

На правах рукописи



Зинатуллин Рустем Эдуардович

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ
ПОДКРИТИЧНОСТИ В ХРАНИЛИЩАХ ОТРАБОТАВШЕГО
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РЕАКТОРОВ РБМК

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сосновый бор – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-Исследовательский Технологический Институт имени А.П. Александрова» (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»).

Научный руководитель: **Артемов Владимир Георгиевич**
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией
ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»

Официальные оппоненты: **Щукин Николай Васильевич**
доктор физико-математических наук,
профессор НИЯУ МИФИ

Чернов Владимир Алексеевич
кандидат физико-математических наук,
заместитель начальника лаборатории по науке,
ОЯРиТЦ АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

Ведущая организация: **Акционерное общество «ВНИИАЭС»**

Защита диссертации состоится «30» мая 2017 г. в 14 - 00 на заседании диссертационного совета Д520.009.06 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 201__ г.

Отзыв и замечания на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просьба направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д520.009.06, кандидат физико-математических наук



А.С. Колокол

СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- БВ – бассейн выдержки;
ИНГ – импульсный нейтронный генератор;
ЛАЭС – Ленинградская атомная станция;
ОТВС – отработавшая ТВС;
РБМК – реактор большой мощности канальный (кипящий);
ТВС – тепловыделяющая сборка;
ТОБ – техническое обоснование безопасности;
ХОЯТ – хранилище отработавшего ядерного топлива.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Первоначально ХОЯТ Ленинградской атомной станции проектировалось для размещения отработавшего топлива с обогащением 1,8%. Обоснование ядерной безопасности при анализе аварийных ситуаций проводилось на основе традиционных консервативных допущений: в частности, всё топливо рассматривалось как свежее [1, 2]. Переход в реакторах РБМК на топливо с обогащением (2% и более) привёл к тому, что потребовалось ввести ограничение на глубину выгорания отработавших ТВС (ОТВС). Были разработаны схемы хранения, исключая компактное размещение в хранилище недовыгоревших ОТВС.

Использование глубины выгорания топлива в качестве параметра безопасности в отечественной и в зарубежной практике [3] предполагает применение дополнительных мер контроля, таких как прямое измерение глубины выгорания топлива в ТВС.

В 2009 г. на Ленинградской атомной станции была введена в эксплуатацию установка для измерения глубины выгорания каждой ОТВС в отдельности. При такой организации процесса измерений использование данного экспериментального метода в качестве основного средства контроля за состоянием всего хранилища затруднено из-за слишком большого объема измерений.

Поэтому параллельно с началом разработки установки измерения глубины выгорания была поставлена задача по разработке дополнительных средств контроля подкритичности.

В качестве экспериментального средства контроля за состоянием бассейнов выдержки ХОЯТ было предложено использовать эксперимент с импульсным источником нейтронов (модифицированный α -метод Симмонса-Кинга) [4, 5]. Данный метод в условиях хранилища представляется вполне подходящим по оперативности, трудоёмкости и по экономическим соображениям.

Для измерения декремента затухания нейтронного потока разработана экспериментальная установка [6].

В работах [7, 8] представлено первичное обоснование возможности применения импульсного метода для оценки подкритичности ХОЯТ. Ожидалось, что использование импульса нейтронов с большой энергией будет способствовать установлению асимптотического распределения нейтронного потока в пределах большого объема

исследуемой системы и, как следствие, к меньшей пространственной зависимости декремента затухания мгновенных нейтронов. Тогда коэффициент размножения нейтронов можно оценить с помощью асимптотического декремента затухания.

Первые пробные эксперименты в ХОЯТ показали, что результаты измерений декремента затухания импульса мгновенных нейтронов плохо согласуются с асимптотическим значением, так как зависят от места размещения детектора и импульсного нейтронного генератора (ИНГ). Это сделало затруднительным интерпретацию экспериментальных данных.

В сложившейся ситуации возникла необходимость провести специальные расчётные исследования с целью адаптации импульсной методики к условиям хранилища ЛАЭС.

Целью настоящей работы являлось обоснование возможности использования импульсного метода для оценки подкритичности ХОЯТ РБМК. Для достижения намеченной цели **поставлены и решены следующие задачи:**

1) разработка программных средств для расчётных исследований и для сопровождения импульсных экспериментов;

2) исследование особенностей затухания нейтронного импульса и установления асимптотического распределения нейтронов в ХОЯТ РБМК;

3) поиск соотношений и закономерностей, связывающих результаты измерений с критериями, позволяющими сделать заключения о ядерной безопасности ХОЯТ (разработка методики контроля подкритичности хранилища, использующей данные закономерности и сочетающей расчётный анализ с импульсными экспериментами);

4) апробация методики контроля подкритичности в реальных условиях ХОЯТ Ленинградской атомной станции.

Научная новизна работы определяется тем, что впервые проведено исследование эволюции нейтронного импульса и динамики установления асимптотического распределения нейтронов для хранилища РБМК. Оценено влияние профиля выгорания топлива по высоте на результаты измерений. Установлено, как результаты измерений связаны с критериями, позволяющими сделать заключение о ядерной безопасности ХОЯТ. Для уравнения, определяющего декремент затухания нейтронного потока, получен с учётом высотного профиля выгорания топлива спектр собственных функций и собственных значений, включая высшие гармоники.

При этом получены следующие наиболее важные новые результаты:

– на основе расчётного моделирования выявлено, что вследствие значительных геометрических размеров и большой подкритичности в реальных условиях хранилища РБМК за время измерений асимптотическое значение декремента затухания не успевает установиться;

– трёхмерные расчёты полностью заполненного ХОЯТ РБМК показали, что существует фрагмент с максимальными размножающими свойствами, который определяет подкритичность всего хранилища. Данный фрагмент – место для проведения измерений;

– с помощью расчётного анализа установлено, что основная собственная функция

уравнения для определения декремента затухания имеет резкий пик у верхней границы активной части ТВС, где топливо наименее выгоревшее. С повышением порядкового номера гармоники вид собственной функции всё больше напоминает синусоидальную зависимость. Поэтому с помощью точечного источника нейтронов, размещённого в максимуме основной гармоники, можно эффективно селективировать высшие гармоники;

– показано, что можно подобрать такое расстояние между генератором и детектором, при котором измеряемый декремент затухания будет близок к асимптотическому значению при достаточно малых временах после импульса;

– расчётным путём установлено, что максимальное значение коэффициента размножения, которое может быть достигнуто при развитии постулируемых в ТОБ ХОЯТ аварий, практически линейно зависит от асимптотического декремента затухания, определённого в исходном состоянии;

– разработана и верифицирована расчётная модель для численного моделирования импульсных экспериментов.

Достоверность представленных результатов. Выводов и рекомендаций обеспечена тем, что в расчётных исследованиях и при численном моделировании импульсных экспериментов использовался комплекс программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ, который был верифицирован при участии диссертанта, а результаты верификации в свою очередь подтверждены в ходе аттестации расчётного комплекса в НТЦ ЯРБ Ростехнадзора (Аттестационный паспорт ПС № 203 от 23.06.2005) [А8].

Также достоверность результатов была подтверждена согласием расчётных и экспериментальных данных в пределах погрешности измерений.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы были учтены при разработке «Методики контроля подкритичности хранилищ отработавшего ядерного топлива Ленинградской АЭС с помощью установки УИП-006» (РД ЭО 0613-2005, [9]).

Методика контроля подкритичности ХОЯТ (РД ЭО 0613-2005) стала прототипом технического решения на способ контроля безопасности бассейнов выдержки хранилищ отработавшего ядерного топлива АЭС, защищенного патентом РФ № 2488181 [10].

В ТОБ ХОЯТ ЛАЭС (п. 4.2.1.1, [11]) включены пункты:

– ежемесячно проводится расчет $k_{эфф}$ бассейнов ХОЯТ по аттестованной программе САПФИР_95&RC_ХОЯТ;

– ежеквартально проводятся измерения с помощью установки УИП-006 для подтверждения расчётов.

Практическая ценность работы.

1) В ходе расчётных исследований было установлено, что значения декремента затухания, полученные в серии измерений по высоте ТВС при перемещении измерительного устройства, включающего жестко сцепленные между собой ИНГ и детектор, образуют характерную высотную зависимость, форма которой определяется глубиной выгорания топлива – параметром, который в ХОЯТ ЛАЭС используется для контроля безопасности. Это важное свойство, которым обладает хранилище

отработавшего ядерного топлива РБМК, было использовано в предложенной расчётно-экспериментальной методике контроля подкритичности ХОЯТ.

2) Уточнена процедура измерений в ХОЯТ РБМК, позволяющая получать оценку декремента затухания нейтронного потока, наиболее близкую к асимптотическому значению:

– экспериментальная установка размещается в центре фрагмента БВ с наибольшими размножающими свойствами (положение фрагмента определяется на основе расчёта);

– детектор от нейтронного генератора закрепляется на расстоянии, которое определяется свойствами среды и временным интервалом на зависимости спада плотности потока нейтронов, использующимся для определения значения декремента затухания;

– измерения осуществляются в нескольких точках верхней активной части ОТВС при изменении положения генератора и детектора. На основе измерений определяется наименьшее значение декремента затухания.

Выбранная методика проведения импульсных экспериментов позволила скомпенсировать пространственные эффекты, возникающие при проведении измерений декремента затухания нейтронного потока.

3) В ХОЯТ ЛАЭС с 2005 г. ведётся постоянный расчётный мониторинг изменения размножающих свойств в БВ с помощью САПФИР_95&RC_ХОЯТ. Начиная с 2009 г. реализована возможность подтверждения результатов расчётов данными измерений.

4) Опыт применения расчётно-экспериментальной методики контроля подкритичности на ЛАЭС показал, что импульсные эксперименты при соответствующей расчётной поддержке (САПФИР_95&RC_ХОЯТ) являются эффективным и оперативным инструментом, сочетающим одновременно и контроль подкритичности, и контроль глубины выгорания топлива в ОТВС исследуемого фрагмента ХОЯТ.

Положения выносимые на защиту:

1) Результаты расчётных исследований эволюции нейтронного импульса и динамики установления асимптотического распределения нейтронов в ХОЯТ РБМК;

2) Способ измерения в ХОЯТ РБМК асимптотического декремента затухания нейтронного потока, включающий выбор места для проведения измерений, использование экспериментальной установки, у которой фиксировано расстояние между генератором и детектором, проведение измерений в нескольких точках по высоте;

3) Результаты верификации комплекса программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ в части моделирования экспериментов с импульсным источником нейтронов;

4) Апробация и обоснование расчётно-экспериментальной методики контроля подкритичности ХОЯТ РБМК на Ленинградской атомной станции.

Личный вклад автора в совместных исследованиях и работах заключается в следующем:

– проведёны теоретический анализ и расчётные исследования эволюции нейтронного импульса и динамики установления асимптотического распределения нейтронов в ХОЯТ РБМК;

– обработаны и проанализированы эксперименты с импульсным источником в ХОЯТ ЛАЭС. Уточнены условия проведения измерений. Выбраны наиболее достоверные и представительные серии измерений. Выполнено последующее моделирование экспериментов с помощью комплекса программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ;

– разработана расчётная модель ХОЯТ для имитации с помощью программы САПФИР_95&RC_ХОЯТ экспериментов с импульсным нейтронным источником;

– верифицирован комплекс программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ. Подобраны тестовые задачи и эксперименты, подготовлены расчётные модели и проведены верификационные исследования. В частности, использованы результаты экспериментов, проведенных в ХОЯТ ЛАЭС;

– обобщены и проанализированы результаты многолетнего расчётного мониторинга размножающих свойств ХОЯТ, который осуществлялся на ЛАЭС с помощью комплекса программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ.

Авторство результатов, которые получены другими специалистами и вошли в диссертацию, конкретизируется по ходу изложения.

Апробация работы. Результаты и основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях: XI, XIV и XVI семинары по проблемам физики реакторов Волга-2000, -2006, -2010 (Москва, МИФИ, 4-8 сентября 2000 г., 4-8 сентября 2006 г., 3-7 сентября 2010 г.); семинар секции динамики «Математические модели для исследования и обоснования характеристик оборудования и ЯЭУ в целом при их создании и эксплуатации» (г. Сосновый Бор, НИТИ, 18-22 сентября 2000 г.); семинар секции динамики «Оценка экспериментальных данных и верификация расчетных кодов» (г. Сосновый Бор, НИТИ, 4-8 октября 2004 г.); семинары Нейтроники-2000, -2016 (г. Обнинск, 24-26 октября 2000 г., 26-28 октября 2016); молодёжная научно-техническая конференция «Молодые специалисты об актуальных вопросах атомной энергетики – 2001» (г. Санкт-Петербург, 30 мая – 2 июня 2001 г.); 9-я международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (Москва, 21-23 мая 2014 г.); Межотраслевой научно-технический семинар «Расчетные и экспериментальные исследования динамики ядерных энергетических установок на этапах жизненного цикла» (г. Сосновый Бор, 20-22 октября 2015 г.); 162-м заседании семинара «Физика ядерных реакторов» (Москва, НИЦ КИ, 21 октября 2016 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, в журналах 3 статьи, из которых 2 статьи в научно-технических рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК; 10 материалов конференций и семинаров. 1 аттестационный паспорт программного средства. 1 свидетельство о госрегистрации программного средства. Кроме того результаты, которые включены в диссертацию, содержатся в 13 отчётах о НИР.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, библиографии, включающей 71 наименование, и приложения. Работа изложена на 230 страницах машинописного текста, включая

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена литературному обзору. Рассматривается α -метод Симмонса-Кинга [12, 13], обсуждаются границы применимости и возможность использования данного метода для оценки размножающих свойств ХОЯТ РБМК.

В импульсном α -методе определение подкритичности проводится на основе результатов измерения временного распределения плотности нейтронов $N(t)$ после инъекции в исследуемую среду импульса быстрых нейтронов. На кривой $N(t)$ должен быть достаточно протяженный экспоненциальный участок, характеризующийся декрементом затухания основной гармоники, который определяется через логарифмическую производную $\alpha_0 = \partial(\ln N)/\partial t$. Подкритичность определяется по формуле [12, 13]:

$$\rho \equiv (1 - k_{\text{эфф}}) / k_{\text{эфф}} = \alpha_0 \Lambda - \beta_{\text{эфф}}. \quad (1)$$

где α_0 – асимптотический декремент затухания нейтронного потока, Λ – время генерации мгновенных нейтронов, а $\beta_{\text{эфф}}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов.

Рассматривается «Методика определения нейтронно-физических характеристик и подкритичности хранилищ отработавшего ядерного топлива» [4, 5, 7, 8], в которой предполагалось использовать импульсный модифицированный α -метод Симмонса-Кинга.

Первый опыт применения импульсного метода для определения подкритичности ХОЯТ ЛАЭС в классическом виде был неудачным.

Выполненный анализ данной методики и результатов пробных экспериментов показал, что для обоснования возможности применения импульсного метода в ХОЯТ РБМК и для правильной интерпретации экспериментальных данных требуется решить следующие задачи:

- исследовать эволюцию нейтронного импульса и динамику установления асимптотического распределения нейтронов;
- оценить влияние профиля выгорания топлива по высоте на результаты измерений;
- установить, как результаты измерений связаны с критериями, позволяющими сделать заключение о ядерной безопасности ХОЯТ.

Чтобы решить поставленные задачи, необходимо разработать программные средства, которые должны численно моделировать импульсные эксперименты на основе решения нестационарного уравнения диффузии нейтронов, рассчитывать коэффициент размножения нейтронов $k_{\text{эфф}}$ при нормальных условиях и аварийных ситуациях, вычислять параметры импульсных экспериментов (α_0 , Λ , $\beta_{\text{эфф}}$).

Во **второй главе** описаны состав и функциональные возможности комплекса программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ [A14], включая разработанную диссертантом расчётную модель ХОЯТ для имитации импульсных экспериментов.

Комплекс предназначен для расчёта коэффициента размножения нейтронов, параметров импульсного эксперимента и моделирования экспериментов с импульсным

источником нейтронов. Комплекс используется для определения места размещения экспериментальной установки. С помощью комплекса проводится постоянный расчётный мониторинг размножающих свойств ХОЯТ ($k_{эфф}$). Сопоставление данных, полученных в разные моменты времени, позволяет отслеживать изменение подкритичности в ХОЯТ в процессе перестановки ОТВС, завоза новых партий отработавшего топлива. Перед завозом новой партии ОТВС проводят предварительный расчёт (прогноз) в соответствии с проектной картограммой размещения новых ОТВС в хранилище.

Представлены результаты верификации комплекса, определяющие погрешность расчёта. При верификации были использованы, в том числе, результаты численного моделирования наиболее качественных и представительных серий импульсных экспериментов, которые были проведены в хранилище ЛАЭС. Комплекс программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ аттестован в НТЦ ЯРБ Ростехнадзора [А8].

В **третьей главе** представлены результаты теоретического и расчётного анализа затухания нейтронного импульса в ХОЯТ РБМК.

При анализе характера затухания нейтронного импульса использовалось представление решения для затухания плотности потока нейтронов после импульса нейтронного генератора в одномерном приближении (по высоте БВ) в виде разложения:

$$\Phi(z, t) = \sum_{k \geq 0} c_k \varphi_k(z) \exp(-\alpha_k t), \quad (2) \quad c_k = \langle \varphi_k^+(z), \mathbf{S}(z) \rangle, \quad (3)$$

где α_k – собственное значение (декремент затухания нейтронного потока); $\varphi_k(z)$ – соответствующая собственная функция

$$\hat{\mathbf{L}}\varphi_k + (1 - \beta)\chi_p \hat{\mathbf{Q}}\varphi_k = -\alpha_k \hat{\mathbf{v}}^{-1}\varphi_k \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

Здесь $\varphi_k = \{\varphi_k^1, \varphi_k^2, \dots, \varphi_k^G\}$; $\{\hat{\mathbf{L}}\varphi_k\}^g = \nabla D^g \nabla \varphi_k^g - \sum_t^g \varphi_k^g + \sum_{s \leftarrow g}^g \varphi_k^s$ – оператор переноса (рассеяния,

поглощения и утечки) нейтронов; $\{\chi_p \hat{\mathbf{Q}}\varphi_k\}^g = \chi_p^g \sum_{s \leftarrow g}^g v^s \varphi_k^s$ – оператор генерации нейтронов;

χ_p – диагональная матрица, составленная из χ_p^g ; $\{\hat{\mathbf{v}}^{-1}\varphi_k\}^g = \varphi_k^g / v^g$; $\mathbf{S} = \{S^1, S^2, \dots, S^G\}$ – функция, имитирующая в расчётной модели нейтронный импульс: $\Phi(z, t)|_{t=0} = \mathbf{vS}(z)$.

Для получения разложения (2) диссертантом разработана программа, обеспечивающая расчёт собственных функций $\varphi_k(z)$ и собственных значений α_k прямого (4) и сопряжённого уравнения и использующая метод исчерпывания [14]. При численном анализе импульсных экспериментов в соотношении (2) сохранялись до 30 первых членов ряда.

Представление решения уравнения в виде (2) позволило провести анализ скорости установления асимптотического распределения плотности потока нейтронов после импульса, найти зависимость декремента затухания нейтронного потока $\alpha(z, t) = -\partial \ln \Phi(z, t) / \partial t$ от высоты расположения генератора и детектора и выявить связь этой зависимости с высотным профилем выгорания топлива.

Численное моделирование в одномерном приближении (по высоте БВ) с помощью

разложения (2) и серии импульсных экспериментов, в которой измерительное устройство, включающее жестко сцепленные между собой генератор и детектор, перемещалось по высоте ОТВС, показало, что для ОТВС с глубоким выгоранием топлива измеряемая на опыте зависимость декремента затухания нейтронного потока $\alpha(z)$ имеет характерную форму с минимумом в районе верхней границы активной части ОТВС.

При численном моделировании с помощью разложения (2) были исключены из рассмотрения запаздывающие нейтроны, что позволило проследить, как с увеличением времени после импульса в системе постепенно устанавливается распределение нейтронов с единым декрементом затухания. На Рис. 1 представлены результаты вычислительного эксперимента по определению декремента затухания потока нейтронов $\alpha(z, t)$ для различных моментов времени после импульса в зависимости от положения детектора при перемещении по высоте ОТВС измерительного устройства, включающего жестко сцепленные между собой генератор и детектор.

Приведенные на Рис. 1 данные показывают, что единый (во всех точках по высоте ОТВС) декремент затухания потока мгновенных нейтронов устанавливается при $t > 25$ мс после импульса, что больше, чем в 10 раз превышает экспозицию в реальном опыте ($\sim 1,5$ мс). При этом минимальное значение $\alpha_{\min} = \min_z \alpha(z, t)$ не меняется со временем и практически совпадает с декрементом затухания основной гармоники нейтронного потока, определяемой уравнением (4).

Причина этого заключается в том, что при больших размерах и глубокой подкритичности, какая имеет место в хранилищах ОТВС, прямая и сопряжённая функции, соответствующие первому собственному значению уравнения (2), имеют максимум в виде пика, который находится в области с наибольшими размножающими свойствами. В нашем случае это наименее выгоревшая верхняя часть ОТВС. На Рис. 2 показан вид первой собственной

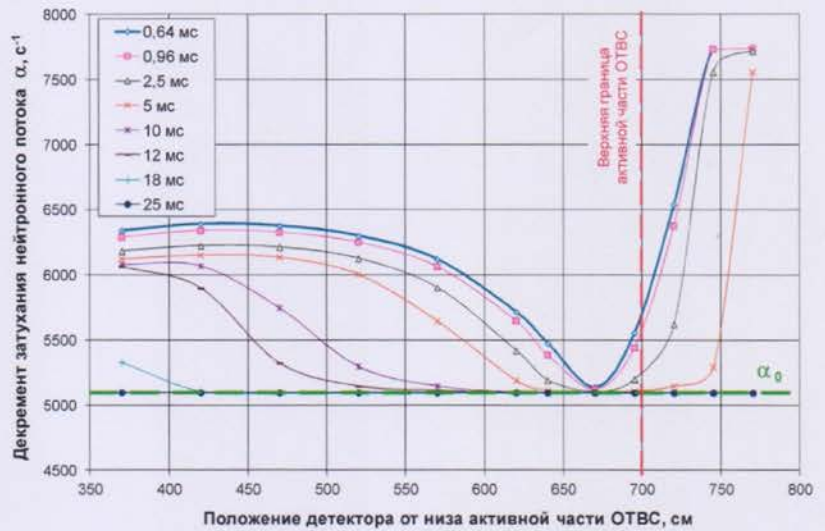


Рис. 1 – Результаты вычислительного эксперимента по определению декремента затухания в зависимости от времени после импульса

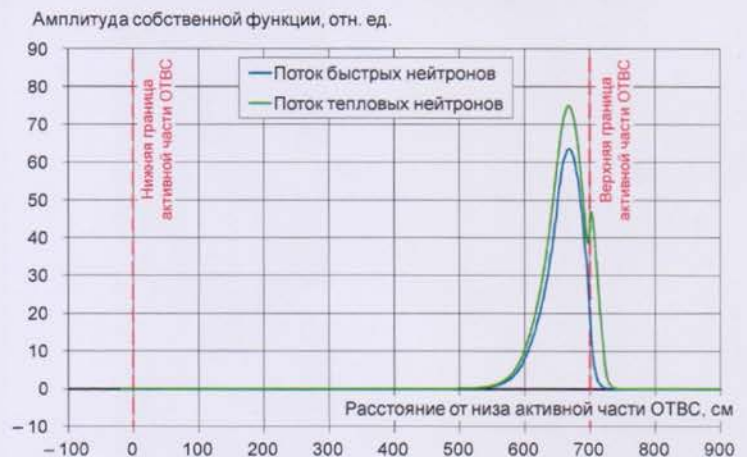


Рис. 2 – Асимптотическое распределение нейтронного потока (первая собственная функция уравнения для определения декремента затухания)

функции

функций уравнения (2), рассчитанной в одномерном (по высоте ОТВС) двугрупповом приближении.

Вид первых гармоник уравнения (4) далёк от привычной синусоидальной зависимости. Максимум второй гармоники находится в другой половине ОТВС у нижней границы её активной части. Несколько следующих гармоник имеют переходный вид. И только с повышением порядкового номера гармоники k вид собственной функции уравнения (4) всё больше напоминает синусоидальную зависимость.

Если детектор и ИНГ разместить в области максимума первой гармоники, то в (2) все коэффициенты c_k (см. соотношение (3)) кроме c_0 будут малы, и спад потока мгновенных нейтронов после импульса ИНГ будет определяться основной гармоникой уравнения (4).

В реальных условиях ХОЯТ РБМК детектирование спада нейтронного потока проводится на интервале $t \approx 0,5 \dots 1,5$ мс. Поэтому, как следует из Рис. 1, если провести серию измерений, выполненную при различном положении детектора по высоте пениала (при этом измерительное устройство включает жестко сцепленные между собой ИНГ и детектор), то измеренные значения декремента затухания должны образовать характерную высотную зависимость с минимумом вблизи верхней границы активной части ОТВС.

С применением экспериментальной установки, у которой ИНГ и детектор жестко сцеплены между собой, в различных фрагментах ХОЯТ ЛАЭС проведена серия измерений декремента затухания нейтронного потока при различных положениях детектора по высоте ТВС. Результаты измерений подтвердили, что зависимость декремента затухания нейтронного потока от положения детектора имеет минимум в верхней части ОТВС на расстоянии 40...60 см от верхней границы топлива.

Выявленные закономерности были подтверждены диссертантом на основе трёхмерного численного решения нестационарного уравнения диффузии. Также с использованием трёхмерной модели были проведены исследования влияния расстояния между генератором и детектором на результаты измерений, оценён объём хранилища, который способен охватить нейтронный импульс, определён критерий для выбора места размещения измерительной установки.

Анализ затухания импульса в однородной бесконечной среде показал, что можно подобрать такое расстояние между генератором и детектором, при котором измеряемый декремент затухания будет близок к асимптотическому значению α_0 при достаточно малых временах после импульса. Это расстояние определяют из соотношения $r_0 = C\sqrt{t_{\text{изм}}}$, где $t_{\text{изм}}$ – центр временного интервала, на котором осуществляют детектирование сигнала, а C – константа, определяемая свойствами среды ХОЯТ, численное значение которой определяется на основе расчетного моделирования. В дальнейшем, все импульсные измерения и расчётные исследования проводились только при размещении генератора и детектора в виде «жесткой» сцепки.

Была проанализирована и смоделирована серия экспериментов с увеличением размера однородного топливного фрагмента. Сделан вывод: несмотря на то, что

используется импульс нейтронов с энергией 14 МэВ, радиус фрагмента хранилища, который можно охватить в ходе одного измерения, не превышает 0,5 м. Поэтому для хранилища РБМК актуальна задача по определению места (координаты) для размещения измерительной установки, которую следует размещать в максимуме собственной функции уравнения для определения декремента затухания нейтронного потока.

Трёхмерные расчёты полностью заполненного хранилища показали, что и собственная функция уравнения для определения декремента затухания, и собственная функция условно-критической задачи имеют максимумы – небольшой фрагмент в плане хранилища $\sim 3 \times 3$ ОТВС. Важно, что для обеих задач положения максимумов совпадают. Это обстоятельство позволило сформулировать подход к определению места размещения генератора и детектора в хранилище так, чтобы выявить фрагмент с наибольшими размножающими свойствами, который и определяет коэффициент размножения всего хранилища.

На основе обобщения полученных результатов предложен способ измерения в хранилище РБМК асимптотического значения декремента затухания. Проводим расчёт размножающих свойств хранилища. Установку размещаем в центре фрагмента с максимальными размножающими свойствами. Используем измерительную установку, у которой расстояние между генератором и детектором $\sim 30 \dots 50$ см. Проводим измерения в 7...11 точках на различной высоте. Получаем высотную зависимость декремента затухания. Минимальное значение полученной высотной зависимости соответствует асимптотическому значению декремента затухания.

Четвертая глава посвящена поиску соотношений и закономерностей, связывающих результаты измерений с критериями, позволяющими сделать заключение о ядерной безопасности ХОЯТ. Параллельно исследуется вопрос о влиянии конструктивных особенностей экспериментальной установки на результаты измерений. Для решения этих задач требуется использование расчётной модели хранилища, полностью учитывающей и имитирующей условия проведения импульсных экспериментов.

Показано, что вносимое измерительной установкой возмущение зависит от глубины выгорания топлива (подкритичности) и может быть скомпенсировано с помощью введения расчётной поправки.

Для проверки чувствительности импульсного метода к выгоранию топлива в ОТВС были проведены расчёты, имитирующие эксперименты с импульсным источником нейтронов для топлива разной глубины выгорания. Расчёты были выполнены при различном положении детектора по высоте ТВС. Результаты численных экспериментов представлены на Рис. 3.

С увеличением глубины выгорания топлива увеличивается не только абсолютное значение декремента затухания нейтронного потока, но и меняется форма высотной зависимости $\alpha(z)$. По мере возрастания глубины выгорания топлива минимум зависимости $\alpha(z)$ становится более выраженным и смещается к верхней границе активной части ОТВС.

При обосновании схем хранения в хранилище размещается только топливо с

выгоранием не ниже предельного, для которого ещё выполняются требования ядерной безопасности. Предельной глубине выгорания соответствует граничная высотная зависимость декремента затухания. Если высотная зависимость декремента затухания лежит выше граничной зависимости, то для хранилища будут выполняться требования ядерной безопасности

Показано, что максимальное значение коэффициента размножения, которое может быть достигнуто при развитии постулируемых в ТООБ ХОЯТ аварий, практически линейно зависит от асимптотического декремента затухания, определённого в исходном состоянии (см. Рис. 4). Эта закономерность одинакова для всех типов ТВС, используемых по настоящее время в реакторах типа РБМК.

На основе выявленных простых зависимостей между декрементом затухания, коэффициентом размножения и выгоранием было сделано заключение о возможности и целесообразности использования декремента затухания нейтронного потока в качестве измеряемого параметра безопасности при контроле подкритичности в ХОЯТ.

Предложена расчётно-экспериментальная методика контроля подкритичности ХОЯТ, основным элементом которой является сопоставление измеренной и расчётной высотной зависимости декремента затухания (см. Рис. 5). На этом этапе проверяется и

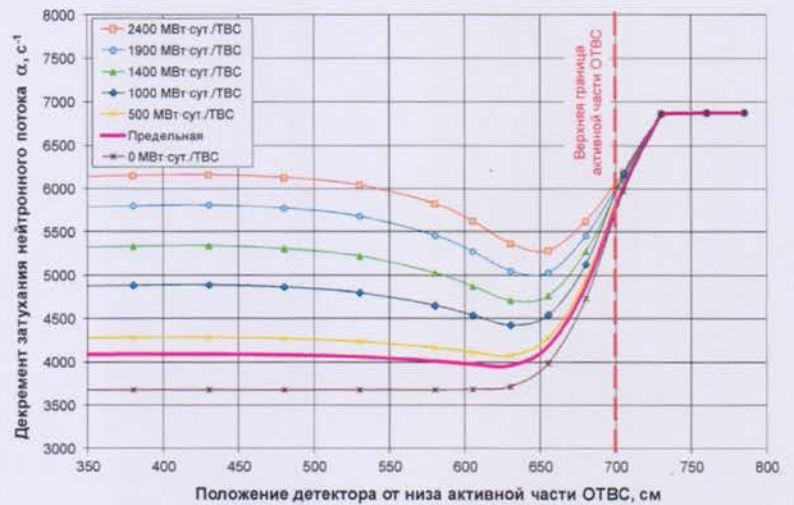


Рис. 3 – Результаты численного моделирования экспериментов по определению $\alpha(z)$ для топлива разного выгорания

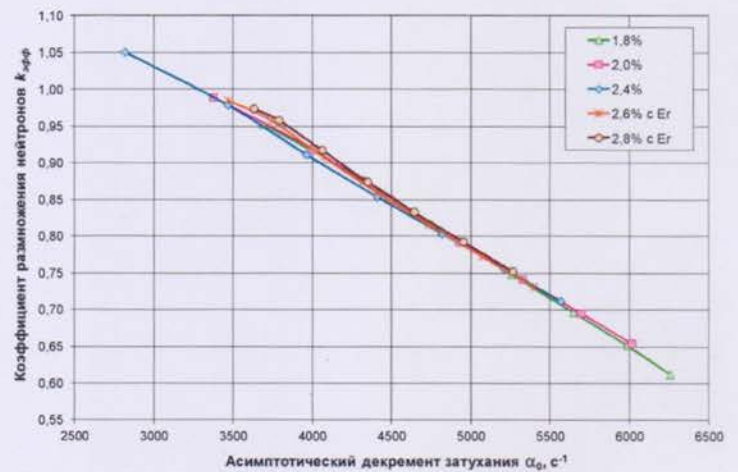


Рис. 4 – Зависимость максимального $k_{эфф}^{max}$, рассчитанного при имитации аварийных ситуаций, от α_0 для фрагментов ОТВС различного обогащения, размещенных в хранилище

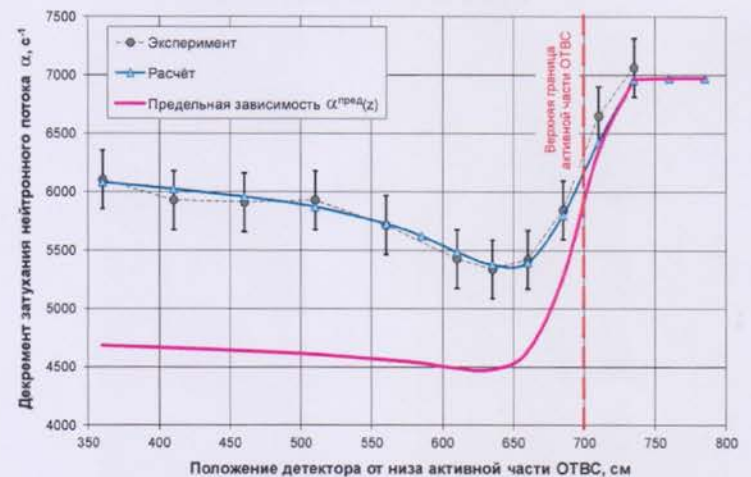


Рис. 5 – Пример сопоставления экспериментальной, расчётной и предельной высотной зависимости $\alpha(z)$

методика измерений, и адекватность расчетной модели исследуемого фрагмента. По итогам сопоставления измеренного значения декремента затухания и расчётного предельного значения делается предварительное заключение о величине «запаса» подкритичности хранилища. Рассчитывается значение коэффициента размножения нейтронов при имитации аварийных ситуаций и сопоставляется с предельным значением 0,95 [1, 2]. На основе совокупности расчётных и экспериментальных данных делается окончательное заключение о выполнении требований правил ядерной безопасности в ХОЯТ.

В подкритических системах с отражателем при определённых размерах и подкритичности затухание нейтронного импульса определяется временем жизни нейтронов в отражателе [12, 13]. Тогда измеряемое значение декремента затухания определяется свойствами отражателя и не несет никакой информации о размножающих свойствах системы. Для оценки минимального размера фрагмента, когда ещё можно пренебречь влиянием окружающей воды, выполнена серия экспериментов с последовательным увеличением числа ТВС во фрагменте. Результаты экспериментов и расчётного моделирования показали, что для получения надёжных результатов по оценке декремента затухания исследуемый фрагмент должен содержать не менее 36 (6×6) ТВС. При этом измеряемый декремент затухания при расположении детектора и генератора в центре исследуемого фрагмента не будет меняться при дальнейшей достройке путём размещения ТВС на периферии фрагмента.

Во фрагментах ХОЯТ, заполненных по неуплотнённой схеме, ряды ОТВС разделены слоями воды толщиной ~ 12 см, которые из-за своего размера начинают выполнять функции отражателя. Поэтому для неуплотнённого фрагмента встает сходная проблема, когда затухание нейтронного импульса определяется временем жизни нейтронов в отражателе. Расчётные исследования и анализ импульсных экспериментов, проведённых в неуплотнённых фрагментах хранилища ЛАЭС, подтвердили данное опасение.

Таким образом, импульсная методика наиболее подходит для контроля подкритичности хранилищ, практически полностью заполненных и переведённых на уплотнённое хранение топлива. На сегодняшний день данные условия в ХОЯТ ЛАЭС сложились естественным образом.

В пятой главе представлены результаты адаптации расчётно-экспериментальной методики к конкретным условиям ХОЯТ ЛАЭС.

При разработке комплекса программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ в него была заложена возможность расчёта коэффициента размножения нейтронов в режиме нормальной эксплуатации хранилища и для состояний, которые соответствуют постулируемым в ТООБ ХОЯТ аварийным ситуациям. Это позволяет проводить с помощью комплекса САПФИР_95&RC_ХОЯТ расчётный мониторинг изменения размножающих свойств хранилища РБМК в процессе эксплуатации.

В данной главе обобщены результаты постоянного расчётного мониторинга размножающих свойств ХОЯТ, который ведётся с 2005 г. на ЛАЭС. Показано, что за время

контроля наблюдался почти неменяющийся запас подкритичности при сохранении постоянного объёма ввозимых и вывозимых ОТВС (для примера см. Рис. 6). Такой эффект был достигнут за счёт размещения в хранилище новых партий ОТВС и перестановок ранее завезённого топлива по специально разработанным схемам с чередованием ОТВС разных размножающих свойств. Выбор и обоснование схем осуществлялся на основе расчётных исследований, выполненных с помощью комплекса программ САФИР_95&RC_ХОЯТ.

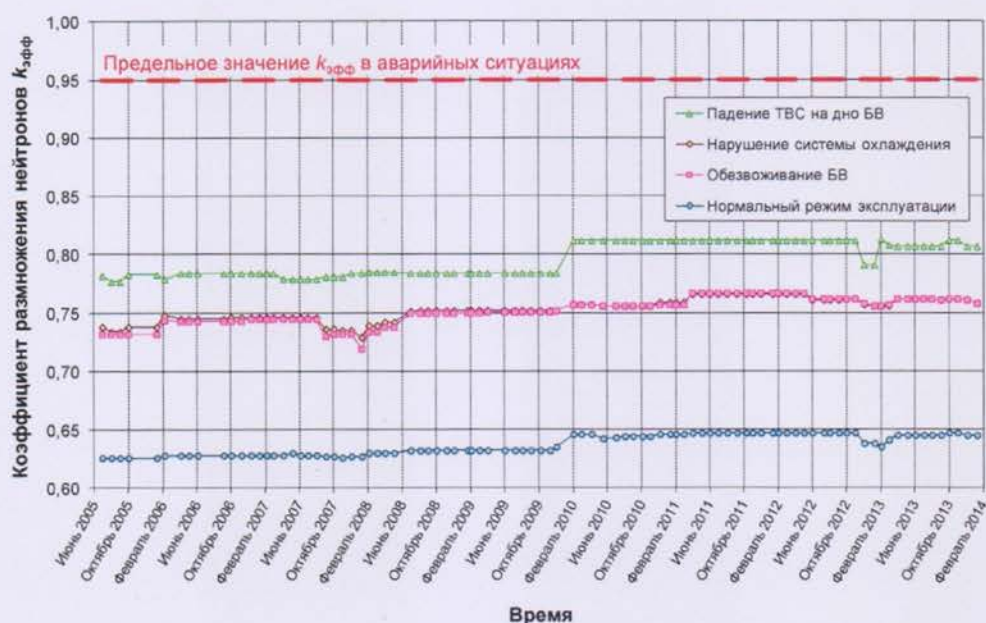


Рис. 6 – Динамика изменения $k_{эфф}$ для БВ-4 (правая сторона)

Ключевым этапом применения методики контроля подкритичности ХОЯТ является проверка согласованности результатов расчётного моделирования и измерений. На этом этапе проверяется и методика измерений, и то, что расчётная модель адекватно описывает исследуемый фрагмент хранилища. Обобщение экспериментальных данных показало, что результаты расчётов и импульсных экспериментов согласуются в пределах погрешности измерений. Из чего сделано заключение, что моделирование условий эксперимента выполнялось корректно. Следовательно, оценка размножающих свойств ХОЯТ, полученная при расчётном мониторинге, являются надёжной численной оценкой подкритичности хранилища ЛАЭС.

В третьей и четвертой главах, используя расчётный анализ, было установлено, что, во-первых, минимальное значение декремента затухания, которое получается в серии экспериментов, выполненных при различном положении детектора по высоте ОТВС, будет близок к асимптотическому, то есть $\alpha_{\min} \rightarrow \alpha_0$; во-вторых, максимальное значение коэффициента размножения, которое может быть достигнуто при развитии постулируемых аварий, практически линейно зависит от асимптотического декремента затухания (см. Рис. 4).

Правильность сделанных выводов можно проиллюстрировать с помощью диаграммы, на которой по оси абсцисс откладывается экспериментальная оценка

асимптотического декремента затухания α_{\min} , а по оси ординат – расчётная оценка запаса подкритичности $\Delta k_{\text{эфф}}$ (см. Рис. 7).

Под запасом подкритичности $\Delta k_{\text{эфф}}$ понимается разность между предельным значением $k_{\text{эфф}}^{\text{пред}} = 0,95 - \delta$ (где δ – погрешность расчёта) и наибольшей оценкой коэффициента размножения, полученной для постулируемых аварийных состояний.

На Рис. 7 маркеры соответствуют импульсным экспериментам, которые были проведены на данный момент в ХОЯТ ЛАЭС. Они образуют, как это было предсказано в ходе расчётных исследований, линейную зависимость.

Также на Рис. 7 сплошными линиями показаны обобщённые расчётные зависимости $\Delta k_{\text{эфф}}$ как функции α_0 , полученные при варьировании выгорания топлива в диапазоне, охватывающем все хранящиеся в ХОЯТ типы ТВС. Оценки аварийных состояний различались незначи-

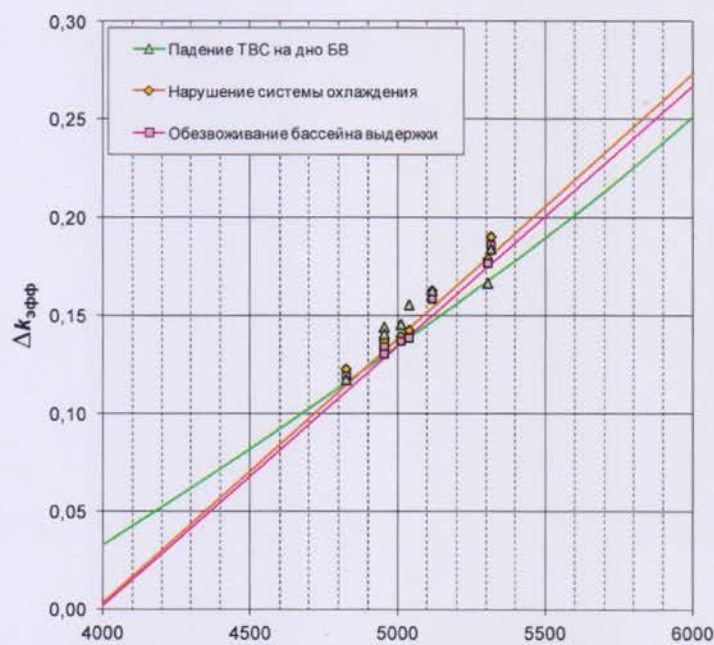


Рис. 7 – Зависимость расчётного запаса подкритичности $\Delta k_{\text{эфф}}$ от измеренного значения α_{\min}

Сопоставление экспериментальных и расчётных данных, приведённых на Рис. 7, показывает, что экспериментальная оценка α_{\min} коррелирует с расчётной оценкой $\Delta k_{\text{эфф}}$. Это обстоятельство позволяет по результатам измерений α_{\min} оперативно оценивать запас подкритичности в единицах реактивности, воспользовавшись соотношением:

$$\Delta k_{\text{эфф}} = C \cdot \alpha_{\min} - D, \quad (5)$$

которое связывает измеряемую величину α_{\min} и $\Delta k_{\text{эфф}}$, аналогично формуле Симмонса-Кинга, поскольку для ОТВС, размещённых в хранилище, коэффициенты C и D можно принять постоянными.

Таким образом, была получена процедура, которая позволяет отслеживать изменение подкритичности в хранилище, опираясь не только на расчётные данные, но и на периодически проводимые измерения декремента затухания нейтронного потока.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан и верифицирован комплекс программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ, который используется для сопровождения импульсных измерений и расчётного мониторинга подкритичности хранилища Ленинградской атомной станции.

2. В ходе расчётных исследований определена зависимость измеряемого декремента затухания плотности потока нейтронов: от места расположения измерительной установки по высоте ХОЯТ, от взаимного положения генератора и детектора, от глубины выгорания топлива в исследуемом фрагменте хранилища.

3. Разработаны рекомендации по методике проведения в ХОЯТ импульсных экспериментов. В центре фрагмента с максимальными размножающими свойствами на различной высоте проводится серия измерений с помощью установки, у которой ИНГ и детектор жестко сцеплены между собой. Расстояние между ИНГ и детектором определяется свойствами среды и временным интервалом на зависимости спада плотности потока нейтронов, используемым для определения значения декремента затухания. Минимальное значение, полученное в ходе серии измерений, соответствует асимптотическому значению декремента затухания нейтронного потока α_0 .

4. Найдена простая связь, позволяющая на основе экспериментальной оценки асимптотического декремента затухания нейтронного потока, определённого в исходном состоянии (нормальном режиме эксплуатации хранилища), оценить максимальное значение коэффициента размножения, которое может быть достигнуто при развитии постулируемых в ТОБе ХОЯТ аварий.

5. Разработана и обоснована расчётно-экспериментальная «Методика контроля подкритичности хранилищ отработавшего ядерного топлива Ленинградской АЭС с помощью установки УИП-006» (РД ЭО 0613-2005), сочетающая результаты измерений декремента затухания нейтронного потока и расчётное моделирование.

6. Итогом выполненных исследований стало включение в регламент мероприятий по обеспечению ядерной безопасности ХОЯТ периодических проверок и оценок размножающих свойств всех бассейнов выдержки хранилища с использованием комплекса программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ и с помощью экспериментальной установки УИП-006 (ТОБ ХОЯТ ЛАЭС, п. 4.2.1.1).

7. Опыт применения на ЛАЭС расчётно-экспериментальной методики контроля подкритичности показал, что импульсные эксперименты при соответствующей расчётной поддержке являются эффективным инструментом, сочетающим одновременно и контроль подкритичности, и косвенный контроль глубины выгорания топлива в ОТВС исследуемого фрагмента ХОЯТ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

А1. Артемов В.Г., Зинатуллин Р.Э., Иванов А.С., Карпов А.С., Пискарев А.В., Калязин Н.Н., Болотов Д.С. Комплекс программ для контроля подкритичности в хранилищах отработавшего ядерного топлива реакторов РБМК. Сб. тезисов семинара секции динамики «Математические модели для исследования и обоснования характеристик оборудования и ЯЭУ в целом при их создании и эксплуатации» (г. Сосновый Бор, НИТИ, 18-22 сентября 2000г.), стр. 30-32.

А2. Артемов В.Г., Зинатуллин Р.Э., Иванов А.С., Пискарев А.В., Калязин Н.Н.,

Болотов Д.С. Исследование размножающих свойств хранилищ отработавшего ядерного топлива с использованием комплекса программ САПФИР_95&RC. Материалы XI семинара по проблемам физики реакторов «Физические проблемы эффективного использования и безопасного обращения с ядерным топливом», Москва, 4-8 сентября 2000г. (Волга-2000), стр. 185-187.

А3. Артемов В.Г., Зинатуллин Р.Э., Иванов А.С., Пискарев А.В. Исследование особенностей экспериментов с импульсным источником нейтронов в хранилищах отработавшего ядерного топлива. Сборник трудов семинара «Нейтроника-2000» (Обнинск, 24-26 октября 2000г.) стр. 23-28.

А4. Зинатуллин Р.Э. Моделирование экспериментов с импульсным источником нейтронов в хранилище отработавшего ядерного топлива. Молодые специалисты об актуальных вопросах атомной энергетики – 2001, Санкт-Петербург, 30 мая – 2 июня 2001г. Сборник докладов молодёжной научно-технической конференции. – СПб, 2001г., – стр. 104-109.

А5. Зинатуллин Р.Э. Верификация комплекса программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ на экспериментах с импульсным источником нейтронов. Сб. тезисов семинара секции динамики «Оценка экспериментальных данных и верификация расчетных кодов» (г. Сосновый Бор, НИТИ, 4-8 октября 2004г.), стр 16-19.

А6. Артемов В.Г., Зинатуллин Р.Э., Иванов А.С., Карпов А.С., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П. Комплекс программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ для контроля подкритичности в хранилище отработавшего ядерного топлива Ленинградской атомной электростанции. НИТИ им. А.П. Александрова: Годовой отчет 2004 год. – СПб.: ООО «НИЦ «Моринтех», 2005. С. 130-136.

А7. Артемов В.Г., Ельшин А.В., Зинатуллин Р.Э., Иванов А.С., Карпов А.С., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П. Результаты верификации комплекса программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ, предназначенного для контроля подкритичности в хранилище отработавшего ядерного топлива Ленинградской атомной электростанции. НИТИ им. А.П. Александрова: Годовой отчет 2004 год.– СПб.: ООО «НИЦ «Моринтех», 2005. С. 136-143.

А8. Программный комплекс САПФИР_95&RC_ХОЯТ с библиотекой констант БНАБ-78/С-95. Аттестационный паспорт №203 Ростехнадзора от 23.06.2005.

А9. Артемов В.Г., Ельшин А.В., Зинатуллин Р.Э., Иванов А.С., Карпов А.С., Пискарев А.В., Сергеев В.К., Шемаев Ю.П., Калязин Н.Н., Болотов Д.С. Контроль подкритичности хранилища отработавшего ядерного топлива РБМК с использованием комплекса программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ и экспериментов с импульсным источником нейтронов. Материалы XIV семинара по проблемам физики реакторов «Физические проблемы топливных циклов ядерных реакторов», Волга-2006 (Москва, МИФИ, 4-8 сентября 2006г.), стр 85-88.

А10. Артемов В.Г., Зинатуллин Р.Э., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П., Калязин Н.Н., Болотов Д.С. Верификация комплекса программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ при

моделировании экспериментов с импульсным источником нейтронов в хранилище отработавшего ядерного топлива РБМК. Материалы XIV семинара по проблемам физики реакторов «Физические проблемы топливных циклов ядерных реакторов», Волга-2006 (Москва, МИФИ, 4-8 сентября 2006г.), стр 182-184.

A11. Зинатуллин Р.Э. Комплекс программ для контроля подкритичности в хранилище отработавшего ядерного топлива. Сборник научных трудов «Технологии и системы обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок», вып. 5, 2007.

A12. Артемов В.Г., Зинатуллин Р.Э., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П. Расчетное определение размножающих свойств ХОЯТ с использованием комплекса программ САПФИР_95&RC_ХОЯТ. Материалы XVI семинара по проблемам физики реакторов «Новая технологическая платформа атомной отрасли», Волга-2010 (Москва, МИФИ, 3-7 сентября 2010г.), стр 64-66.

A13. Артемов В.Г., Зинатуллин Р.Э., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П. Расчётный анализ результатов испытаний установки УИП-006 новой конструкции для выполнения измерений декремента затухания нейтронного потока в ХОЯТ. НИТИ им. А.П. Александрова: Годовой отчет 2011 год.– г. Сосновый Бор: ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», 2011. С. 80-84.

A14. САПФИР_95&RC_ХОЯТ, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Роспатента № 2014616537 от 29.04.2014.

A15. Артемов В.Г., Зинатуллин Р.Э., Иванов А.С., Карпов А.С., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П. Использование численного моделирования экспериментов с импульсным источником нейтронов для оценки подкритичности в ХОЯТ Ленинградской АС. Материалы Межотраслевого научно-технического семинара «Расчетные и экспериментальные исследования динамики ядерных энергетических установок на этапах жизненного цикла» (г. Сосновый Бор, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова, 20-22 октября 2015 г.).

A16. Артемов В.Г., Зинатуллин Р.Э., Иванов А.С., Карпов А.С., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П. Использование численного моделирования экспериментов с импульсным источником нейтронов для оценки подкритичности в ХОЯТ Ленинградской АС. Материалы Межотраслевого научно-технического семинара «Расчетные и экспериментальные исследования динамики ядерных энергетических установок на этапах жизненного цикла» (г. Сосновый Бор, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова, 20-22 октября 2015 г.).

A17. Артемов В.Г., Зинатуллин Р.Э., Иванов А.С., Карпов А.С., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П. Исследование особенностей экспериментов с импульсным источником нейтронов в хранилищах отработавшего ядерного топлива РБМК // ВАНТ, сер. Физика ядерных реакторов, вып. 1, 2016, С. 12-26.

A18. Артемов В.Г., Зинатуллин Р.Э., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П., Калязин Н.Н., Бородич С.С. Расчетно-экспериментальная методика контроля подкритичности в хранилище отработавшего ядерного топлива Ленинградской атомной станции // ВАНТ,

сер. Физика ядерных реакторов, вып. 1, 2016, С. 27-38.

А19. Артемов В.Г., Зинатуллин Р.Э. Связь результатов импульсных экспериментов в ХОЯТ РБМК с критериями, позволяющими сделать заключение о ядерной безопасности. Материалы научно-технической конференции «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2016) (г. Обнинск, 23-25 октября 2016 г.) стр. 70.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах атомной энергетики // Москва-ЦНИИАтоминформ-1992, ПНАЭ Г-14-029-91.

2. Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии // Ростехнадзор, Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии, НП-061-05.

3. Внуков В.С. Глубина выгорания как параметр ядерной безопасности для хранилищ и транспортных упаковочных комплектов с отработавшим ядерным топливом. Атомная техника за рубежом. №12, 1990.

4. Типовая программа определения нейтронно-физических характеристик и подкритичности хранилищ отработавшего ядерного топлива, Росэнергоатом, 1996.

5. Методика определения нейтронно-физических характеристик и подкритичности хранилищ отработанного ядерного топлива. Росэнергоатом, 1997.

6. Сомов И.Е. Система контроля ядерной безопасности бассейнов выдержки хранилищ отработавшего ядерного топлива. Сборник докладов Третьей международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (Москва, ВНИИАЭС, 18-19 апреля 2002 г.), С. 249-252.

7. Сомов И.Е., Николаев С.А., Полевой В.Б., Немытов С.А., Беспалов В.Н. Расчетно-экспериментальные методы определения параметров безопасности при хранении и обращении с ОЯТ. Сборник докладов Третьей международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (Москва, ВНИИАЭС, 18-19 апреля 2002 г.), С. 253-265.

8. Сомов И.Е., Николаев С.А., Полевой В.Б., Немытов С.А., Беспалов В.Н. Расчетно-экспериментальные методы определения параметров при хранении и обращении с ОЯТ. ВАНТ, сер. Физика ядерных реакторов, вып. 3, 2002, С. 15-25.

9. РД ЭО 0613-2005. Методика контроля подкритичности хранилищ отработавшего ядерного топлива Ленинградской АЭС с помощью установки УИП-006. М.: Росэнергоатом, 2004.

10. Способ контроля безопасности бассейнов выдержки хранилищ отработавшего ядерного топлива АЭС / Житарев В.Е., Гераскин И.Н., Качанов В.М., Краюшкин А.В., Кудрявцев А.В., Парышкин Ю.А., Сергевнин А.Ю., Фёдоров В.А., патент на изобретение № 2488181 действующий с 27.04.2012.

11. 2706-0428-ПЗ.СД. Техническое обоснование безопасности хранилища отработавшего ядерного топлива. Книга 1.1. Мокрое хранение ОТВС (здание 428 ЛАЭС) /

Инв. № 97-04290И17, ЛАЭС, 2005.

12. Кипин Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов.– М.: Атомиздат, 1967.

13. Стумбур Э.А., Николайшвили Ш.С., Колосов Б.И., Кочубей Н.П., Матвеев И.П., Невиница А.И. Границы применимости α -метода для измерений реактивности в уран-водных системах. // В сб. «Теоретические и экспериментальные проблемы нестационарного переноса нейтронов». – М.: Атомиздат, 1972. С. 275-281.

14. Фадеев А.К., Фадеева В.Н. Вычислительные методы литейной алгебры. М., Физматгиз, 1960.