

ШЕВЧЕНКО СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

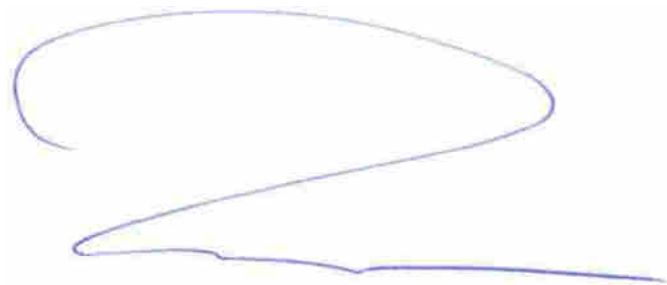
**РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВВОДА БОЛЬШОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ
РЕАКТИВНОСТИ В РЕАКТОРАХ ВВЭР**

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, 2016

Работа выполнена в Федеральном бюджетном учреждении «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

Научный руководитель: Попыкин Александр Иванович,
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник, начальник лаборатории,
ФБУ «НТЦ ЯРБ», г. Москва

Официальные оппоненты: Селезнев Евгений Федорович,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, заведующий лабораторией,
федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт проблем безопасного
развития атомной энергетики
Российской академии наук, г. Москва

Иванов Илья Евгеньевич,
кандидат физико-математических наук, научный
сотрудник акционерного общества «Всероссийский
научно-исследовательский институт по эксплуатации
атомных электростанций», г. Москва

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный
научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт
имени А.И. Лейпунского», г. Обнинск

Защита состоится 21 марта 2016 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 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://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

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

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор физико-
математических наук, профессор



И.И. Чернов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Понятие реактивности является одним из основных в физике, методах расчета и обосновании безопасности ядерных реакторов. Реактивность ρ определяется следующим выражением:

$$\rho = 1 - \frac{1}{k_{эф}}, \quad (1)$$

где $k_{эф}$ – эффективный коэффициент размножения нейтронов в активной зоне реактора. Реактивность количественно описывает переход реакторной установки (РУ) из одного состояния в другое, при этом определение (1) дано для наиболее распространенного случая, когда первое состояние реактора является критическим. Далее в рассматриваемых в настоящей работе примерах предполагается, что второе состояние реактора подкритическое (если не указано иное), то есть в формуле (1) $k_{эф}$ меньше единицы.

На практике реактивность чаще всего измеряется либо в эффективных долях запаздывающих нейтронов, либо в процентах от реактивности начального состояния реактора. При этом указанные единицы измерения используются для оценки эффективности таких важных для безопасности РУ систем и элементов как аварийная защита (АЗ) реактора, система управления и защиты (СУЗ), органы регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), группы ОР СУЗ.

В соответствии с требованиями действующих федеральных норм и правил (ФНП) в области использования атомной энергии результаты выполненных в процессе проектирования расчетов эффективности АЗ и других, связанных с реактивностью, характеристик активной зоны РУ, должны быть подтверждены путем измерений этих характеристик, выполняемых на минимально контролируемом уровне (МКУ) мощности во время физического пуска реакторной установки (п. 3.1.1, 3.1.3 и 3.1.10 НП-082-07¹).

Измерение эффективности ОР СУЗ, групп ОР СУЗ и АЗ на действующих энергоблоках АЭС, как правило, проводится методом сброса стержней. Величина реактивности (1) в этом случае может быть достаточно большой, а распределение плотности потока нейтронов при переходе из первого состояния (до сброса АЗ) во второе (после сброса АЗ) существенно меняется. Конечное (подкритическое состояние РУ) можно охарактеризовать с помощью измерений только при наличии дополнительного (внешнего) источника нейтронов и соответствующего детектора. При этом результат таких измерений будет зависеть как от характеристик источника

¹ НП-082-07 – правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций, утверждены приказом Ростехнадзора от 10.12.2007 № 4;

и детектора, так и от их взаимного расположения. На практике, например, при определении эффективности АЗ и групп ОР СУЗ методом сброса стержней на АЭС с ВВЭР, измерение реактивности осуществляется с помощью ионизационных камер (ИК), расположенных за пределами активной зоны в бетоне биологической защиты РУ, сигнал которых обрабатывается реактиметром с использованием обращенного решения уравнения кинетики (ОРУК). Таким образом, «измерение» величины (1) на самом деле представляет собой определение этой величины расчетно-экспериментальным путем.

Руководствуясь «Положением о рекомендациях по сопоставлению рассчитанной и измеренной реактивности при обосновании ядерной безопасности реакторных установок с ВВЭР» (РБ-074-12), под рассчитанной реактивностью в настоящей работе будет пониматься величина, полученная из соотношения (1). В документе РБ-074-12 также даются определения измеренной реактивности и реактивности, полученной в результате расчетного моделирования измерений. Измеренная реактивность для реакторов ВВЭР – это показания реактиметра, в котором реализуется метод ОРУК. В соответствии с РБ-074-12 реактивность, полученная в результате расчетного моделирования измерения – это реактивность, определенная расчетным путем при моделировании переходного процесса между двумя состояниями реактора. Такая реактивность может сравниваться с результатами измерений напрямую, без введения каких-либо поправок. Эта величина показывает различие (в том числе количественное) между величиной (1) и ее измеренным аналогом, и позволяет сопоставить их.

Сопоставление измеренных и рассчитанных характеристик реактора, определяемых через реактивность, необходимость которого вытекает из требований НП-082-07, является неотъемлемой частью обоснования безопасности АЭС. Убедиться в корректности проведения таких сопоставлений – важная задача органа регулирования безопасности при использовании атомной энергии (Ростехнадзор). Поэтому исследование особенностей расчетного моделирования измерения реактивности и подходов по сопоставлению этих расчетов с результатами измерений, которое по заданию Ростехнадзора проводилось специалистами ФБУ «НТЦ ЯРБ», являются важными задачами, как регулирования, так и обеспечения безопасности АЭС с ВВЭР. В связи с этим развитие и разработка методов расчетного моделирования ввода больших реактивностей в эксплуатируемых реакторах ВВЭР-1000 и верификации соответствующих алгоритмов расчетов является актуальными.

Цель работы. Целью настоящей работы явилось создание методики расчетного моделирования измерений реактивности, выполняемых эксплуатирующей организацией на реакторах ВВЭР-1000, для повышения качества экспертизы

обоснования безопасности АЭС с ВВЭР и аттестации соответствующих программных средств (ПС). Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

- разработана расчетная модель РУ ВВЭР-1000, включая разработку и программную реализацию методики расчета нейтронно-физических характеристик ТВС (библиотек констант);
- проведена верификация разработанной расчетной модели РУ ВВЭР-1000;
- разработана и верифицирована методика расчетного моделирования показаний ИК, размещаемых в бетоне биологической защиты РУ, в том числе методика расчетного моделирования показаний реактиметра.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- разработана и реализована оригинальная методика расчета потока нейтронов в месте расположения ИК;
- разработана и верифицирована новая методика расчета двухгрупповых констант ТВС с использованием программы «WIMS/D-5B» для современных топливных циклов реакторов ВВЭР;
- впервые верифицирована последовательная методика расчетного моделирования измерения больших отрицательных реактивностей в реакторах ВВЭР, разработанная в ФБУ «НТЦ ЯРБ»;
- исследованы и впервые системно изложены основные особенности ввода больших отрицательных реактивностей в реактор ВВЭР с точки зрения влияния на формируемый сигнал ИК.

Практическая значимость работы определяется использованием результатов проведенных расчетно-аналитических исследований в рамках процедуры аттестации ПС, используемых при обосновании безопасности АЭС с ВВЭР, выполняемой специалистами ФБУ «НТЦ ЯРБ» по поручению Ростехнадзора. Кроме того, результаты настоящей работы учитывались при разработке следующих руководств по безопасности при использовании атомной энергии.

- Положение о рекомендациях по сопоставлению рассчитанной и измеренной реактивности при обосновании ядерной безопасности реакторных установок с ВВЭР (РБ-074-12), утверждено приказом Ростехнадзора от 24.04.2012 № 264.

- Положение о проведении верификации и экспертизы программных средств по направлению «Нейтронно-физические расчеты» (РБ-061-11), утверждено приказом Ростехнадзора от 06.05.2011 № 228.

Разработанные в рамках настоящей работы подходы могут быть использованы при совершенствовании действующих в отрасли процедур по экспериментальному

подтверждению рассчитываемых нейтронно-физических характеристик РУ, прежде всего, эффективности АЗ, и эффектов и коэффициентов реактивности.

Достоверность представленных в диссертации расчетных данных подтверждена:

– результатами верификации методики расчета библиотек нейтронно-физических характеристик ТВС (двухгрупповых констант) активных зон РУ с ВВЭР-1000, выполненной путем сравнения с результатами эксплуатационных измерений, а также результатами независимых расчетов, выполненных с помощью других ПС (кросс-верификация);

– результатами сравнения реактивности и тока ИК, полученных в результате расчетного моделирования измерений, с результатами измерений, выполненных на действующих энергоблоках РУ с ВВЭР-1000, а также с результатами независимых расчетов по другим программам;

– использованием общих положений теории реакторов для нестационарных моделей с учетом и без учета запаздывающих нейтронов.

Основные положения, выносимые на защиту:

– разработанная методика и результаты расчета функций (коэффициентов) влияния активной зоны для определения тока ИК при вводе больших реактивностей;

– методика расчетного моделирования измерения реактивности в реакторах ВВЭР-1000;

– методика и результаты расчета двухгрупповых нейтронно-физических характеристик (библиотек констант) ТВС, используемых в современных топливных циклах реакторов ВВЭР.

Личный вклад автора. Автор совместно со специалистами ФБУ «НТЦ ЯРБ», АО «ВНИИАЭС», НИЦ «Курчатовский институт» и АО «Атомпроект» принимал участие в следующих работах:

– разработка расчетной модели РУ ВВЭР-1000 с использованием аттестованного ПС «Радуга-7.5»;

– верификация расчетной модели РУ ВВЭР-1000 путем сопоставления с результатами расчетов по аттестованным ПС и с результатами экспериментов, выполненных на действующих энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000;

– разработка и верификация расчетного моделирования измерения реактивности (расчетная модель реактиметра);

– разработка руководств по безопасности при использовании атомной энергии, содержащих рекомендации по выполнению сопоставления рассчитанной и измеренной реактивности для РУ с ВВЭР.

Автором лично выполнены следующие работы:

- разработана методика расчета нейтронно-физических характеристик (библиотек констант) ТВС РУ ВВЭР-1000, реализованная в виде программного модуля «LC1000» для ПС «WIMS/D-5B»;
- разработана и верифицирована методика расчета граничных условий для уравнения переноса нейтронов в диффузионном двухгрупповом приближении;
- получены библиотеки нейтронно-физических характеристик (библиотеки констант) ТВС, используемых в переходных и стационарных топливных загрузках энергоблока № 3 Калининской АЭС и энергоблока № 4 Балаковской АЭС, включая верификацию рассчитанных библиотек;
- проведена серия нестационарных расчетов с последующим анализом нейтронно-физических характеристик РУ энергоблока № 3 Калининской АЭС и энергоблока № 4 Балаковской АЭС с использованием ПС «Радуга 7.5»;
- разработана модель расчета потока нейтронов в местах расположения ИК реакторных установок ВВЭР-1000 в процессе изменения мощности РУ; в том числе рассчитаны функции влияния, учитывающие вклад ТВС в формирование потока нейтронов в месте расположения ИК в зависимости от расположения ТВС в активной зоне РУ ВВЭР-1000, которые использовались в расчетной модели измерения реактивности;
- 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.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 118 страницах, содержит 38 рисунков и 12 таблиц; перечень использованных источников включает 68 наименований.

Апробация работ. Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах, совещаниях и конференциях: Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» Нейтроника-2006, Нейтроника-2007, Нейтроника-2008, Нейтроника-2009, Нейтроника-2010, Нейтроника-2012, Нейтроника-2013, Нейтроника-2014 (г. Обнинск, Россия, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2012, 2013 и 2014 гг.); The Physics of Reactors conference PHYSOR-2012 (Knoxville, USA, 2012) и PHYSOR-2014 (Kyoto, Japan, 2014); Workshop on New Aspects and Developments of Calculations, Evaluations and Assessments in the Field of Reactor Physics (Garching, Germany, 2009); IAEA Regional Workshop on Application of CFD Codes in Nuclear Safety (Budapest, Hungary, 2008).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ в научных журналах и сборниках трудов Международных и Российских конференций, совещаний и семинаров, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** сформулирована задача, решению которой посвящена диссертация, она заключается в следующем. В федеральных нормах и правилах установлены определенные требования к реактивности, которая определяется формулой (1). Одним из таких требований является подтверждение результатов проектных расчетов путем проведения измерений на действующих установках. Реактивность реактора ВВЭР, определяемая с помощью реактиметра в процессе сброса ОР СУЗ по сигналу ионизационных камер, расположенных в бетоне биологической защиты РУ, как правило, отличается от величины (1). Наибольшие расхождения результатов расчетов и измерений наблюдаются при определении эффективности АЗ, характеризующейся большой отрицательной реактивностью. Указанные расхождения фиксируются в актах проведения измерений и затем учитываются при обосновании безопасности. Обычно эти расхождения снижаются за счет введения поправок.

Два стационарных расчета, результаты которых лежат в основе вычисления реактивности по формуле (1) (первый расчет – до сброса стержней, второй – после сброса), как правило, сильно взаимосвязаны. При расчете эффективности АЗ, групп ОР СУЗ или отдельного ОР СУЗ состояния рассчитываемой системы определяются только положением поглощающих стержней. В начальном состоянии переходного процесса ОР СУЗ, как правило, находятся в крайнем верхнем положении (на верхнем концевом выключателе), а в конечном состоянии – на нижнем концевом выключателе. При этом при проведении расчетов по формуле (1) предполагается, что изменение мощности происходит мгновенно. Характер переходного процесса при расчете по формуле (1) не принимается во внимание, рассматриваются только два стационарных состояния переходного процесса – начальное и конечное. Однако при проведении измерений реактивности характер переходного процесса может сыграть существенную роль при определении величины измеряемой реактивности.

Наряду с методом сброса стержней существуют другие методы определения реактивности, в том числе импульсный метод и метод компенсации одного поглотителя другим. Так, например, если в конечном состоянии переходного

процесса, в котором исследуемая система находится в подкритическом состоянии, используя импульсный источник нейтронов и соответствующий ему детектор можно определить логарифмический декремент затухания потока мгновенных нейтронов (константу спада). Указанная константа позволяет определить эффективный коэффициент размножения исследуемого состояния. Кроме того, асимптотическое распределение мгновенных нейтронов будет соответствовать собственной функции стационарного уравнения переноса нейтронов, которая соответствует $k_{эф}$ системы. К сожалению, в энергетических реакторах на тепловых нейтронах на практике такое измерение провести не всегда возможно.

Как указывалось выше, в реакторах ВВЭР при определении эффективности ОР СУЗ, групп ОР СУЗ, и АЗ проектом предусмотрено измерение реактивности методом сброса стержней, т.е. на запаздывающих нейтронах. При этом воспользоваться асимптотическим режимом РУ (при котором кинетика реактора корректно описывается точечным приближением), нельзя, поскольку при измерении эффективности АЗ в реакторе ВВЭР-1000 асимптотика достигается не ранее, чем через 500 секунд после сброса стержней. При этом возникают проблемы точности измерений, связанные с ослаблением сигнала, поступающим на ИК.

При сопоставлении измеренной и рассчитанной реактивностей используют так называемые поправки, позволяющие скорректировать результаты измерений и приблизить их к результатам расчетов, выполненных при обосновании безопасности. Суть поправок сводятся к следующему.

Скорректированный ток ИК I_{corr} можно определить как

$$I_{corr}(t) = \frac{I(t)}{I_{расч}(t)} J(t), \quad (2)$$

где I_{corr} – скорректированный ток ИК, I – измеренный ток ИК, $I_{расч}$ – рассчитанный ток ИК, $J(t)$ – функционал, полученный с использованием решения задачи на определение $k_{эф}$, который является аналогом измеренного тока.

Смысл поправки к измеренному току заключается в замене одной величины на другую. Полная погрешность реактивности, будет также зависеть и от констант запаздывающих нейтронов, так как для определения рассчитанного тока ИК $I_{расч}$ требуется расчетное моделирование сброса АЗ. Для этой цели используются программы совместного нестационарного нейтронно-физического расчета. Последовательное использование такой поправки и определение ее погрешности достаточно сложно реализовать на практике.

Для того, чтобы последовательно учесть различия реактивности, определяемой из стационарного решения (1), и измеренной, решена задача об определении реактивности, полученной в результате расчетного моделирования измерения, и

изучении её свойств. В предлагаемой в диссертации методике определения реактивности лежит расчетное моделирование переходных процессов при сбросе ОР СУЗ и АЗ, выполняемое с помощью программы совместного нестационарного нейтронно-теплогидравлического расчета, а также расчет плотности потока нейтронов в месте расположения ИК, источником которого является активная зона реактора. Реактивность, полученная в результате расчетного моделирования измерения, может сравниваться непосредственно с измеренной реактивностью. С ее помощью можно установить различие между измеренной реактивностью и реактивностью, определенной из (1).

В главе 1 также приведено краткое описание ПС, которые использовались при подготовке диссертации («WIMS/D-5B», «Радуга-7.5» и «MCNP-4C»).

Во **второй** главе представлено описание методики расчета двухгрупповых диффузионных констант, необходимых для проведения совместных нестационарных нейтронно-теплогидравлических расчетов реакторов ВВЭР. Методика, основанная на использовании программы «WIMS/D-5B», реализована в разработанном диссертантом ПС «LC1000».

ПС «WIMS/D-5B» обеспечивает решение уравнения переноса нейтронов методом вероятности первых столкновений и методом дискретных ординат. ПС позволяет проводить расчет в двумерной кластерной геометрии. Кластерная геометрия представляет собой набор стержней (имеющих кольцевую внутреннюю структуру), которые располагаются в круге или квадрате. При расчете констант ТВС реактора ВВЭР ячейкой является поперечное сечение ТВС с соответствующей долей межкассетной воды. При этом шестиугольник в сечении преобразуется в равный по площади круг и используется специальное (по кольцам) расположение твэлов в ТВС.

Константы являются функциями следующих аргументов:

$$C_k^{(g)} = f(T_{\text{тн}}, \rho_{\text{тн}}, T_{\text{топл}}, C_{\text{бор}}, B), \quad (3)$$

где $g = 1, 2$ номер энергетической группы, (здесь и далее больший номер группы соответствует меньшей энергии нейтронов); $T_{\text{тн}}$ – температура теплоносителя (воды); $\rho_{\text{тн}}$ – плотность теплоносителя; $T_{\text{топл}}$ – температура топлива; $C_{\text{бор}}$ – концентрация бора; B – выгорание топлива; $C_k^{(g)}$ – одна из следующих величин: $D^{(g)}$ (коэффициент диффузии), $\Sigma_a^{(g)}$ (сечение поглощения и увода), $\nu\Sigma_f^{(g)}$ (источник деления), $\Sigma_{\text{зам}}$ (сечение замедления), $\Sigma_f^{(g)}$ (сечение деления), $\sigma_{135}^{(g)}$ (микросечение поглощения ксенона Xe^{135}), $\sigma_{149}^{(g)}$ (микросечение поглощения самария Sm^{149}), $V^{(g)}$ (скорость нейтронов); g – номер энергетической группы.

Совокупность параметров ($T_{\text{тн}}, \rho_{\text{тн}}, T_{\text{топл}}, C_{\text{бор}}, B$) представляет собой опорную сетку библиотеки, в узлах которой расположены группы констант.

Основной особенностью алгоритма расчета библиотеки является автоматизация подготовки файлов исходных данных для ПС «WIMS/D-5B», в которых поочередно перебираются все параметры узлов опорной сетки. Автоматизированный расчет основан на формировании файла исходных данных, описывающего ТВС реактора, который автоматически модифицируется в соответствии с параметрами, отвечающими очередному узлу опорной сетки. Для каждого типа ТВС формируется собственный файл исходных данных, который является основой для всех последующих этапов расчета.

Константы являются функциями выгорания топлива, поэтому подготовка библиотеки констант состоит из двух этапов:

- расчет изотопного состава топлива в ТВС на всех шагах по выгоранию;
- расчет констант и компиляция библиотеки.

Вся процедура расчета выполняется в пакетном файле, в котором организован цикл расчета. На рисунке 1 представлена схема расчета констант (схема расчета изотопного состава топлива приведена в тексте диссертации).

Окончательные файлы библиотеки констант *conststv.lib* являются форматированными файлами последовательного доступа. В том случае если ПС, для которого предназначена библиотека констант, обладает собственными средствами интерполяции (как, например, ПС «Радуга-7.5», которое использовалось при проведении расчетов для настоящей диссертационной работы), то на этом процесс подготовки констант заканчивается. В противном случае интерполяция может проводиться средствами ПС «LC1000», в котором реализовано два алгоритма, (быстродействующий – линейная интерполяция, и более точный – интерполяция сплайн-поверхностью). ПС «LC1000» обеспечивает возможность расчета диффузионных двухгрупповых констант для ячеек (кассет), не содержащих источника нейтронов, а также расчет граничных условий для нейтронно-физической расчетной модели РУ – токов и потоков нейтронов на границе активной зоны РУ и отражателя.

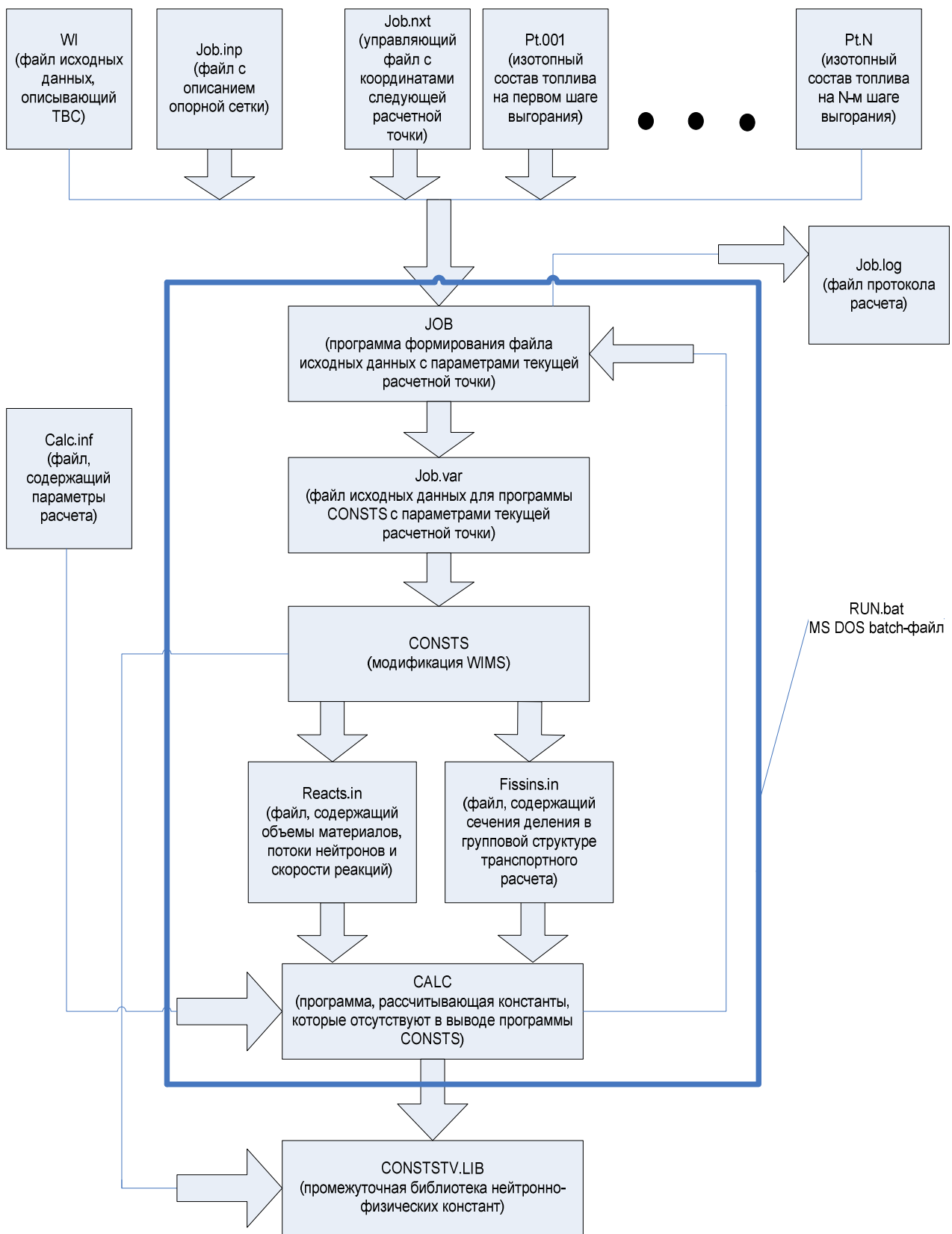


Рисунок 1 – Алгоритм расчета констант, реализованный в ПС «LC1000»

В **третьей главе** приведены результаты верификации ПС «LC1000». Точность расчета реактивности при моделировании измерений эффективности ОР СУЗ, групп ОР СУЗ и АЗ зависит от точности расчета распределения плотности потока нейтронов, которая в свою очередь определяется качеством расчета диффузионных констант. Измерения эффективности ОР СУЗ осуществляются, в основном, на МКУ мощности РУ, при этом распределение энерговыделения на МКУ мощности не входит в список аттестованных параметров (имеющих заранее подтвержденную верификацией обоснованную величину погрешности) ПС, применяемых для расчетного сопровождения эксплуатации РУ с ВВЭР.

В работе приведены три верификационных примера, в которых результаты выполненных диссертантом расчетов сравнивались с измерениями, выполненными при физическом пуске энергоблока № 3 Калининской АЭС (первая начальная загрузка с УГТ); с результатами измерений в процесс 16^{-ой} (переходной) топливной кампании энергоблока № 4 Балаковской АЭС при переходе на полугодовой топливный цикл; с нестационарным изменением мощности РУ в переходном процессе, обусловленном отключением двух из четырех работающих ГЦН, во время испытаний при энергетическом пуске энергоблока № 3 Калининской АЭС.

Результаты расчетов распределения энерговыделения на МКУ мощности энергоблока № 3 Калининской АЭС, выполненных автором с помощью ПС «Радуга-7.5» с библиотекой констант, полученной по ПС «LC1000», хорошо согласуются с результатами, полученными по ПС сопровождения эксплуатации РУ с ВВЭР «БИПР-7А» (максимальные расхождения не превысили 5 %). Кроме того, результаты расчетов изменения концентрации борной кислоты в процессе кампании, так же хорошо согласуются с результатами аналогичных расчетов, выполненных по другим, независимым ПС «ТРЕК» и «САПФИР_95_RC_ВВЭР2» (расхождения не превышают 0,3 г/кг).

В **главе 4** приведены качественные особенности, касающиеся определения измеренной реактивности, которые подтверждены расчетными примерами. Они имеют практическое значение при расчетном моделировании измеренной реактивности. Отдельные выводы были известны и опубликованы ранее, однако систематическое изложение приводится впервые.

Реактивность, определяемая из условно-критической задачи (расчетная реактивность), и измеряемая реактивность – разные величины. Они обусловлены разными распределениями плотности потоков нейтронов и, как следствие, энерговыделения. Причинами расхождения рассчитанных и измеренных реактивностей являются свойства асимптотических решений нестационарной задачи для уравнения переноса нейтронов с учетом и без учета запаздывающих нейтронов и

свойства решения условно-критической задачи, а также тот факт, что измерения реактивности проводятся на временах, характерных для нестационарного изменения концентраций ядер-предшественников запаздывающих нейтронов.

При вводе больших реактивностей распределение плотности потоков нейтронов, и, как следствие энерговыделения, стабилизируется после окончания перемещения ОР СУЗ, но не выходит на асимптотику, соответствующую нестационарной задаче, решенной с учетом запаздывающих нейтронов.

Нестационарное изменение энерговыделения в процессе ввода больших реактивностей соответствует нестационарному изменению концентраций ядер-предшественников запаздывающих нейтронов. Свойства такого источника определяются распределением мощности перед началом переходного процесса (сброса АЗ, групп ОР СУЗ). По этой причине источник нейтронов слабо зависит от пространственной координаты, хотя и изменяется во времени за счет распада предшественников запаздывающих нейтронов.

При расчете измеренной реактивности используются сложные методы расчета: решение нестационарной задачи с учетом запаздывающих нейтронов, решение уравнения переноса для определения нестационарного изменения сигнала ИК и т.д. Поэтому сделанные качественные выводы важны для того чтобы определить возможные ошибки расчетов, выполняемых при обосновании безопасности АЭС с ВВЭР.

В главе 5 приведено описание методики расчетного моделирования измерения реактивности. Применение методики иллюстрируется двумя примерами: моделированием измерения реактивности в процессе физического пуска энергоблока № 3 Калининской АЭС (картограмма активной зоны, а также схема расположения ИК приведены на рисунке 2) и моделированием показаний двух ИК (№ 4 и 6) в процессе 16 топливной кампании энергоблока № 4 Балаковской АЭС.

В основе методики расчетного моделирования реактивности лежит расчет изменения токов ИК в течение переходного процесса, обусловленного вводом реактивности. Токи рассчитываются с помощью заранее определенных коэффициентов влияния, которые являются коэффициентами пропорциональности, учитывающими расположение отдельных ТВС активной зоны относительно ИК. Основной вклад в формирование сигнала ИК вносят нейтроны, рожденные в ТВС последнего ряда активной зоны (см. рис. 3 и 4). При этом от активной зоны до ИК долетают только нейтроны спектра деления, замедляющиеся в бетоне биологической защиты до тепловых энергий. Эти свойства, вначале установленные с помощью вариантных расчетов, затем были доказаны с использованием функции ценности.

На рисунках 3 и 4 показан рассчитанный вклад рядов ТВС в формирование плотности потока нейтронов в месте расположения ИК и относительный вклад в этот поток отдельных ТВС 7-го ряда активной зоны РУ. Представленные результаты расчетов свидетельствуют о том, что ток ИК формируется, в основном, последним рядом ТВС. По программе «MCNP-4C» были рассчитаны коэффициенты влияния для каждой ТВС последнего ряда активной зоны, распределенные по высоте ТВС. Затем локальная мощность кассеты с учетом распределения по высоте умножалась на эти коэффициенты, что позволило получить вклад этого участка ТВС в формирование тока ИК.

Согласно нормативному документу эксплуатирующей организации «Методика расчета нейтронно-физических характеристик по данным физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000» (РД ЭО 0151-2004) измеренная реактивность определяется следующим выражением:

$$\frac{\rho_k(t)}{\beta} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N a_i \lambda_i \int_{-\infty}^t I(t') \exp(\lambda_i(t' - t)) dt'}{I(t)}. \quad (4)$$

В выражении (4) $I(t)$ – измеренный ток, β – доля запаздывающих нейтронов, λ_i – постоянная распада i -ой временной группы запаздывающих нейтронов, a_i – парциальные доли запаздывающих нейтронов.

Величина, полученная из выражения (4), при известных константах запаздывающих нейтронов однозначно связана с током ИК. В таблице приведено сравнение результатов измерений эффективности аварийной защиты, которые были выполнены с использованием формулы (4), с результатами расчетного моделирования измерения реактивности, проведенного автором диссертации, а также с результатами стационарных расчетов, также выполненных автором диссертации.

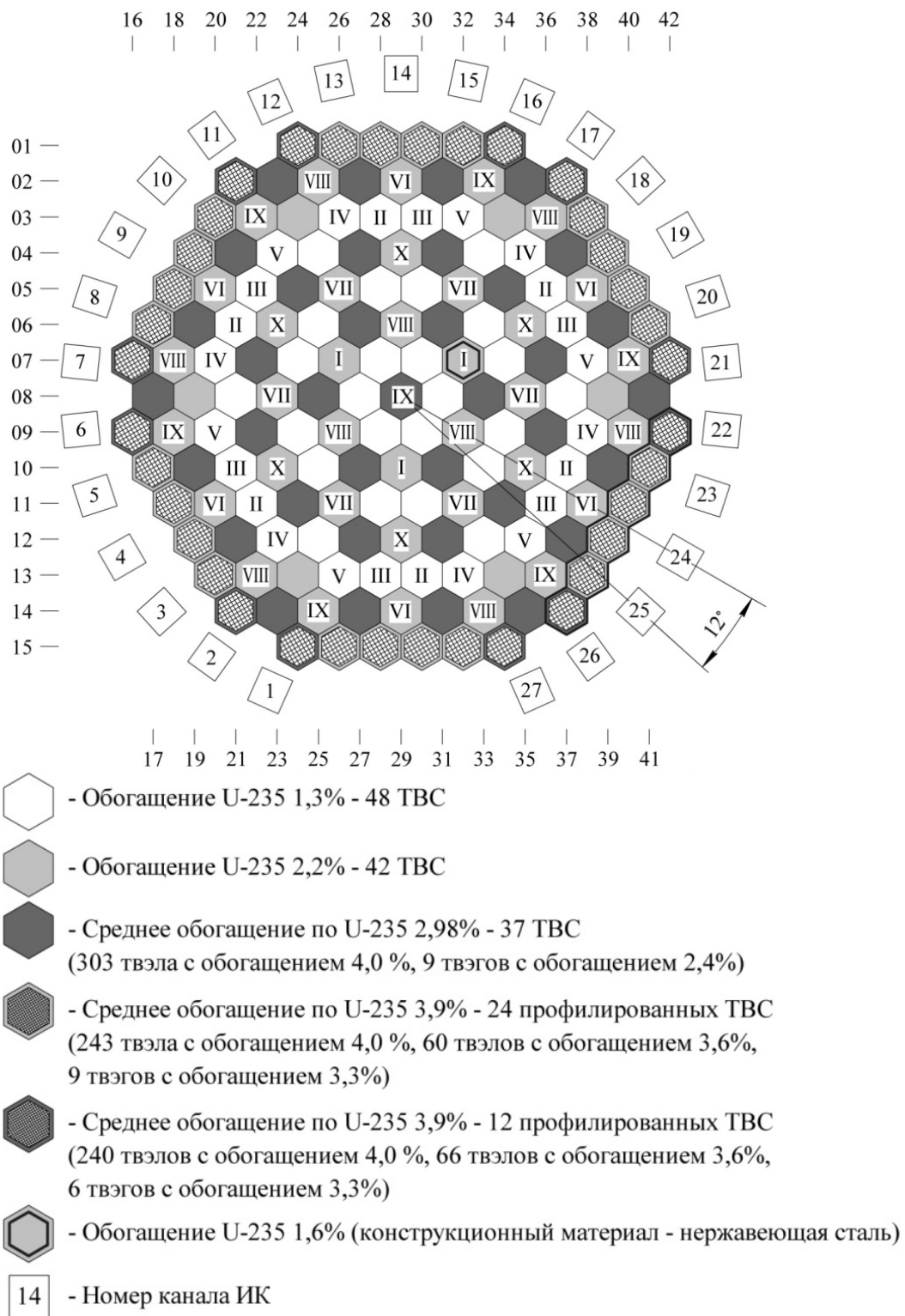


Рисунок 2 – Картограмма первой топливной загрузки энергоблока № 3 Калининской АЭС со схемой расположения каналов ИК, ОР СУЗ и их распределения по группам

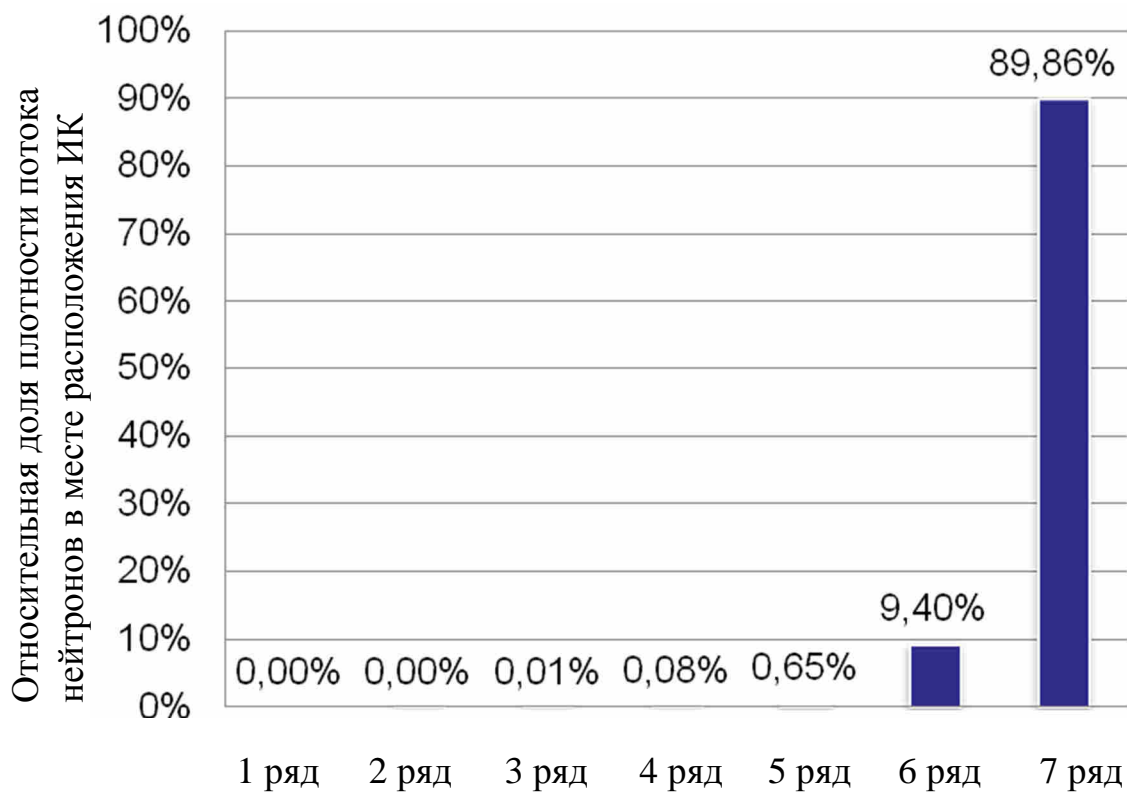


Рисунок 3 – Вклад каждого ряда ТВС активной зоны в величину плотности потока тепловых нейтронов в месте расположения ИК

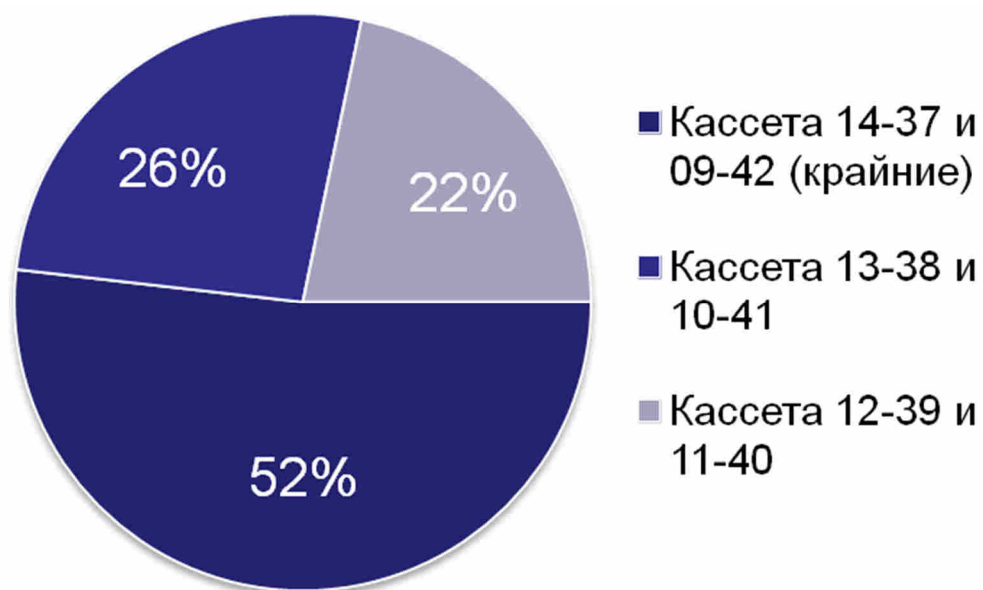


Рисунок 4 – Вклад отдельных ТВС 7-го ряда в величину плотности потока тепловых нейтронов в месте расположения ИК (нумерация ТВС соответствует нумерации рис. 2)

Таблица – Результаты расчетов и измерений эффективности аварийной защиты, выполненных во время физического пуска энергоблока № 3 Калининской АЭС, реактивность в % $\Delta k_{эф}$

| | Измерение | Расчетное моделирование измерения | Стационарный расчет |
|--|------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Полная эффективность АЗ | 6,4 | 6,34 | 7,27 |
| С имитацией застревания стержня с координатами 13-36 | 4,5 ¹ | 4,81 ¹ | 5,49 ¹ |
| | 6,4 ² | 6,33 ² | 7,27 ² |
| С имитацией застревания стержня с координатами 11-38 | 5,3 ¹ | 5,03 ¹ | 5,69 ¹ |
| | 6,4 ² | 6,33 ² | 7,27 ² |
| ¹ - с имитацией застревания ОР СУЗ ² - при добросе застрывшего ОР СУЗ (суммарный) | | | |

Далее в главе приведено описание расчетного теста показаний двух ИК, который был разработан на основании следующих данных. Рассчитывалось начало 16 топливной кампании энергоблока № 4 Балаковской АЭС. Загрузка этой кампании близка к стационарному состоянию по перегрузкам полугодового топливного цикла. Сброс АЗ фиксируется двумя ИК № 4 и 6. Переходный процесс моделируется путем нестационарного расчета по ПС «Радуга-7.5» и «NOSTRA». Нодализация схемы, используемые в ПС, никак не согласовывались, при этом каждая из программ имела свою библиотеку констант и свою систему параметров точечной кинетики. Все параметры расчетного теста соответствовали проекту РУ В-320. Время сброса АЗ составило 2 секунды.

Процесс ввода реактивности удобнее характеризовать изменением логарифма тока ИК. На рисунке 5 приведены результаты сравнения логарифмов токов ИК при сбросе АЗ, рассчитанные по ПС «Радуга-7.5» и «NOSTRA», соответствующие зависимости реактивностей приведены на рисунке 6. Оба метода расчета дают близкие результаты и на асимптотике правильно описывают различия показаний двух ИК, обусловленные их расположением.

Таким образом, представленная в работе методика обеспечивает хорошее совпадение результатов расчета не только с результатами измерений тока ИК, но и с результатами, полученными с помощью альтернативных аттестованных программных средств.

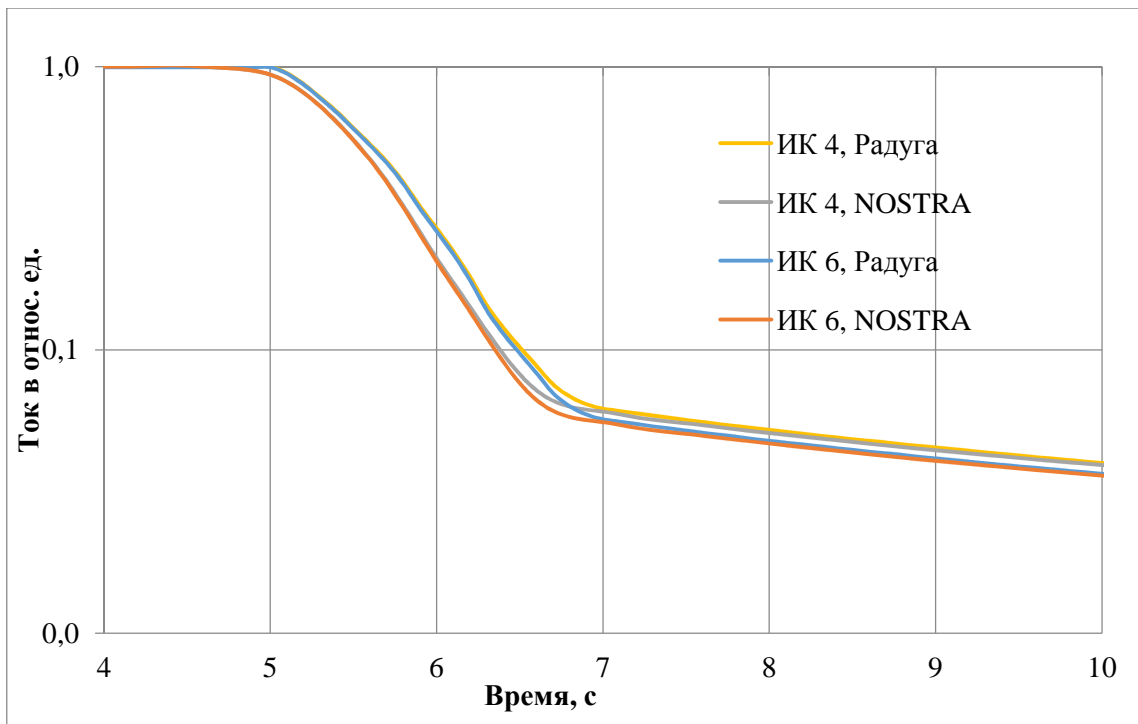


Рисунок 5 – Зависимости от времени логарифмов токов ИК № 4 и № 6 в процессе определения эффективности АЗ энергоблока № 4 Балаковской АЭС (сопоставление результатов расчетов ПС «Радуга-7.5» и «NOSTRA»)

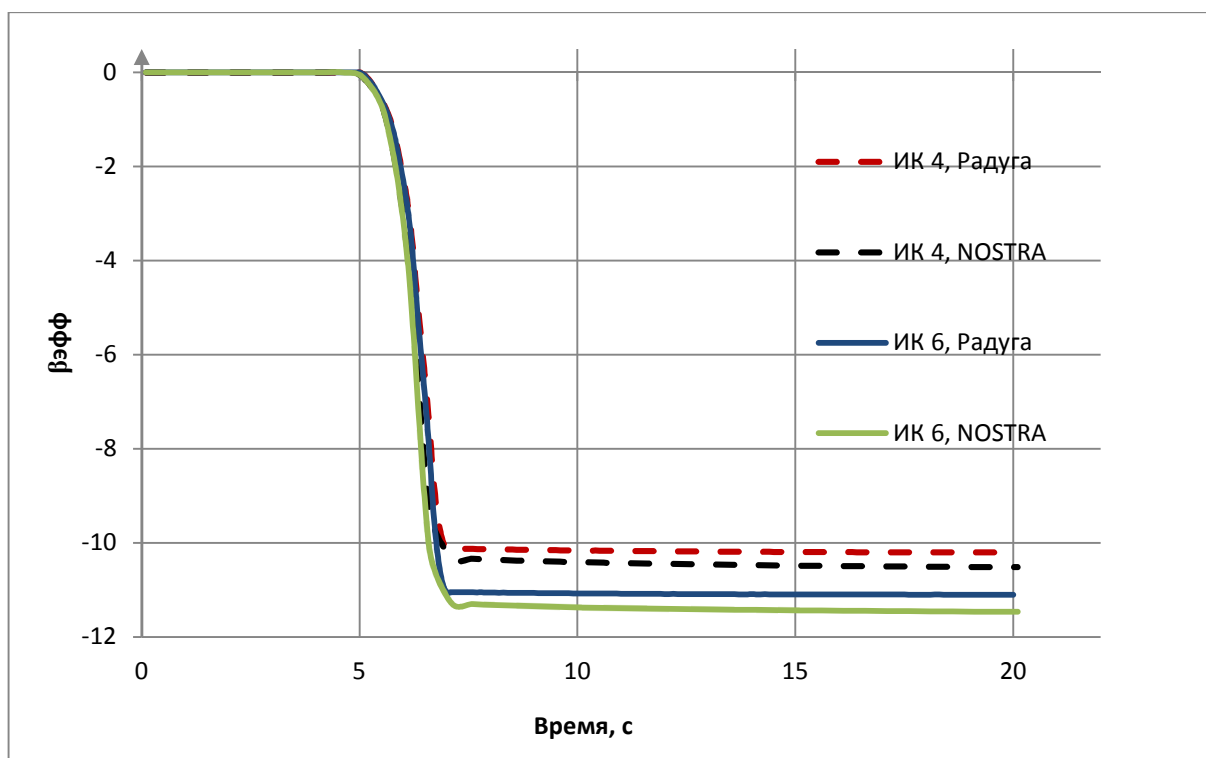


Рисунок 6 – Зависимости от времени реактивностей по ИК № 4 и № 6 в процессе определения эффективности АЗ энергоблока № 4 Балаковской АЭС (сопоставление результатов расчетов ПС «Радуга-7.5» и «NOSTRA»)

Поскольку определение измеренной реактивности согласно РД-ЭО-0151-2004 предполагает расчетную обработку тока ИК по простой формуле, измеренная реактивность и реактивность, полученная в результате расчетного моделирования измерения, так же показывают хорошее совпадение.

Библиотека нейтронно-физических констант, полученная по ПС «LC1000», в частности, верифицируется на тех же измерениях в процессе физического пуска реактора, для которых рассчитываются токи ИК. Таким образом, методика расчета токов ИК является полностью замкнутой и не опирается на расчеты, выполненные по другим программам. Это дает возможность проводить независимые от проектной и эксплуатирующей организаций поверочные расчеты при экспертизе безопасности АЭС с ВВЭР.

В главе 6 представлены рекомендации по сопоставлению измеренной и рассчитанной реактивности. Эти рекомендации лежат в основе руководств по безопасности РБ-074-12 и РБ-061-11, и развиваются, основываясь на полученные в диссертации результаты.

Рекомендации опираются на тот факт, что рассчитанная и измеренная реактивности являются разными величинами. Существенного различия эти величины достигают при измерении больших реактивностей, например, при определении эффективности АЗ.

Существуют аттестованные ПС, используя которые можно определить погрешность рассчитанной реактивности (1). Это программы инженерного расчета, предназначенные для проектирования топливных циклов и эксплуатационных расчетов реакторов ВВЭР, а также прецизионные программы, например, реализующие решение уравнения переноса методом Монте-Карло. Погрешность решения последних при соответствующей квалификации расчетчика определяется, как правило, неопределенностью оцененных ядерных данных. Таким образом, при использовании аттестованных программ расчета, можно определить погрешность (1) для использования ее в дальнейшем при обосновании безопасности действующих и проектируемых РУ с ВВЭР.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчетного моделирования измерений большой отрицательной реактивности в реакторах ВВЭР. Отличительная особенность методики заключается в том, что она является замкнутой, то есть не использует каких-либо дополнительных расчетов для получения конечного результата, что

позволяет проводить независимые поверочные расчеты при экспертизе обоснования безопасности АЭС с ВВЭР.

2. Предложена методика расчета библиотек двухгрупповых нейтронно-физических констант активных зон РУ с ВВЭР, основанная на использовании ПС «WIMS/D-5B». Для ее реализации разработано ПС «LC1000», которое использовалось для подготовки библиотек двухгрупповых диффузионных констант для различных энергоблоков РУ с ВВЭР. С применением этих библиотек рассчитаны различные топливные циклы эксплуатируемых энергоблоков с РУ В-320, включая установки с полуторагодовым топливным циклом. Сравнения расчетов с эксплуатационными измерениями показали, что погрешности расчетов не превышают соответствующих величин, установленных в аттестационных паспортах ПС «БИПР-7А» и «САПФИР_95_RC_ВВЭР2».

3. Показано, что при вводе больших отрицательных реактивностей распределение плотности потоков нейтронов, и, как следствие энерговыделения, стабилизируется после окончания перемещения ОР СУЗ, но не выходит на асимптотику, соответствующую нестационарной задаче с учетом запаздывающих нейтронов. Пространственное распределение источника запаздывающих нейтронов в активной зоне при сбросе групп ОР СУЗ и АЗ незначительно зависит от времени. Эти свойства важны для анализа расчетных результатов при решении сложной задачи моделирования измеренной реактивности.

4. Показана возможность проведения расчетов непосредственно измеряемых в процессе ввода реактивности величин, а именно, токов ИК. Для этого, с помощью заранее определенных коэффициентов влияния, учитывающих расположение ТВС относительно ИК, были рассчитаны изменения токов ИК в течение переходных процессов по определению эффективности аварийной защиты энергоблока № 3 Калининской АЭС и энергоблока № 4 Балаковской АЭС. Указанные переходные процессы рассчитывались с использованием совместной нестационарной нейтронно-теплогидравлической модели РУ ВВЭР-1000, реализованной в ПС «Радуга-7.5», которая, включала в себя разработанную программу расчета библиотек двухгрупповых диффузионных констант ТВС «LC1000». Библиотеки верифицировались с использованием результатов тех же измерений на этапе физического пуска, для которых рассчитываются токи ИК. Таким образом, методика расчетов токов ИК не содержит расчетов, выполненных по другим программам, и каких-либо поправок.

5. Рекомендации о сопоставлении измеренной и рассчитанной реактивности сформулированы в «Положении о рекомендациях по сопоставлению рассчитанной и измеренной реактивности при обосновании ядерной безопасности реакторных

установок с ВВЭР» (РБ-074-12). В работе продемонстрированы результаты расчетов реактивности, определенной в результате расчетного моделирования измерений, которые выполнялись в соответствии с положениями этого документа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. В.А. Терешонок, Л.В. Кряквин, В.А. Питилимов, В.С. Степанов, О.Ю. Кавун, А.И. Попыкин, Р.А. Шевченко, С.А. Шевченко, А.Л. Егоров, В.И. Куликов. – Сопоставление измеренного и рассчитанного токов ионизационной камеры при измерении эффективности аварийной защиты на этапе физпуска энергоблока № 3 Калининской АЭС. – Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2010. – Вып. 3. – с. 37 – 42.

2. В.А. Терешонок, Л.В. Кряквин, В.С. Степанов, О.Ю. Кавун, А.И. Попыкин, Р.А. Шевченко, С.А. Шевченко. – Расчетное моделирование режима с отключением двух из четырех работающих ГЦН на номинальной мощности блока № 3 Калининской АЭС. – Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2010. – Вып. 3. – с. 25 – 36.

3. О.Ю. Кавун, А.И. Попыкин, Р.А. Шевченко, С.А. Шевченко. Сопоставление измеренной и рассчитанной реактивности при измерении эффективности аварийной защиты на этапе физического пуска энергоблока № 3 Калининской АЭС. – Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2011. – Вып. 2. – с. 16 – 23.

4. А.И. Попыкин, О.Ю. Кавун, Р.А. Шевченко, С.А. Шевченко. О расчетном моделировании измерения реактивности. – Ядерная физика и инжиниринг. – 2012. – Т. 3. – № 1. – с. 8 – 19.

5. O.Yu. Kavun, A.I. Popykin, R.A. Shevchenko, S.A. Shevchenko. Comparison between the measured and calculated reactivity in measuring the effectiveness of the emergency protection at the stage of physical start-up of unit no. 3 at the Kalinin nuclear power plant. – Physics of Atomic Nuclei. – 2012. – V. 75. – Issue 13. – p. 1596 – 1602.

6. O.Yu. Kavun, A.I. Popykin, R.A. Shevchenko, S.A. Shevchenko. Numerical simulation of reactivity measurements in VVER-1000 reactor. In Proc.: International Conference PHYSOR 2012 – Advances in Reactor Physics Linking Research, Industry, and Education, April 15 – 20, 2012, Knoxville, USA. – p. 48.

7. О.Ю. Кавун, А.И. Попыкин, Р.А. Шевченко, С.А. Шевченко. – Об асимптотических свойствах нестационарной модели реактора ВВЭР в подкритическом состоянии. – В сб.: Сборник докладов семинара Нейтроника-2012 –

Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики. – 30 октября – 02 ноября, 2012 г., Обнинск, Россия. – с. 416 – 424.

8. 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.

9. А.И. Попыкин, Р.А. Шевченко, С.А. Шевченко. О сопоставлении измеренной и рассчитанной реактивности. – В сб.: Материалы семинара Нейтроника-2014 – Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики, 21 - 24 октября 2014 г., Обнинск, Россия. – с. 14 – 17.

Перечень сокращений

| | |
|------|---------------------------------------|
| АЗ | аварийная защита |
| АЭС | атомная электростанция |
| ВАК | высшая аттестационная комиссия |
| ВВЭР | водо-водяной энергетический реактор |
| ГЦН | главный циркуляционный насос |
| ИК | ионизационная камера |
| МКУ | минимально контролируемый уровень |
| ОР | орган регулирования |
| ОРУК | обращенное решение уравнения кинетики |
| ПС | программное средство |
| СУЗ | система управления и защиты |
| ТВС | тепловыделяющая сборка |
| ТВЭЛ | тепловыделяющий элемент |
| ФНП | федеральные нормы и правила |