

На правах рукописи

**Жылмаганбетов Нурбол Мухтарович**

**РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БОЛЬШИХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ  
РЕАКТИВНОСТЕЙ В РЕАКТОРАХ ВВЭР**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Автор:



Москва, 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном  
учреждении высшего образования  
Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

Научный  
руководитель: Щукин Николай Васильевич  
доктор физико-математических наук, профессор кафедры  
«Теоретическая и экспериментальная физика ядерных реакторов»  
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Консультант Попыкин Александр Иванович  
кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории  
отдела расчетных обоснований безопасности ФБУ «НТЦ ЯРБ»,  
г. Москва

Официальные  
оппоненты: Федосов Александр Михайлович  
доктор технических наук, начальник лаборатории,  
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
г. Москва

Раскач Кирилл Федорович  
доктор физико-математических наук, начальник лаборатории,  
акционерное общество «Государственный научный центр  
Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени  
А.И. Лейпунского»

Селезнев Евгений Федорович  
доктор технических наук, главный научный сотрудник,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики  
Российской академии наук

Защита состоится «18» декабря 2019 г. в 16.30 часов. на заседании диссертационного совета  
МИФИ.01.03 в НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31,  
телефон +7 (499) 324-87-66, факс +7 (499) 324-21-11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ «МИФИ» и на сайте  
<http://ds.mephi.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных  
печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент



Е.Г. Куликов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Во время физического пуска нового энергоблока в эксплуатацию, после внесения изменений в конструкцию активной зоны, например при переходе на новый вид топлива, а также в других случаях, предусмотренных регламентом безопасной эксплуатации, проводятся измерения нейтронно-физических параметров на минимальном контролируемом уровне (МКУ) мощности. Целью измерений является подтверждение важнейших проектных характеристик активной зоны, которые должны обеспечить в дальнейшем безопасную эксплуатацию энергоблока. Для реакторов типа ВВЭР измеряются: критическая концентрация борной кислоты для различных состояний активной зоны, эффективность групп органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), эффективность аварийной защиты (АЗ), эффекты и коэффициенты реактивности. На реакторах ВВЭР эффективность АЗ определяется методом сброса. Изменение реактивности в процессе сброса АЗ определяется с помощью реактиметра. Реактиметр обрабатывает по формуле обратного решения уравнения кинетики (ОРУК) сигнал (ток) ионизационной камеры (ИК). В реакторах типа ВВЭР ИК находится в бетоне биологической защиты на значительном удалении от активной зоны. Реактивность, определенная с помощью реактиметра, далее называется измеренной. Введем общепринятое определение реактивности, которую рассчитывают из решения двух стационарных условно-критических задач по формуле:

$$\rho_k = 1 - 1/k_{эф}. \quad (1)$$

В формуле (1) при определении реактивности в случае сброса АЗ первое состояние – критическое состояние перед сбросом АЗ, второе состояние – это состояние после сброса АЗ. Такая реактивность в дальнейшем называется рассчитанной. Именно в единицах рассчитанной реактивности формулируются требования, ограничения и рекомендации органа регулирования в области использования атомной энергии РФ и зарубежных органов регулирования.

В случае ввода больших реактивностей (по сравнению с эффективной долей запаздывающих нейтронов), например, при сбросе АЗ, показания реактиметра не совпадают со значением рассчитанной реактивности (1).

Чтобы использовать измеренные значения реактивности при обосновании безопасности энергоблока необходимо провести моделирование измерения реактивности и установить соотношение между измеряемой величиной и величиной (1). Последнее зависит от конкретных условий измерения и включает определение плотности потока нейтронов в месте расположения ИК. Это важная проблема, так как эффективность АЗ важнейший параметр при обеспечении безопасности эксплуатации

энергблока и для обоснования безопасности путем постулирования нарушения условий нормальной эксплуатации и аварий. Измерения с целью определения эффективности АЗ фактически осуществляются только на МКУ мощности, что подчеркивает их особую важность.

Перечисленные выше вопросы рассматриваются в диссертации и это указывает на ее актуальность.

**Цель и задачи работы.** Целью настоящей работы явилось развитие и обоснование методики расчетного моделирования измерения реактивности, включая расчет плотности потока нейтронов в месте расположения ИК для реакторов типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- разработка и обоснование способа сопоставления рассчитанной и измеренной реактивностей с использованием решения сопряженных задач;
- анализ пределов применимости формулы ОРУК для определения реактивности методом сброса;
- проведение расчетного моделирования измерения реактивности с использованием разработанной автором методики для энергблоков с современными топливными циклами (энергблок № 3 Ростовской АЭС – полуторагодичный топливный цикл, энергблок № 1 Нововоронежской АЭС-2 – первый энергблок с реактором ВВЭР-1200).

**Научная новизна работы.**

Обосновано устойчивое влияние на показания ИК мощностей крайнего (ближайшего к ИК) ряда ТВС для реакторов типа ВВЭР из решения прямой и сопряженной задач переноса нейтронов.

Установлены условия применимости формулы ОРУК по отношению к вводу больших реактивностей.

Получено соотношение для определения эффективности АЗ методом сброса, которое связывает рассчитанную большую реактивность с непосредственно измеряемой величиной – отношением токов ИК на момент начала и конца сброса АЗ.

**Практическая значимость.**

Развита и реализована методика расчетного моделирования измерения реактивности, включая расчет плотности потока нейтронов в месте расположения ИК с двумя наборами коэффициентов влияния крайнего ряда ТВС активной зоны на показания ИК. Один из наборов коэффициентов влияния рассчитывался с использованием решения сопряженной задачи переноса нейтронов.

Проведено предварительное расчетное моделирование измерения эффективности АЗ на этапе физического пуска энергоблоков № 1 Нововоронежской АЭС-2 и № 3 Ростовской АЭС. Последующие результаты измерений подтвердили результаты предварительных расчетов.

Предложенная методика расчетного моделирования измерения реактивности, анализ соотношения измеренной и рассчитанной большой реактивности, а также коэффициенты влияния крайнего ряда ТВС на показания ИК используются при проведении независимых расчетов в рамках оценки обоснования безопасности реакторных установок с ВВЭР и при аттестации программных средств.

**Достоверность полученных результатов**, представленных в диссертации, подтверждена:

– Результатами валидации методики расчетного моделирования измерения эффективности АЗ при физических пусках энергоблоков.

– Использованием двух прецизионных программных средств «MCNP-4C» и «TDMCC» с соответствующим константным обеспечением, в которых реализован метод Монте-Карло, для решения прямых и сопряженных задач переноса нейтронов внутри и вне активной зоны РУ. Программное средство «TDMCC» аттестовано Ростехнадзором (аттестационный паспорт от 8.12.2016 № 407).

– Использованием общих результатов и выводов теории и физики ядерных реакторов и соответствие им полученных результатов и выводов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

– Разработанный алгоритм расчета коэффициентов влияния ТВС на показания ИК для реакторов типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 с использованием двух независимых подходов, включая полученные из решения сопряженной задачи.

– Установленное соотношение для сопоставления рассчитанной реактивности и измеренной реактивности методом сброса для реакторов типа ВВЭР.

– Расчетные модели для моделирования измерения реактивности на МКУ мощности для РУ с реакторами ВВЭР-1000 с полуторагодовым топливным циклом и РУ с ВВЭР-1200.

**Личный вклад автора.** Автором лично выполнены следующие работы:

– проведена серия нестационарных расчетов с последующим анализом нейтронно-физических характеристик РУ энергоблоков № 3 Ростовской АЭС и № 1 Нововоронежской АЭС-2;

– рассчитаны коэффициенты влияния крайнего ряда ТВС на показания ИК, полученные как из прямого расчета, так и из решения сопряженной задачи;

– с помощью разработанной модели реактиметра обработаны экспериментальные данные по измерениям токов ИК в процессе определения эффективности АЗ для ряда действующих энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 108 страницах, содержит 42 рисунка и 20 таблиц; перечень использованных источников включает 51 наименование.

**Апробация работ.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах, совещаниях и конференциях: Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» Нейтроника-2013, Нейтроника-2014, Нейтроника-2015, Нейтроника-2016 и Нейтроника-2017 (г. Обнинск, Россия, 2013, 2014, 2015, 2016 и 2017 гг.); научно-технический семинар «Расчетные и экспериментальные исследования динамики ядерных энергетических установок на этапах жизненного цикла» (г. Сосновый бор, Россия, 2015 г.); 4-я международная научно-техническая конференция «Ввод АЭС в эксплуатацию» (г. Москва, Россия, 2016 г.); The Physics of Reactors conference PHYSOR-2014 (Kyoto, Japan, 2014 г.) и PHYSOR-2016 (Sun Valley, USA, 2016 г.); международная конференция «Nuclear Energy for New Europe» (Bled, Slovenia, 2017 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ в научных журналах и сборниках трудов Международных и Российских конференций, совещаний и семинаров, включая 2 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в журнале из списков Scopus и Web of Science, а также приравняемое к публикациям авторское свидетельство на программу для ЭВМ.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** приводится постановка задачи для уравнения переноса нейтронов с учетом запаздывающих нейтронов, формулируются предположения, принятые в работе, и получаются основные соотношения, которые используются в дальнейшем изложении.

Основным предположением является предположение о том, что производной по времени от плотности потока нейтронов в нестационарном уравнении переноса нейтронов можно пренебречь, то есть время жизни мгновенных нейтронов много меньше характерного времени процессов, которые рассматриваются. Поэтому зависимость от времени определяется изменением числа запаздывающих нейтронов и параметров задачи, например движением регулирующих органов. Широкая

применимость этого предположения обсуждается в [2]. Это предположение далее называется предположением о квазистационарности рассматриваемых процессов.

Задача записывается в виде:

$$(\chi F)\varphi - M\varphi + q(t) = 0, \quad (2)$$

где:

$(\chi F)\varphi(\vec{r}, E, \Omega, t) = \chi(E) \int dE' \int d\Omega' \nu \Sigma_f(\vec{r}, E') \varphi(\vec{r}, E', \Omega', t)$  – оператор источника нейтронов деления;

$F\varphi(\vec{r}, E, \Omega, t) = \int dE' \int d\Omega' \nu \Sigma_f(\vec{r}, E') \varphi(\vec{r}, E', \Omega', t)$  – оператор числа нейтронов деления (число нейтронов деления);

$$M = L - K_{i,s} :$$

$L\varphi(\vec{r}, E, \Omega, t) = -\Omega \nabla \varphi(\vec{r}, E, \Omega, t) + \Sigma_t(\vec{r}, E) \varphi(\vec{r}, E, \Omega, t)$  – оператор утечки и полного взаимодействия нейтронов;

$K_{i,s}\varphi(\vec{r}, E, \Omega, t) = \int dE' \int d\Omega' \Sigma_{i,s}(\vec{r}, E', \Omega', E, \Omega) \varphi(\vec{r}, E', \Omega', t)$  – оператор упругого (s) и неупругого (i) рассеяния нейтронов.

Если  $q(t)$  является источником запаздывающих нейтронов –  $q_3(t)$ , то он определяется обычным образом:

$$q_3(t) = \sum_{i=1}^n \chi_3 \lambda_i c_i,$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\lambda_i c_i + \beta_i F \varphi, \quad (3)$$

$$c_i(0) = c_{i0}.$$

Функции, подлежащие определению:  $\varphi(r, E, \Omega, t)$  – плотность потока нейтронов;  $c_i(r, E, \Omega, t)$  – концентрация предшественников запаздывающих нейтронов  $i$ -ой группы. Параметры:  $\Sigma_t(r, E, t)$  – полное сечение взаимодействия нейтронов;  $\Sigma_{i,s}(r, E, t)$  – сечение упругого и неупругого рассеяния нейтронов;  $\Sigma_f(r, E, t)$  – сечение деления нейтронов;  $\nu$  – количество вторичных нейтронов;  $\chi(E)$  – спектр деления нейтронов;  $\chi_3(E)_i$  – групповые спектры запаздывающих нейтронов,  $\beta, \beta_i$  – доля и групповые доли запаздывающих нейтронов. Переменные:  $r$  – пространственная переменная (может быть вектор с координатами  $x, y, z$ );  $\Omega$  – телесный угол;  $E$  – энергия,  $t$  – время. В операторных формулировках запись координат и времени чаще опускается или оставляется только время, в тех случаях, когда это не влияет на изложение.

Полученные результаты справедливы для формулировок в различных приближениях: для уравнения переноса нейтронов с непрерывной зависимостью от энергии, для многогруппового уравнения переноса нейтронов, для диффузионного многогруппового приближения. Действия, которые проводятся с операторами ниже обосновываются в математической теории реакторов [7] для уравнения переноса

нейтронов и в [8] для диффузионного многогруппового приближения. Можно считать, что операторы и функционалы определены в гильбертовом пространстве функций на области определения, которая соответствует используемому приближению уравнения переноса. Сопряженное пространство и операторы определяются обычным образом. Из предположения 1 данного раздела следует, что в каждый момент времени плотность потока нейтронов может быть найдена из уравнения (2), источник в котором зависит от параметра  $t$  и определяется из (3).

Скалярное произведение определяется обычным образом

$$f = (\psi, \varphi) = \int_D \psi(x)\varphi(x)dx. \quad (4)$$

$D$  – область, в которой рассматривается задача,  $x$  – аргумент (пространственная координата в диффузионном приближении, пространственная, угловая и энергетическая координаты в приближении уравнения переноса). Иногда скалярное произведение рассматривается только по части области  $D$ , например пространственной. Специальное определение для этого не вводится.

Запишем задачи для определения сопряженных функций.

$$\frac{1}{k_{\text{эф}}}(\chi F)^+ \varphi_k^+ - M^+ \varphi_k^+ = 0, \quad (5)$$

$$M^+ \varphi_1^+ = \Sigma. \quad (6)$$

Решение задачи (5), отвечающее собственному значению  $k_{\text{эф}}$ , которая является сопряженной к условно-критической задаче, называется ценностью нейтронов деления. Источник  $\Sigma$  в уравнении (6) локализован в месте расположения ИК.

Из (2), (3) и (5) следует, что реактивность выражается следующей формулой:

$$\rho_k = \beta_{\text{eff}} - \frac{(\varphi_k^+, q_3)}{(\varphi_k^+, (\chi F)\varphi)} \quad (7)$$

Запишем формулу ОРУК в следующем виде:

$$\frac{\rho_k}{\beta_{\text{эф}}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N a_i \lambda_i \int_{-\infty}^t \exp(-\lambda_i(t-t'))N(t')dt'}{N(t)}. \quad (8)$$

В документе эксплуатирующей организации (РД ЭО 0150-2004) [1] измеренная реактивность вводится автоматической заменой  $N(t)$ , которая интерпретируется как мощность реактора, на ток ИК:

$$\frac{\rho_{\text{изм}}}{\beta_{\text{эф}}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N a_i \lambda_i \int_{-\infty}^t \exp(-\lambda_i(t-t'))I(t')dt'}{I(t)}. \quad (9)$$



В диссертации устанавливается связь формулы (7) и (8), из которой следует, что формулы (7) и (8) различаются и при сопоставлении величин  $\rho_k$  и  $\rho_{\text{изм}}$  это нужно учитывать. В условиях ранее сделанного нами предположения это может быть сделано определенным образом.

В главе 1 анализируется введение возможных поправок в формулу (9) для получения  $\rho_k$ .

При использовании предположение о квазистационарности, получается прямая связь между отношениями токов ИК в начале и конце сброса и  $\rho_k$ :

$$\frac{\rho_k}{\beta_{\text{эф}}} - 1 = - \frac{\bar{q}_3}{\bar{q}_{3,0}} \frac{I_0}{I} \frac{(e_{k,3}, R_3)}{(e_{k,3,0}, R_{3,0})} \frac{(e_{k,0}, R_{k,0})}{(e_k, R)} \frac{(e_1, R)}{(e_1, R_{k,0})}. \quad (10)$$

Величины с индексом 0 относятся к моменту начала движения ОР СУЗ при сбросе АЗ. Состояние после сброса АЗ обозначается без индекса 0.  $q_3$  – среднее по активной зоне значение источника запаздывающих нейтронов,  $I$  – ток ИК,  $R(r)$  и  $R_3(r)$  – пространственные распределения источников нейтронов и источников запаздывающих нейтронов. Функционалы  $e_k$ ,  $e_{k,3}$  и  $e_1$  определены следующим образом:

$$e_k(r) = \int dE \chi(E) \varphi_k^+(r, E) \quad (11)$$

$$e_{k,3}(r) = \int dE \chi_3(E) \varphi_k^+(r, E) \quad (12)$$

$$e_1(r) = \int dE \chi(E) \varphi_1^+(r, E) \quad (13)$$

Формула (10) является точной в рамках предположения о квазистационарности процесса сброса АЗ. Она содержит единственную измеряемую величину – отношение токов ИК до и после сброса АЗ. В нее входят величины, которые зависят только от пространственных координат. Ее можно считать обобщением формулы, обычно применяемой при определении реактивности методом сброса [2].

Далее вводится дополнительное предположение, которое проверено только для сброса АЗ в реакторах ВВЭР и оно заключается в том, что пространственное распределение источников запаздывающих нейтронов не изменяется в процессе сброса АЗ. Это подтверждается расчетами в нестационарном диффузионном двухгрупповом приближении с учетом запаздывающих нейтронов. С учетом этого предположения получается формула, аналогичная (10) для измеренной реактивности и формула для их отношения:

$$\frac{\rho_I}{\beta_{\text{эф}}} - 1 = - \frac{\bar{q}_3}{\bar{q}_{3,0}} \frac{I_0}{I} \frac{(e_{k,3}, R_3)}{(e_{k,3,0}, R_{3,0})} \frac{(e_{k,0}, R_{k,0})}{(e_k, R)}. \quad (14)$$

$$\frac{\frac{\rho_k}{\beta_{эф}} - 1}{\frac{\rho_{изм}}{\beta_{эф}} - 1} = \frac{(e_1, R)}{(e_1, R_{k,0})} A \quad (15)$$

Коэффициент  $A$  определяет различие значений реактивности, полученной по формулам (8) и (9).

Очевидно, что  $\rho_k$  не меняется после достижения ОР СУЗ конечного нижнего положения при их сбросе. Что касается  $\rho_{изм}$ , то в течение длительного времени эта величина, например в процессе сброса АЗ в реакторе ВВЭР, также является постоянной, это связано с соотношением начального количества предшественников запаздывающих нейтронов и количества предшественников запаздывающих нейтронов, которые образуются в результате делений в подкритической системе после достижения ОР СУЗ крайнего нижнего положения (конца сброса АЗ). Этот результат устанавливается только в трехмерных моделях. Он является очень важным, как с теоретической, так и с практической точек зрения. Выяснению этого факта в процессе измерения препятствует относительно слабый сигнал ИК после сброса АЗ, вопросы, связанные с калибровкой ИК и наличием фоновых токов при измерениях. Проверка этого факта в точечной модели не учитывает изменения распределения энерговыделения в процессе сброса АЗ и, поэтому, не является представительной. Одним из «компромиссных» решений в этом плане является предложенный в диссертации способ сравнения измеренной реактивности и реактивности, полученной в результате расчетного моделирования измерения, в момент достижения ОР СУЗ крайнего нижнего положения при сбросе АЗ. Данный подход дает хорошее согласие результатов измерения и расчетного моделирования токов ИК. Этот подход предложен и реализован в диссертации впервые.

В первой главе приводятся сведения о программных средствах, которые позволяют реализовать методику расчетного моделирования измерения реактивности. Рассматриваются как детерминистические программы (КАСКАД, LACKY, CORNER), так и программы основанные на методе Монте-Карло. (КИР, КИР-П, TDMCC. Помимо этого, приведено описание программных средств «MCNP-4C», «TDMCC» и «RAINBOW-TRP», использованных при проведении расчетов, результаты которых представлены в диссертации.

Отмечается, что предложенный в главе 1 подход для расчетов и сравнения значений реактивности, связанный с расчетом функционалов, содержащих сопряженные функции, является эффективным при использовании метода Монте-Карло.

Во **второй** главе представлены результаты расчета коэффициентов влияния, использованные при расчетном моделировании токов ИК, основанном на расчете плотности потока нейтронов в месте расположения ИК, приводятся результаты расчетов сопряженных функций и функций распределения энерговыделения необходимые для определения реактивности по формуле (10), поясняются с помощью расчетов причины различия результатов получаемых по формуле (7) и формуле ОРУК (8) и доказывается с использованием результатов покассетного расчета функции  $\varphi_1^+$  тот факт, что основной вклад в показание ИК дает крайний (ближайший к выгородке) ряд ТВС.

Ток ИК является единственной непосредственно измеряемой величиной при определении измеренной реактивности. Он выражается следующим образом:

$$I(t) = \sum_{i,k} I_{i,k}(t) = \sum_{i,k} \xi_{i,k} N_{i,k}(t). \quad (16)$$

где  $\xi_{i,k}$  – коэффициент влияния элемента ТВС с номером (i,k),  $N_{i,k}$  – мощность источника в элементе ТВС с номером (i,k).

В диссертации предложено два подхода к определению коэффициентов влияния. Один из них заключается в следующем. Коэффициент влияния элементарного объема (призмы)  $V_{i,k}$ , где  $i$  – номер ТВС,  $k$  – номер разбиения ТВС по высоте, определялся как плотность потока тепловых нейтронов в месте расположения ИК от источника единичной мощности, расположенного в этом элементарном объеме и умноженного на спектр деления. ТВС разбивалась по высоте на 5-10 объемов. Задача расчета коэффициентов влияния решалась по ПС «MCNP-4C».

Второй способ вычисления коэффициентов влияния заключается в решении неоднородной сопряженной задачи, где источник для сопряженного уравнения задается в ИК. При этом регистрация искомым функционалов (коэффициентов влияния) производилась в объемах с номерами (i,k). Решение неоднородной сопряженной задачи осуществлялось по ПС «MCNP-4C» с применением групповой библиотеки, содержащей 30 энергетических групп. Преимуществом данного способа определения коэффициентов влияния является получение всех коэффициентов по результатам одного расчета. Данный способ определения коэффициентов влияния является независимым по отношению к способу решения задач распространения нейтронов от единичного источника в каждом объеме.

В диссертации показано, что:

$$I_{i,k} = (\Sigma, \varphi(Q_{i,k})) = (\varphi_{1,i,k}^+, Q_{i,k}) = (\varphi_{1,i,k}^+, \chi(E)N_{ik}) = e_{1,i,k} N_{i,k}. \quad (18)$$

В цепочке равенств (18)  $Q_{i,k}$  – полный источник нейтронов объема  $V_{i,k}$ ,  $e_{1,i,k}$  – среднее по объему  $V_{i,k}$  значение функции  $e_1$ , определенной формулой (13).

Таким образом:

$$I_{i,k} = \xi_{i,k} N_{i,k} = e_{1,i,k} N_{i,k}. \quad (19)$$

Решение неоднородной сопряженной задачи является полезным, не только с точки зрения появления независимого способа расчета коэффициентов влияния, но и с точки зрения доказательства определенных свойств решения задачи о расчетном моделировании измерения токов ИК и расчетном моделировании измерения реактивности. К ним относится слабая зависимость коэффициентов влияния от глубины погружения ОР СУЗ, из чего следует возможность использования одинаковых наборов коэффициентов влияния для всего процесса сброса АЗ и в случае сброса любого количества ОР СУЗ, то есть определения эффективности АЗ без одного ОР СУЗ и эффективности застрявших ОР СУЗ. Кроме того, использование сопряженной функции показывает локализацию источника в крайнем (ближайшем к ИК) ряде ТВС активной зоны и устанавливает факт достижения ИК только быстрыми нейтронами с энергией  $> 2$  МэВ. Это иллюстрирует рисунок 1, на котором изображено распределение средних по высоте значений функции  $e_1$  в секторе  $60^\circ$  активной зоны энергоблока № 3 Ростовской АЭС для этапа физического пуска данного энергоблока. Для каждой ТВС приведено по два значения, при взведенных и опущенных ОР СУЗ. Желтым цветом обозначены ТВС с ОР СУЗ.

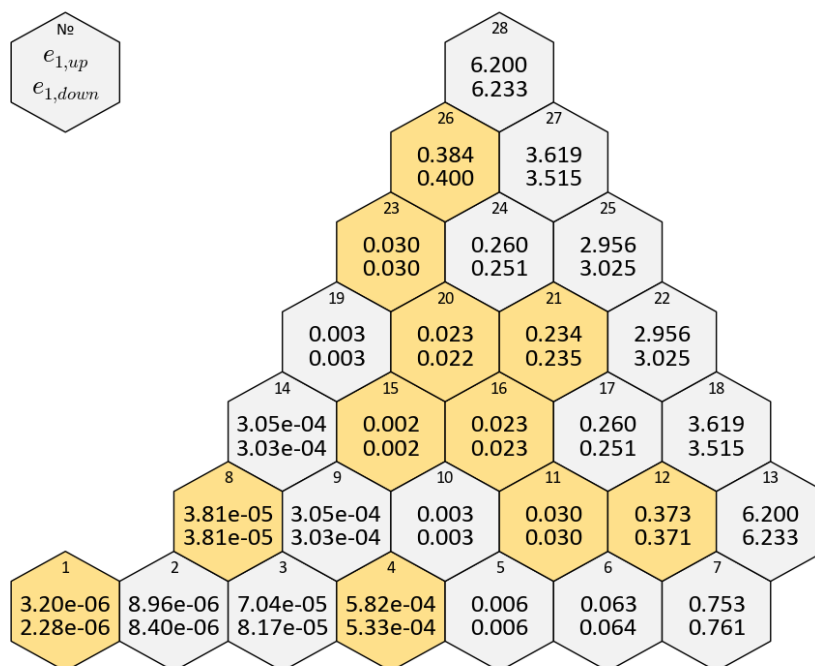


Рисунок 1 – Относительные покассетные средние значения функции  $e_1$  для активной зоны энергоблока № 3 Ростовской АЭС для этапа физического пуска

В третьей главе представлено описание методики расчета двухгрупповых нейтронно-физических констант, необходимых для проведения расчетов переходных режимов РУ с ВВЭР, целью которых является расчетное моделирование измерения реактивности, а также результаты верификации полученных библиотек. Расчет

библиотек нейтронно-физических констант проводился по программе «LC-1000», которая позволяет автоматизировать процесс расчета библиотек констант. В основе программы «LC-1000» лежит программа «WIMS/D-5B».

Расчеты библиотек проводились для энергоблоков № 3 Ростовской АЭС и № 1 Нововоронежской АЭС-2.

Отличительной особенностью энергоблока № 3 Ростовской АЭС является его эксплуатация в полугодовом режиме перегрузок топлива. При этом используются ТВС-2М, содержащие топливо с обогащением по  $^{235}\text{U}$  до 4,95 % и выгорающий поглотитель с содержанием гадолиния до 8 %  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ . При этом максимальное количество ТВЭГов в ТВС достигает 24. Асимптотический спектр в ТВС с большим числом ТВЭГов не устанавливается. Под асимптотическим спектром понимается спектр микроячейки с ТВЭлом, определяющий спектр ТВС. Наличие асимптотического спектра в ТВС позволяет рассчитывать ТВС в диффузионном многогрупповом приближении.

В ТВС ВВЭР-1200, которые используются в активной зоне РУ В-392М энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2, по сравнению с ТВС-2М, которые используются в РУ В-320 энергоблока № 3 Ростовской АЭС, измерительный канал смещен относительно центра ТВС. При этом внутри ТВС образуются сложные области для расчета, включающие ТВЭлы, ТВЭГи, ОР СУЗ или направляющие каналы ОР СУЗ, заполненные водой, и измерительный канал, заполненный водой. В такой системе асимптотический спектр так же не устанавливается. Энергоблок № 1 Нововоронежской АЭС-2 эксплуатируется в режиме одногодичного интервала между перегрузками топлива.

В процессе расчета входной файл с описанием ТВС реактора преобразуется в соответствии с параметрами узла опорной сетки. Опорная сетка включает в себя температуру теплоносителя, плотность теплоносителя, температуру топлива, концентрацию бора и выгорание топлива ( $T_{\text{тн}}$ ,  $\rho_{\text{тн}}$ ,  $T_{\text{топ}}$ ,  $C_{\text{бор}}$ ,  $V$ ).

Для этого создается файл исходных данных для каждого типа ТВС в ПС «WIMS/D-5B». Текст файла исходных данных должен содержать выбранный метод расчета, описание геометрии, материального состава рассчитываемого объекта (ячейки реактора). Предварительно рассчитывается изотопный состав топлива в процессе выгорания.

ТВС рассчитываются в ПС «WIMS/D-5B» в кластерной геометрии. При этом шестиугольная ячейка заменяется равной по площади эквивалентной круглой ячейкой, при этом применяется кольцевое размещение ТВЭлов. Таблетка с уран-гадолиниевым топливом разбивается на несколько кольцевых зон.

Подготовка библиотеки двухгрупповых диффузионных констант является важным и определяющим этапом, влияющим на результаты дальнейших расчетов, связанных с безопасностью реакторной установки, поэтому следующим шагом была ее верификация. Для этой цели проводилась выборочная проверка результатов расчетов нейтронно-физических характеристик, полученных по инженерным методам расчета, реализованным в программе «WIMS/D-5B», с соответствующими результатами прецизионных расчетов этих параметров по программе «MCNP-4C» в реальной геометрии ТВС с реальным расположением твэгов, каналов ОР СУЗ, ОР СУЗ и измерительного канала. Этот этап верификации показал достаточную точность инженерных методов расчета, реализованных в программе «WIMS/D-5B», для расчета библиотек констант.

Библиотека двухгрупповых диффузионных нейтронно-физических констант предназначалась для нестационарного расчета РУ по ПС «RAINBOW-TRP» в покассетном представлении активной зоны. На МКУ мощности результаты нейтронно-физических расчетов верифицировались с результатами потвальных расчетов по ПС «MCNP-4C» и «TDMCC». Можно сделать вывод, что основные характеристики активной зоны такие как концентрация борной кислоты, эффективность органов регулирования и эффективность АЗ согласуются с достаточной точностью для всех результатов расчетов. Это так же является верификацией библиотеки двухгрупповых нейтронно-физических констант.

Таким образом расчетная модель РУ, сформированная по ПС «RAINBOW-TRP» с использованием разработанных библиотек двухгрупповых нейтронно-физических констант для рассмотрения процесса сброса АЗ, является обоснованной. Это подтверждается и результатами физпусковых измерений на энергоблоках. Отметим, что для сравнения измеренной и рассчитанной реактивностей требуется распределение энерговыделения при полностью введенных ОР СУЗ. Это распределение, полученное по ПС «RAINBOW-TRP» сравнивалось с соответствующими распределениями, полученными по ПС MCNP-4C и TDMCC.

**В четвертой главе** представлены результаты расчетного моделирования измерения реактивности и сравнения с измерениями эффективности АЗ, АЗ без одного наиболее эффективного ОР СУЗ и застрявшего ОР СУЗ в процессе физического пуска энергоблоков № 3 Ростовской АЭС и Нововоронежской АЭС-2.

На рисунке 2 представлено распределение групп ОР СУЗ по активной зоне энергоблока № 3 Ростовской АЭС и схема расположения ИК.

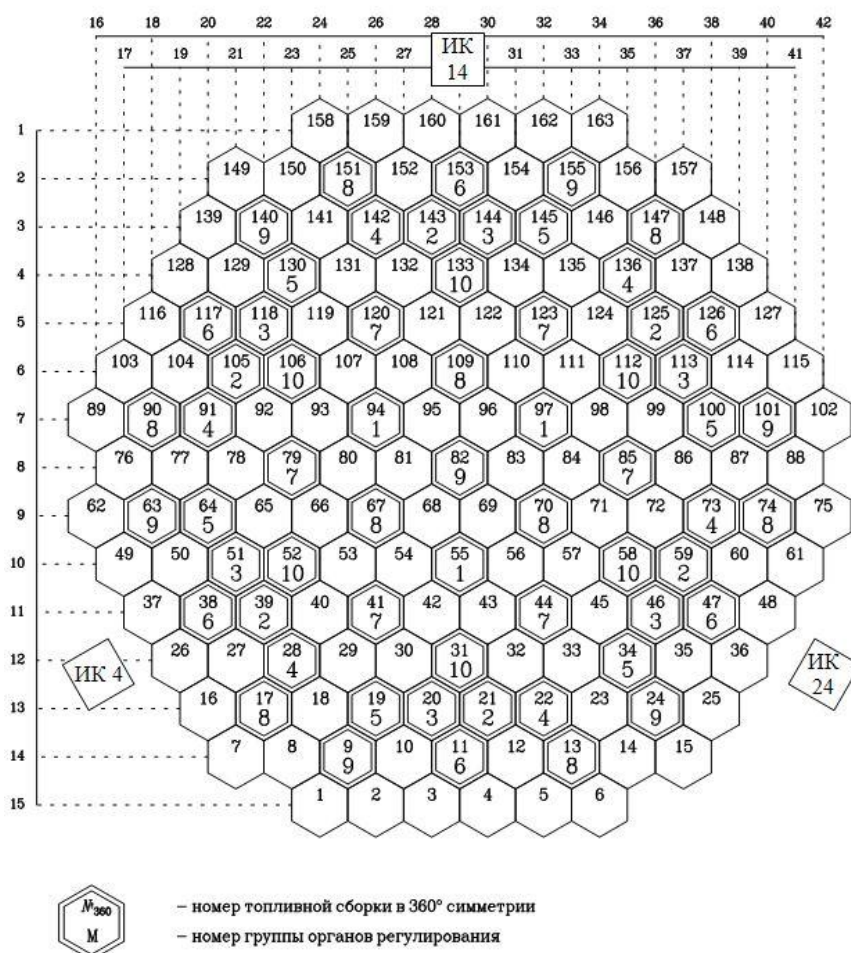
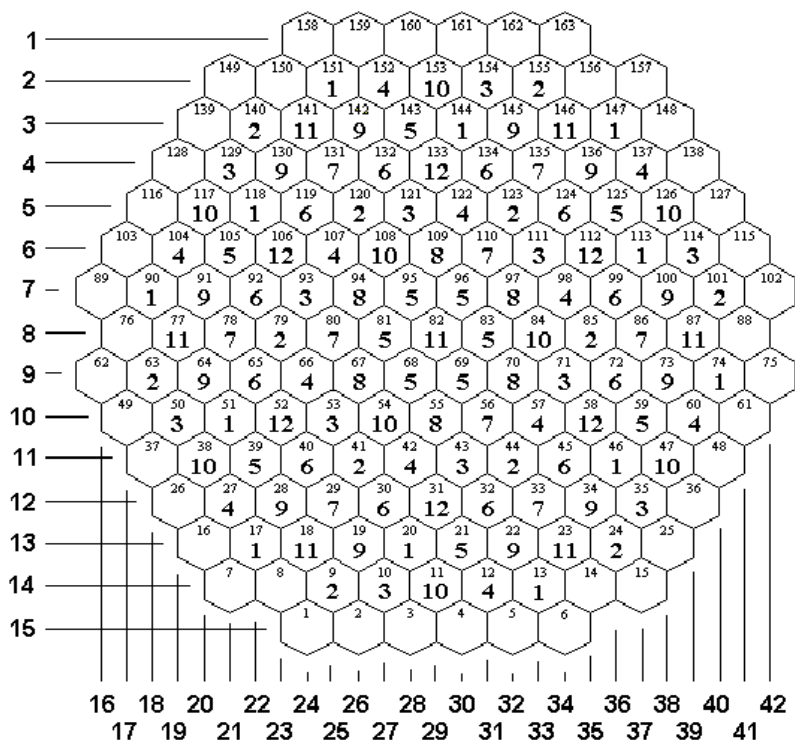


Рисунок 2 – Распределение групп ОР СУЗ по активной зоне энергоблока № 3 Ростовской АЭС и схема расположения ИК

Измерения тока в процессе физического пуска энергоблока № 3 Ростовской АЭС осуществлялось тремя ИК: № 4, 14 и 24. ИК № 4 расположена напротив сектора активной зоны, в котором проводился эксперимент с имитацией застревания одного эффективного ОР СУЗ. В процессе физического пуска указанного энергоблока проведено три сброса АЗ, в двух из которых проводился эксперимент с застреванием одного ОР СУЗ (в ТВС № 02-33 и ТВС № 02-29). Для расчетного моделирования токи ИК всегда нормируются на значение в момент начала переходного процесса.

На рисунке 3 представлено распределение групп ОР СУЗ по активной зоне энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 и схема расположения ИК.

Измерения тока в процессе физического пуска энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 осуществлялось ИК № 8 и 16. Всего проведено два сброса АЗ, в каждом из которых проводился эксперимент с имитацией застревания одного ОР СУЗ (в ТВС № 02-29 и ТВС № 14-33).



ИК № 16

Рисунок 3 – Распределение групп ОР СУЗ по активной зоне энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 и схема расположения ИК

По расчетным значениям токов ИК определены эффективности АЗ с учетом положений документа РД-ЭО-0151-2004. Для этого была использована формула (9). Параметры точечной кинетики, использованные в расчетах по формуле (9) для шести групп запаздывающих нейтронов, те же, что использовались эксплуатирующей организацией в процессе измерений. Они же использованы в расчетах по ПС «RAINBOW-TRP».

В таблицах 1 и 2 для энергоблоков № 3 Ростовской АЭС и 1 Нововоронежской АЭС-2, соответственно, приведены значения:

- измеренной эффективности АЗ («Измерение»);
- эффективности АЗ, полученной в результате расчетного моделирования измерения («Расчетное моделирование измерений»);
- эффективности АЗ, полученной в результате стационарного расчета по ПС «RAINBOW-TRP» («Стационарный расчет по формуле (1)»).

Результаты приводятся для полной эффективности АЗ, эффективности АЗ без одного «наиболее эффективного» ОР СУЗ и эффективности «застрявшего» ОР СУЗ. В



скобках указаны значения отклонений эффективностей АЗ, полученных в результате расчетного моделирования измерения и из стационарных расчетов от измеренной величины.

Таблица 1 – Результаты расчетов и измерений эффективности АЗ во время физического пуска энергоблока № 3 Ростовской АЭС, реактивность в %  $\Delta k_{эф}/k_{эф}$

–	Измерение	Расчетное моделирование измерения	Стационарный расчет по формуле (1)
Полная эффективность АЗ, %	5,6±0,3	4,9 (13 %)	6,1 (9 %)
Эффективность АЗ без одного «застрявшего» ОР СУЗ			
в ТВС 02-33	4,5±0,3	3,8 (16 %)	4,7 (4 %)
в ТВС 02-29	4,7±0,3	4,0 (15 %)	5,1 (8 %)
Эффективность «застрявшего» ОР СУЗ, %:			
в ТВС 02-33	1,06±0,11	1,08 (2 %)	1,37 (29 %)
в ТВС 02-29	0,91±0,09	0,91 (0 %)	1,01 (11 %)

Таблица 2 – Результаты расчетов и измерений эффективности АЗ во время физического пуска энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2, реактивность в %  $\Delta k_{эф}/k_{эф}$

–	Измерение	Расчетное моделирование измерения	Стационарный расчет по формуле (1)
Полная эффективность АЗ, %	8,1±0,3	7,9 (2 %)	10,3 (21 %)
Эффективность АЗ без одного «застрявшего» ОР СУЗ			
в ТВС 02-29	7,3±0,3	7,1 (3 %)	9,3 (27 %)
в ТВС 14-33	6,1±0,3	5,6 (8 %)	8,0 (31 %)
Эффективность «застрявшего» ОР СУЗ, %:			
в ТВС 02-29	0,78±0,08	0,79 (1,3 %)	0,99 (27 %)
в ТВС 14-33	2,0±0,2	2,3 (15 %)	2,3 (15 %)

Как видно из таблицы 1, для энергоблока № 3 Ростовской АЭС значение эффективности АЗ, полученное в результате расчетного моделирования измерения реактивности, удовлетворительно совпадает с результатами измерений. Из таблицы 2 видно, что для энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 значение эффективности АЗ, полученное в результате расчетного моделирования измерения реактивности, хорошо совпадает с результатами измерений. Напомним, что при расчетном моделировании измерения реактивности никаких поправок не вводилось.

Учитывая, что показания ИК в момент достижения ОР СУЗ крайнего нижнего положения являются наиболее устойчивыми, предлагается при сопоставлении измеренной реактивности и реактивности, полученной в результате расчетного моделирования измерения, использовать именно эту точку по времени. Выбор этого состояния делает результат независимым от неоднозначного обоснования и использования асимптотики поведения системы на запаздывающих нейтронах и особенностей фиксации этого состояния по ИК.

Далее приводятся результаты демонстрационных расчетов по формуле (10). Рассматривается сброс АЗ в процессе физического пуска энергоблока № 3 Ростовской АЭС. «Демонстрационность» расчетов заключается в том, что сопряженные функции рассчитывались усредненными по высоте. При этом при принятых двух основных допущениях: пренебрежение временной зависимостью в уравнении для потока нейтронов и пренебрежение изменением пространственной зависимости источника запаздывающих нейтронов при сбросе ОР СУЗ, расчет проводился методом Монте-Карло (диффузионное приближение не использовалось). Отсутствие временной зависимости в пространственном распределении источников запаздывающих нейтронов устанавливалось именно в диффузионном приближении.

Приведем значения отношений функционалов, которые входят в выражение (10), для определения эффективности АЗ во время физического пуска энергоблока № 3 Ростовской АЭС. Время сброса принималось равным 1,5 сек.

$$\frac{q_3}{q_{3,0}} = 0,8.$$

Этот результат получен по программному средству «RAINBOW-TRP».

$$\frac{I_0}{I} = 10,1.$$

Это значение взято из расчетного моделирования изменения тока ИК при сбросе АЗ.

Значение эффективности АЗ, полученное по формуле (10) составляет 6,2 %  $\Delta k/k$ . Непосредственно стационарный расчет по программе «MCNP-4C» дает результат 6 %  $\Delta k/k$  при упомянутом выше значении  $\beta_{эф} = 0,0073 \Delta k/k$ . Значения дробнолинейных функционалов, которые входят в формулу (10) так же рассчитаны по программе «MCNP-4C».

Таким образом, формула (10), которая обобщает формулу метода сброса [2], удовлетворительно связывает непосредственно измеренную величину – отношения токов ИК в начале и конце сброса АЗ, с рассчитанной реактивностью.

Приведем результаты определения тока ИК с использованием двух наборов коэффициентов влияния, полученных из решения прямой и сопряженной задач по ПС «MCNP-4C». На рисунке 4 представлено изменение тока ИК, рассчитанного по двум

наборам коэффициентов влияния, в процессе 1-го сброса АЗ для энергоблока № 3 Ростовской АЭС.

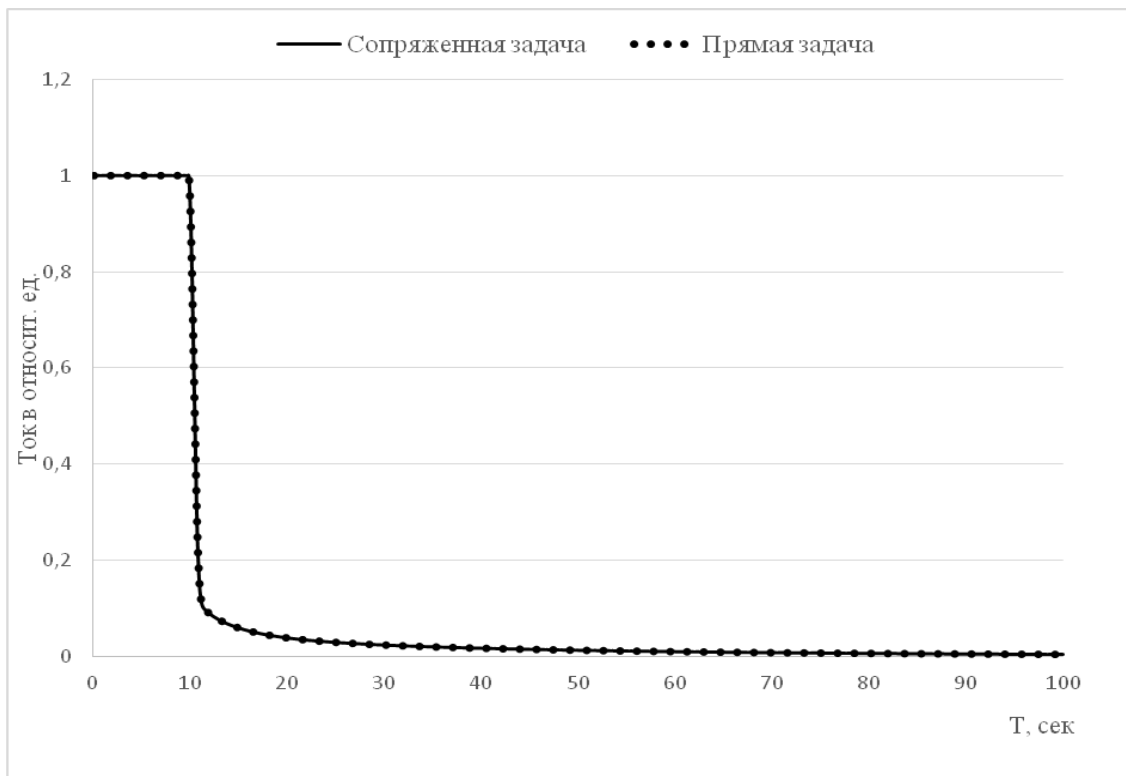


Рисунок 4 – Изменение тока ИК № 14 при первом сбросе АЗ по результатам расчетного моделирование тока ИК с использованием двух наборов коэффициентов влияния для энергоблока № 3 Ростовской АЭС

Сплошная линия – расчет по коэффициентам влияния  $\xi_{i,k}$ ;

Отдельные точки – расчет по коэффициентам влияния  $e_{1,i,k}$

Из рисунка 4 следует, что оба набора коэффициентов влияния, которые получены независимо друг от друга, дают фактически одинаковые результаты.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Развита разработанная ранее в ФБУ «НТЦ ЯРБ» методика расчетного моделирования измерения большой реактивности (модель реактиметра) для расчета ввода больших реактивностей, в том числе моделирования измерения эффективности АЗ. Эти методы связывают изменение мощности активной зоны реактора типа ВВЭР в процессе ввода реактивности с плотностью потока нейтронов в месте расположения ИК в бетоне биологической защиты.

2. Предложены и обоснованы два способа расчета коэффициентов влияния ТВС на показания ИК с использованием решения прямой и сопряженной неоднородных задач.

3. Используя предложенный в диссертации подход к определению указанных коэффициентов влияния, установлено, что основной вклад в ток ИК (более 90 %) дают нейтроны, рожденные в последнем (ближайшем к выгородке) ряде ТВС активной зоны.

4. Изучена связь формулы ОРУК, используемой в реактиметре, для определения измеренной реактивности, с реактивностью, которая получается из распределенной модели, которая с достаточной точностью описывает ввод большой реактивности. Продемонстрировано, что величина, которая принимается в качестве измеренной реактивности, будет содержать систематическую погрешность при сравнении с результатами расчета, полученными в более точных приближениях, чем метод ОРУК.

5. Показано, что при рассмотрении задачи быстрого ввода большой реактивности (сброс АЗ) можно использовать предположение о том, что пространственное распределение источников (эмиттеров) запаздывающих нейтронов в процессе сброса аварийной защиты не меняется. Для этого случая получены простые соотношения, которые связывают рассчитанную и измеренную реактивности с измеренными в начале и в конце сброса АЗ токами ИК, и соотношение, связывающее измеренную и рассчитанную реактивности.

6. С использованием предложенной в диссертации методики получены прогнозные значения измеренных токов ИК и показаний реактиметра, которые впоследствии сравнивались с результатами измерений, проведенных в процессе физического пуска энергоблоков № 3 Ростовской АЭС и № 1 Нововоронежской АЭС-2.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. V.A. Tereshonok, L.V. Kryakvin, V.A. Pitilimov, S.A. Karpov, V.I. Kulikov, N.M. Zhylmaganbetov, O.Yu. Kavun, A.I. Popykin, R.A. Shevchenko, S.A. Shevchenko, T.V. Semenova. Numerical Simulation of Measurements during the Reactor Physical Startup at Unit 3 of Rostov NPP. – Physics of Atomic Nuclei. – 2017. – V. 80. – No. 8. – p. 1370 – 1376.
2. В.И. Куликов, К.Ю. Куракин, Т.В. Семенова, Н.М. Жылмаганбетов, О.Ю. Кавун, А.А. Смирнова, А.И. Попыкин, Р.А. Шевченко, С.А. Шевченко, Н.В. Щукин. – Расчетное моделирование измерений на этапе физического пуска энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2. – Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2018. – Вып. 1. – с. 55-60.
3. В.И. Куликов, А.И. Попыкин, Н.М. Жылмаганбетов. – Расчетное моделирование измерений большой реактивности. – Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – Вып. 2. – с. 25-32.
4. A. Popykin, S. Shevchenko, R. Shevchenko, N. Zhylmaganbetov. Use of adjoint functions for comparing measured and calculated parameters in the subcritical systems. – In Proc.: International Conference PHYSOR 2014 – The Role of Reactor Physics Toward a Sustainable Future, September 28 – October 3, 2014, Kyoto, Japan. – p. 111.
5. В.И. Куликов, А.И. Попыкин, Н.М. Жылмаганбетов. – Использование решений неоднородных сопряженных задач для определения измеренной реактивности. – В сб.: Материалы семинара Нейтроника-2014 – Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики. – 21 октября – 24 октября, 2014 г., Обнинск, Россия. – с. 10 – 13.
6. В.И. Куликов, А.И. Попыкин, Н.М. Жылмаганбетов. – О соотношении реактивности и ее измеряемых аналогов. – В сб.: Материалы конференции Нейтроника-2015 – Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики. – 12 октября – 16 октября, 2015 г., Обнинск, Россия. – с. 27.
7. В.А. Терешонок, Л.В. Кряквин, В.А. Питилимов, С.А. Карпов, В.И. Куликов, Н.М. Жылмаганбетов, О.Ю. Кавун, А.И. Попыкин, Р.А. Шевченко, С.А. Шевченко, Т.В. Семенова. – Расчетное моделирование измерений на этапе физического пуска энергоблока № 3 Ростовской АЭС. – В сб.: Материалы конференции Нейтроника-2015 – Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики. – 12 октября – 16 октября, 2015 г., Обнинск, Россия. – с. 30.
8. Н.М. Жылмаганбетов, В.О. Кавун, О.Ю. Кавун. – Моделирование физических экспериментов на МКУ мощности по ПС «РАДУГА ЭУ». – В сб.:

Сборник тезисов Ввод АЭС в эксплуатацию – 4-я международная научно-техническая конференция. – 11 – 12 апреля, 2016 г., Москва, Россия. – с. 76.

9. A. Popykin, S. Shevchenko, R. Shevchenko, N. Zhylmaganbetov. Problem Formulation of Numerical Reactivity Measurement Simulation. – In Proc.: International Conference PHYSOR 2016 – Unifying Theory and Experiments in the 21<sup>st</sup> Century, May 1 – 5, 2016, Sun Valley, Idaho, USA. – p. 1835 –1846.

10. В.И. Куликов, А.И. Попыкин, Н.М. Жылмаганбетов. – Определение измеренной реактивности. – В сб.: Тезисы докладов научно-технической конференции Нейтроника-2016 – Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики. – 23 – 25 ноября, 2016 г., Обнинск, Россия. – с. 58 – 59.

11. Н.М. Жылмаганбетов. – Выбор конечного состояния системы для расчетного моделирования измерения реактивности методом сброса. – Технология обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. – 2016. – № 4 (6). – с. 34 – 44.

12. Zhylmaganbetov N.M. The Comparison of the Calculated and Measured Reactivity Efficiencies of Control Rods during the Safety Analysis of VVER Reactors– In Proc.: International Conference NENE 2017 – 26<sup>th</sup> International Conference Nuclear Energy for New Europe, September 11 – 14, 2017, Bled, Slovenia. – p. 91.

13. В.И. Куликов, Н.М. Жылмаганбетов, А.И. Попыкин. – Расчетное моделирование измерений большой реактивности. – В сб.: Тезисы докладов научно-технической конференции Нейтроника-2017 – Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики. – 29 ноября – 1 декабря, 2017 г., Обнинск, Россия. – с. 40 – 41.

14. V.I. Kulikov, K.Yu. Kurakin, T.V. Semenova, N.M. Zhylmaganbetov, O.Yu. Kavun, A.A. Smirnova, A.I. Popykin, R.A. Shevchenko, S.A. Shevchenko, N.V. Schukin. Numerical Simulation of the Measurements Performed during the Physical Startup Tests of Unit 1 of Novovoronezh II Nuclear Power Plant. – Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – V. 82. – No. 8. – p. 37 – 40.

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Типовые программы и методики проведения физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. Руководящий документ РД ЭО 0150-2004.

2. Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич. Экспериментальная физика реакторов. Энергоатомиздат. – М. – 1994 г.