 - \frac{\Delta k_{jycm1}}{\beta_{y\dot{o}o} + \Delta k_{jycm1}} \exp(-\omega_1 t) - \frac{\beta_{y\dot{o}o}}{\beta_{y\dot{o}o} + \Delta k_{jycm1}} \exp(-\omega_2 t) \right]$$

$$\delta \bar{\varphi}_j(t) \approx \delta \bar{O}_j(\infty) \left[1 - \frac{\Delta k_{jycm2}}{\beta_{y\dot{o}o} + \Delta k_{jycm2}} \exp(-\omega_3 t) - \frac{\beta_{y\dot{o}o}}{\beta_{y\dot{o}o} + \Delta k_{jycm2}} \exp(-\omega_4 t) \right],$$

где $\bar{\varphi}_j(r, \infty) = \delta k_j^a(r) / \Delta k_{jycm1} = k_0(\bar{\gamma}_{rj} r) / k_0(\bar{\gamma}_{rj} r_i)$; $\delta \bar{O}_j(\infty) = \delta k_j / \Delta k_{jycm2}$;

$$\omega_1 = \frac{\beta_{y\dot{o}o} + \Delta k_{jycm1}}{\lambda}; \quad \omega_2 = \frac{\lambda \Delta k_{jycm1}}{\beta_{y\dot{o}o} + \Delta k_{jycm1}}; \quad \omega_3 = \frac{\beta_{y\dot{o}o} + \Delta k_{jycm2}}{\lambda}; \quad \omega_4 = \frac{\lambda \Delta k_{jycm2}}{\beta_{y\dot{o}o} + \Delta k_{jycm2}}.$$

$\Delta k_{jycm1} = \Delta k_{\dot{e}o} + \delta k_j^a(r)$; $\Delta k_{jycm2} = \Delta k_{\dot{e}o} + \delta k_j$ - локальное и усреднённое по объёму активной зоны значение подкритичности после перемещения j-поглопителя, обладающего дифференциальной эффективностью $\delta k_j^o(r)$ и интегральной δk_j .

Последовательность применения методики определения подкритичности реактора РБМК-1000 сводится к нижеследующему. Первоначально реактор выводится в критическое состояние ($\rho=0$) и стабилизируется на одном уровне. В дальнейшем производится поочередное погружение и извлечение стержней РР. Это позволит определить вклад в возмущение плотности нейтронного потока каждого стержня в отдельности, которое, как показали измерения (рис. 5), отличается для различных участков активной зоны. Далее программа вычисляет подкритичность каждого участка активной зоны в зависимости от измеренного сигнала.

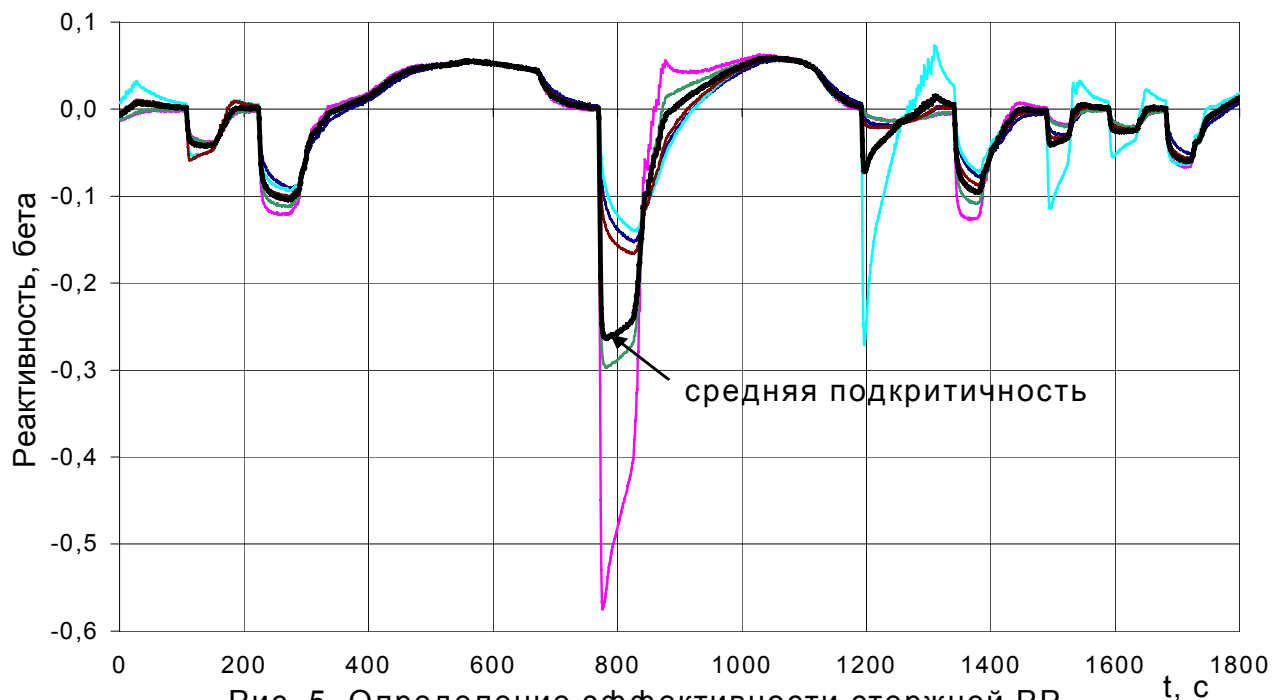


Рис. 5. Определение эффективности стержней РР

За конечную подкритичность принимается минимальное из полученных значений. Это позволяет снять ограничения на физические свойства используемых стержней-поглотителей и иных источников возмущения нейтронного поля, а также обеспечить возможность выявления областей активной зоны с минимальным значением локальной подкритичности, что важно для обеспечения ядерной безопасности.

Четвертая глава посвящена рассмотрению некоторых способов повышения коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) энергоблоков с РУ РБМК-1000, связанных с использованием СВРК ПР.

К таким способам сокращения работ, связанных с подготовкой энергоблока к пуску, следует отнести:

- сокращение времени измерения подкритичности и эффективности замененных стержней СКУЗ, за счет уменьшения количества выводов реактора в критическое состояние;
- уменьшение количества подготовительных операций перед выводом реактора в критическое состояние и уменьшение количества времени на выполнение работ, связанных с измерениями физическими характеристиками реактора;
- определение эффекта опорожнения КО СУЗ с помощью СВРК ПР, не требующее вывода реактора в критическое состояние.

Комплекс мероприятий по повышению КИУМ позволит в дальнейшем изменить перечень ядерно-опасных работ и уменьшить суммарное время на их подготовку и проведение.

Создание программных средств для СВРК ПР, способных непрерывно контролировать изменение плотности нейтронного потока реактора и вносить поправки в порядок извлечения стержней СКУЗ, позволит сократить время вывода реактора в критическое состояние и повысить ядерную безопасность энергоблоков с РУ РБМК-1000.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения СВРК ПР и мероприятий по повышению КИУМ для реакторов РБМК-1000 может составить более 80 млн. рублей в год.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации:

1. В данной работе впервые решается задача измерения и контроля степени подкритичности остановленного реактора с помощью СВРК ПР - принципиально новой системы измерений.

Автором произведена оценка существующих методов и подходов определения подкритичности в зависимости от места установки датчиков нейтронного потока. Показано, что за конечную подкритичность реактора следует принимать не среднее значение от показаний всех датчиков, как того требуют современные методики обработки результатов, а минимальное из полученных значений подкритичности.

2. Расчетные и экспериментальные данные позволили разработать новую научно-обоснованную методику определения подкритичности реактора РБМК-1000 с использованием штатной операции по проверке эффективности отдельных стержней РР.

Сущность методики заключается в последовательном погружении и последующем извлечении стержней СКУЗ на реакторе в критическом состоянии. Исходя из отклика датчиков на сигнал возмущения нейтронного потока в подкритическом реакторе активная зона условно разбивается на 8 квазиавтономных районов, со своими значениями $k_{эфф}$, материального параметра и подкритичностью. Внутриреакторными датчиками определяется вклад каждого стержня СКУЗ для каждой из квазиавтономных активных зон. В зависимости от удаленности стержня от места установки датчика нейтронного потока, показания датчиков описываются уравнением, из решения которого определяют подкритичность для каждой из зон. Минимальное из полученных значений необходимо принимать за подкритичность всего реактора в целом.

3. Анализ результатов измерений для подкритического реактора РБМК-1000 показал, что при извлечении стержней СКУЗ, плотность нейтронного потока увеличивается в локальной области. Это зависит от:

- места расположения датчика. Максимальное расстояние от датчика до источника возмущения нейтронного поля, при котором регистрируется изменение плотности нейтронного потока в подкритическом реакторе достигает ~ 40 эфф. радиусов;

- типа перемещаемого стержня СКУЗ. Для стержней 2477 изменение плотности потока \sim на 7% больше, чем для стержней 2091;

- выгорания стержня. При погружении «свежих» стержней СКУЗ изменение плотности нейтронного потока \sim на 8% больше, чем для стержней находящихся в активной зоне длительное время. Это связано с большей поглощающей способностью «свежих» стержней (меньшим выгоранием);

- энерговыработки ТВС, в которую устанавливается датчик. При установке в «свежую» ТВС ($E=0$ МВт·сут/ТВС) сигнал от датчика уменьшается на 10...15% по сравнению с «выгоревшей» ТВС ($E>2000$ МВт·сут/ТВС);

- состава и загрузки активной зоны. При прочих равных условиях вносимая «локальная реактивность» в районах (полиячейках 4 на 4) с низкими энерговыработками ($E_{cp}<1100$ МВт·сут/ТВС) в 1,5...1,8 раза больше, чем в аналогичных районах со средней энерговыработкой ($E_{cp}=1626$ МВт·сут/ТВС).

4. Данные для подкритического реактора, полученные в результате мониторинга операций по проверке и настройке скоростей стержней СКУЗ, позволили выявить «засвеженные» районы активной зоны. В этих районах рекомендовано произвести перегрузки, чтобы выровнять

распределение поля энерговыделения при работе на мощности. Этот способ дает возможность корректировать процесс перегрузок.

5. На основании измерений при проверке полного двойного хода стержней СКУЗ были выявлены районы, в которых возмущения нейтронного потока в 2,5 раза превышают среднее значение для всего реактора. Стержни РР, БАЗ и УСП в этом районе имели «аномально большой вес». Такие стержни было рекомендовано исключить из расчета «Порядка извлечения стержней при выводе реактора в критическое состояние». «Аномально большой вес» стержней для реактора в подкритическом состоянии связан с неравномерностью топливной загрузки активной зоны. Для своевременного устранения неравномерности топливной загрузки реактора РБМК-1000 автором предложено с помощью СВРК ПР периодически измерять плотность нейтронного потока при извлечении и погружении стержней СКУЗ. Это поможет внести поправки в процесс перегрузок, скорректировать дальнейший вывод реактора в критическое состояние.

6. Проведенные расчеты и эксперименты впервые показали возможность контроля СВРК ПР изменения степени подкритичности реактора РБМК-1000 при перегрузке ТВС. Это позволяет повысить ядерную безопасность РУ РБМК-1000 при соблюдении требований ПБЯ РУ АС-89 в части ядерно-опасных работ. Впервые была получена зависимость изменения подкритичности реактора РБМК-1000 при перегрузке ТВС. Показан вклад одной ТВС в нейтронный поток подкритического реактора.

7. При эксплуатации реактора в подкритическом состоянии с коэффициентом размножения $k_{эфф} > 0,997$ СВРК ПР позволяет фиксировать изменение плотности нейтронного потока и периодов реактора при минимальном управляющем воздействии оператора. Это упрощает контроль за выводом реактора в критическое состояние и существенно повышает ядерную безопасность энергоблока в целом. Показана возможность создания системы, способной обеспечить равномерный и монотонный вывод реактора в критическое состояние.

8. На основании полученных зависимостей скорости счета от положения стержней БАЗ для подкритического состояния РУ, выработаны рекомендации по дополнению «Комплексной методики определения физических и динамических характеристик реакторов РБМК-1000» РДЭО-0137-98. Предложено дополнить существующую методику оценки подкритичности методом ввода стержней БАЗ, и тем самым уменьшить погрешность. Впервые полученные автором значения относительных изменений плотностей нейтронного потока при погруженных и извлеченных стержнях БАЗ (рис. 6), для реактора РБМК-1000, находящегося в подкритическом состоянии, позволяют значительно увеличить точность в оценке подкритичности методом ввода

стержней БАЗ. Кроме того, данные, полученные СВРК ПР, подтвердили неточность оценок, используемых аттестованной программой «POLARIS» для расчета эффективности стержней БАЗ в подкритическом состоянии реактора №1 Ленинградской АЭС.

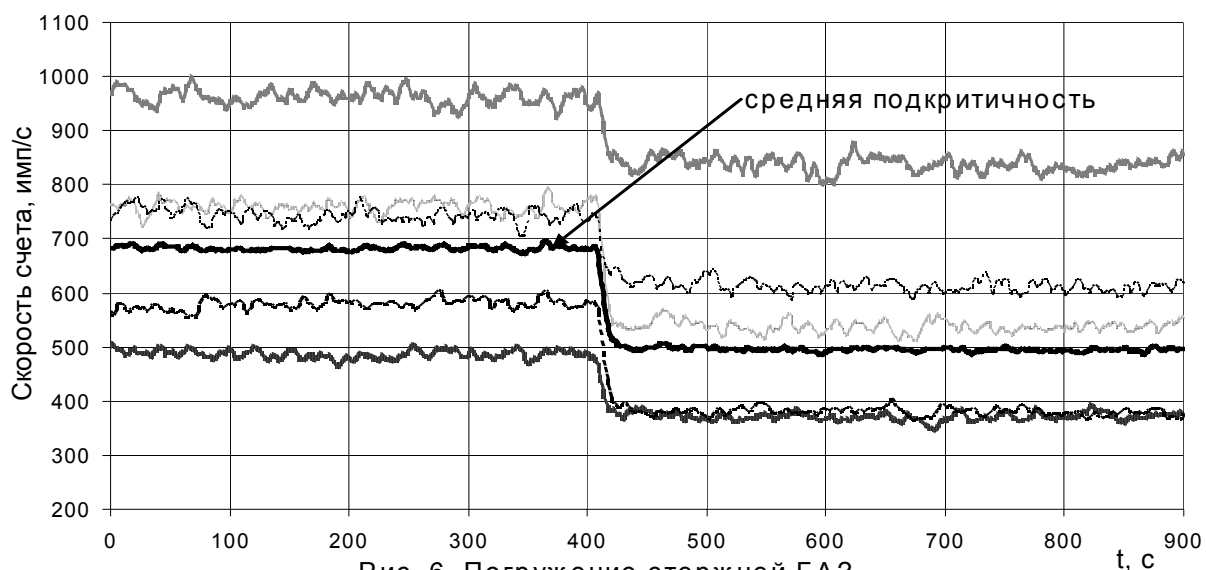


Рис. 6. Погружение стержней БАЗ

9. С помощью прямых измерений с высокой точностью подтверждено смещение максимума плотности нейтронного потока кверху активной зоны подкритического реактора. По мнению автора, это смещение связано с ужесточением спектра нейтронов в верхней части активной зоны при прохождении пароводяной смеси, что приводит к увеличению наработки Pu^{239} в верхней части ТВС.

10. Впервые экспериментально доказано, что эффект опорожнения КО СУЗ может иметь различный знак в различных частях активной зоны. Это позволило внести корректировки в «Инструкцию по опорожнению каналов СУЗ и аварийного бака СУЗ реактора РБМК-1000 первой очереди ЛАЭС» (инв.№Р-644 арх. ПТО Ленинградской АЭС) и изменить процедуру опорожнения или заполнения КО СУЗ Ленинградской АЭС.

11. Анализ результатов измерений показал, что дальнейший перевод загрузки РБМК-1000 на уран-эрбиевое топливо с обогащением 2,8% и 3,0% при сохранении стратегии перегрузок Ленинградской АЭС приведет к еще большей неравномерности концентрации делящихся материалов по радиусу активной зоны. А при неизменной мощности реактора продолжится увеличение k_T и возрастет линейная нагрузка на твэл. Для того, чтобы нивелировать эти негативные эффекты, связанные с экономически обоснованным переводом реактора РБМК-1000 на топливо с более высоким обогащением, необходимо изменить существующий подход к перегрузкам реактора. Также целесообразно производить периодический мониторинг состава активной зоны с помощью СВРК ПР. Это позволит своевременно выявлять и перегружать районы реактора с неравномерной загрузкой.

Публикации. По основным материалам диссертационной работы сделаны следующие публикации:

1. Сидоров М.Ю., Куликова Г.Г., Струков М.А., и др. Исследование и анализ некоторых характеристик сигналов средств проверки аппаратуры измерения и контроля нейтронного потока ядерного реактора. Международная студенческая конференция «Полярное сияние-2002». Ядерное будущее: безопасность, экономика и право»: Сборник тезисов докладов. Под ред. проф. В.В. Харитонов М.: МИФИ, 2002. – с. 155-156.
2. Сидоров М.Ю., Куликова Г.Г., В.А. Василенко и др. Проверка аппаратуры контроля нейтронного потока реактора РБМК-1000, при пусковых режимах работы ЯЭУ и выходе на МКУ. Международная студенческая конференция «Полярное сияние-2003». Сборник тезисов докладов. Под ред. проф. В.В. Харитонов М.: МИФИ, 2003. - с.77-78.
3. М.Ю.Сидоров, В.И.Лебедев, Г.Г.Куликова и др. Некоторые результаты испытаний системы внутриреакторного контроля подкритичности реактора на первом энергоблоке Ленинградской АЭС. Международная студ. конференция «Полярное сияние-2003»: Сборник тезисов докладов. Под ред. проф. В.В. Харитонов М.: МИФИ, 2003. - с.120-122.

Перечень принятых сокращений.

БАЗ	-	быстродействующая аварийная защита;
КО СУЗ	-	контур охлаждения системы управления и защиты;
КИУМ	-	коэффициент использования установленной мощности;
МФУ	-	минимальный физический уровень мощности;
ПБЯ РУ АС-89	-	«Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций»;
ПИК	-	подвеска ионизационных камер;
РБМК	-	реактор большой мощности канальный;
РК СУЗ	-	каналы системы управления и защиты;
РР	-	стержни ручного регулирования;
РУ	-	реакторная установка;
СВРК ПР	-	система внутриреакторного контроля подкритичности реактора;
СКУЗ	-	система контроля, управления и защиты;
ТВС	-	тепловыделяющая сборка;
ТК	-	технологический канал;
УСП	-	укороченный стержень поглотитель.

Лицензия ЛР № 020593 от 7.08.97

Подписано в печать
Тираж 100 экз.

Объем в п.л.
Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета,
предоставленного автором,
в типографии Издательства СПбГПУ
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Отпечатано на ризографе RN-2000 FP
Поставщик оборудования — фирма “Р-ПРИНТ”
Телефон: (812) 110-65-09
Факс: (812) 315-23-04