

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 520.009.07 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ» (ПРИНАДЛЕЖНОСТЬ – ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ) ПО ДИССЕРТАЦИИ АРИСТАРХОВОЙ ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНЫ
«РАСЧЕТ ГЕТЕРОГЕННОГО РЕАКТОРА С ЭФФЕКТИВНЫМИ УСЛОВИЯМИ
НА АКСИАЛЬНЫХ ГРАНИЦАХ АКТИВНОЙ ЗОНЫ» НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 24.11.2020 г., № 6

О присуждении АРИСТАРХОВОЙ Елене Александровне, гражданке РФ, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Расчет гетерогенного реактора с эффективными условиями на аксиальных границах активной зоны» по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 22.09.2020 г. (протокол № 4) диссертационным советом Д 520.009.07 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Правительство РФ) (далее – «НИЦ «Курчатовский институт»), 123182 г. Москва, пл. академика Курчатова, д. 1 (утвержден Приказом Минобрнауки России № 258/нк от 28.02.2020 г.).

Соискатель – Аристархова Елена Александровна 1985 года рождения.

Диссертационная работа Аристарховой Е.А. «Расчет гетерогенного реактора с эффективными условиями на аксиальных границах активной зоны» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» выполнена в Курчатовском комплексе ядерных транспортных энергетических технологий (ККЯТЭТ) НИЦ «Курчатовский институт».

В период подготовки диссертационной работы Аристархова Е.А. работала в Лаборатории динамики реакторов ККЯТЭТ НИЦ «Курчатовский институт» в должности инженера с 2007 по 2012 год, в 2012 году была переведена на должность инженера 1 категории, а в 2013 году – на должность младшего научного сотрудника и продолжает работать в этой должности в настоящее время.

Аристархова Е.А. в 2009 г. окончила факультет кибернетики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский инженерно-физический институт (государственный университет)» (МИФИ) с присвоением квалификации «математик, системный программист» по специальности «Прикладная математика и информатика».

В 2010 г. Аристархова Е.А. сдала кандидатские экзамены по иностранному языку (оценка «отлично»), истории и философии науки (оценка «отлично»), а в 2014 году – экзамен по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (оценка «отлично»). Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2020 г. НИЦ «Курчатовский институт».

Научный руководитель – Малофеев Валерий Михайлович, кандидат физико-математических наук, начальник Лаборатории динамики реакторов ККЯТЭТ НИЦ «Курчатовский институт».

Официальные оппоненты:

– Ельшин Александр Всеволодович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела нейтронно-физических исследований Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова» (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»), г. Сосновый Бор;

– Увакин Максим Александрович, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника отдела, начальник группы Акционерного Общества Опытного конструкторского бюро «Гидропресс» (АО ОКБ «Гидропресс»), г. Подольск

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Акционерное Общество «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»), г. Нижний Новгород, в своём положительном заключении, подписанном доктором технических наук, начальником департамента научного развития и ВАБ, главным ученым секретарем Бахметьевым А.М., кандидатом технических наук, начальником отдела нейтронно-физических, теплогидравлических расчетов водо-водяных реакторов и расчетного анализа аварийных режимов РУ Лепехиным А.Н., кандидатом технических наук, начальником отдела разработки активных зон реакторов БН Фарахиным М.Р. и утверждённом генеральным директором – генеральным конструктором Зверевым Д.Л. указала, что

диссертационная работа Аристарховой Е.А. посвящена актуальной задаче увеличения эффективности расчетного моделирования, которая определяется балансом затрат времени и точности результатов. Повышение экономической эффективности проектируемых установок при обеспечении безопасности может быть достигнуто за счет расширения объема расчетных исследований и повышения их точности, что сопряжено со значительным увеличением длительности расчетов. Применение цифровых двойников ядерных установок способствует повышению безопасности и технико-экономической эффективности создаваемых установок за счет оптимизации конструкции и снижения затрат на натуральные эксперименты. С учётом ожидаемой важности их применения особенно востребованным становится повышение их представительности.

В представленной диссертационной работе решается актуальная задача сокращения времени расчета распределения энерговыделения нейтронно-физическим кодом TREC, реализующим гетерогенный метод расчета реактора, за счет исключения прямого расчета распределения потока нейтронов в аксиальных отражателях. Предлагается использовать матрицы эффективных условий на границах между активной зоной и отражателями по аналогии с матрицами эффективных условий, задаваемых на границах между ячейками. В работе показано, что применение этого метода позволяет значительно сократить число аксиальных гармоник, количество которых сильно влияет на длительность расчета, что позволяет получить значительный выигрыш по времени при сохранении приемлемой точности расчетов. Практическая значимость заключается в программной реализации разработанных методик и внедрения в программу TREC, что обеспечило значительное ускорение расчета (в 6-9 раз).

Ведущая организация дала положительную оценку диссертации и заключила, что работа Аристарховой Е.А. является самостоятельным законченным научно-квалификационным исследованием, в котором решена задача значительного повышения быстродействия расчетов нейтронно-физических характеристик гетерогенным методом. Отмечается последовательность и логичность изложения, внутренняя целостность и законченность, а также лаконичность и сфокусированность диссертационной работы. Автореферат соответствует основному содержанию и выводам диссертации, а тема работы и её содержание соответствуют специальности, по которой она представлена к защите.

Диссертация полностью удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении научных степеней, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции Постановления Правительства Российской

Федерации от 28 августа 2017 г. № 1024), предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор, Аристархова Елена Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

По теме диссертации были опубликованы 5 научных статей, 2 из которых изданы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Аристархова Е.А., Малофеев В. М. Уравнения гетерогенного реактора с эффективными условиями на аксиальных границах активной зоны // Атомная энергия. – 2016. – Т. 120, вып. 3. – С. 134-138.
2. Аристархова Е.А., Малофеев В. М. Эффективные условия для плотности потока нейтронов на аксиальных границах активной зоны // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2015. – Вып. 2. – С. 20-24.
3. Аристархова Е.А. Эффективные условия на аксиальных границах активной зоны и гетерогенный расчет реактора // ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные константы. – 2015. – Вып. 1. – С. 16-30.
4. Аристархова Е.А. Метод гетерогенного расчета реактора с эффективными условиями на аксиальных границах активной зоны // Сборник научных трудов XVIII семинара по проблемам физики реакторов ВОЛГА-2014, «Физические проблемы замкнутого топливного цикла». – Электронная версия (CD). – Москва, 2014.
5. Аристархова Е.А. Эффективные условия на аксиальных границах активной зоны и гетерогенный расчет реактора // Материалы XXV научно-технического семинара НЕЙТРОНИКА-2014, «Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики». – Обнинск, Россия, 21-24 октября 2014 г. – С. 32-34.

По своему содержанию все публикации посвящены разработке методов расчета гетерогенного реактора с эффективными условиями на аксиальных границах активной зоны. В статьях излагается краткое описание численного решения поставленных задач, приводятся результаты верификации и оценка эффективности разработанных методов.

На автореферат поступили 3 отзыва, все положительные.

1. Отзыв из Федерального бюджетного учреждения «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»). Отзыв составил кандидат

физико-математических наук, начальник отдела безопасности АС Хренников Н.Н. Отзыв содержит одно замечание: «В качестве замечания можно обратить внимание на опечатку в формуле (7), где для обозначения функции вместо простого используется полужирный шрифт».

2. Отзыв из Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). Отзыв составил кандидат физико-математических наук, доцент Савандер В.И. Отзыв содержит одно замечание: «В качестве общего к работе замечания отмечу неудачное название работы. Расчет реактора можно провести и по готовой программе, сделанной другим автором».

3. Отзыв из Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Отзыв составил кандидат технических наук, руководитель отделения быстрых и высокотемпературных реакторов Курчатовского Ядерно-Технологического Комплекса Невиница В.А. Отзыв содержит 2 замечания: «1) В диссертации не исследован вопрос области применения разработанного подхода: всегда ли допустимо отказываться от прямого расчета распределений плотности потока нейтронов в отражателях? 2) Приведенные в Главе 4 результаты расчета в сравнении с предыдущими версиями модуля TREC и другими программными модулями говорят о том, что в целом разработанный метод дает результаты более физичные, чем предыдущая версия, поскольку дает монотонные распределения именно там, где нет никаких оснований для нарушения монотонной зависимости. Применение предыдущей версии модуля TREC время от времени дает нарушения монотонности. Следует, однако, отметить, что сделанный автором диссертации вывод о том, что при этом улучшена точность расчета, вполне логичен, но не подкреплён ни сравнением с прецизионным программным средством, ни с экспериментом».

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что

– Ельшин А.В. является одним из ведущих специалистов в области развития современных методов расчета реакторов и моделирования нейтронно-физических процессов в реакторах с промежуточным спектром нейтронов;

– Увакин М.А. имеет обширный опыт расчета физических характеристик реакторов разных типов, включая реакторы с существенной гетерогенной загрузкой активной зоны, с использованием современных программных кодов.

Оба официальных оппонента имеют многочисленные публикации по тематике близкой к тематике представленной диссертационной работы.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что Акционерное Общество «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»), г. Нижний Новгород, является одной из основных российских организаций, разрабатывающих активные зоны для реакторов с промежуточным спектром нейтронов и выполняющих моделирование физических процессов для обоснования их безопасности. Сотрудники АО «ОКБМ Африкантов» имеют большое количество публикаций по моделированию, расчетам и верификации активных зон реакторов с промежуточным спектром нейтронов и их нейтронно-физических характеристик.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований в диссертации **разработаны:**

- метод расчета гетерогенного реактора с эффективными условиями на границах между активной зоной и аксиальными отражателями;

- усовершенствованная версия нейтронно-физического кода TREC для расчета гетерогенного реактора с эффективными граничными условиями на аксиальных границах активной зоны;

- метод вычисления элементов матрицы эффективных условий на границе активной зоны с аксиальным отражателем;

- алгоритм вычисления матрицы эффективных граничных условий;

- код Laref для расчета матриц граничных условий.

С помощью развитых методов исследования **получены следующие результаты:**

- нейтронно-физические расчеты с использованием матриц эффективных граничных условий с высокой степенью точности согласуются с базовыми расчетами с нулевыми условиями на внешних границах аксиальных отражателей;

- разработанный усовершенствованный метод расчета гетерогенного реактора с эффективными граничными условиями позволяет сократить время проведения расчета пространственного распределения энерговыделения в 6-9 раз.

Исследованы:

- погрешность результатов нейтронно-физических расчетов с использованием матриц эффективных условий на аксиальных границах активной зоны;

– эффект ускорения расчета пространственного распределения энерговыделения по нейтронно-физическому коду TREC от применения эффективных условий в виде треугольных матриц для аксиальных границ активной зоны.

Показано, что:

– в том случае, если матрицы эффективных условий на аксиальных границах активной зоны диагональны и их элементы стремятся к бесконечности, полученные в работе усовершенствованные уравнения гетерогенного реактора переходят в уравнения базовой теории гетерогенного реактора;

– предложенный метод использования матриц эффективных граничных условий может быть использован как в расчетах по кодам, в которых реализован гетерогенный метод, так и в диффузионных кодах, реализующих традиционные сеточные методы;

– результаты одномерных расчетов ТВС с использованием матриц аксиальных граничных условий совпадают с расчетами без использования эффективных условий, что подтверждает корректность разработанной модели;

– полномасштабные расчеты легководного реактора с промежуточным спектром нейтронов по усовершенствованной версии кода TREC за счет использования матриц эффективных условий позволяют достигать высокую точность получаемых результатов с использованием меньшего числа аксиальных гармоник по сравнению с базовой версией кода TREC, что приводит к сокращению счетного времени.

Теоретическая значимость исследований определяется следующим:

– полученные в работе уравнения гетерогенного реактора с эффективными условиями на аксиальных границах активной зоны обобщают базовую теорию гетерогенного реактора с нулевыми условиями на внешних границах отражателей;

– разработанный численный метод вычисления матриц граничных условий может быть легко использован как в кодах, реализующих гетерогенный метод, так и в диффузионных кодах, реализующих традиционные сеточные методы.

Практическая значимость исследований определяется тем, что гетерогенный метод с использованием матриц аксиальных эффективных граничных условий позволяет значительно сократить время проведения нейтронно-физических расчетов легководных реакторов с промежуточным спектром нейтронов за счет уменьшения количества аксиальных гармоник при сохранении требуемой точности получаемых результатов. Повышение быстродействия наиболее актуально для расчетов по связанным нейтронно-

физическим и теплогидравлическим кодам, т.к. подавляющую часть расчетного времени занимают нейтронно-физические расчеты.

Достоверность результатов, полученных по разработанному гетерогенному методу с эффективными граничными условиями, подтверждена тестовыми расчетами активной зоны легководного реактора с промежуточным спектром нейтронов. Верификация метода расчета гетерогенного реактора с эффективными условиями проводилась путем сравнения результатов расчетов по усовершенствованной версии нейтронно-физического кода TREC с результатами, полученными по базовой версии кода TREC с нулевыми условиями на внешних границах отражателей. Материалы, представленные в диссертации, апробированы на российских научных семинарах, а также опубликованы в журналах, входящих в Перечень ВАК.

Личный вклад автора заключается в разработке и реализации гетерогенного метода с эффективными условиями на аксиальных границах активной зоны. Автором лично:

- получены уравнения гетерогенного реактора в дипольном приближении с эффективными условиями на аксиальных границах активной зоны;
- создана усовершенствованная версия кода TREC, в которой реализован гетерогенный метод с эффективными граничными условиями;
- получены аналитические выражения для элементов треугольной матрицы на границе между активной зоной и многозонным отражателем в малогрупповом диффузионном приближении;
- разработан алгоритм вычисления матриц эффективных граничных условий;
- создан код Laref, предназначенный для расчета матриц эффективных граничных условий;
- проведена верификация разработанных методов.

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертация Аристарховой Е.А. **«Расчет гетерогенного реактора с эффективными условиями на аксиальных границах активной зоны»**, представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным

Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842.

На заседании 24 ноября 2020 г. диссертационный совет принял решение присудить Аристарховой Е.А. ученою степень кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 6 докторов наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовал:

за присуждение ученой степени – 14 ,

против присуждения ученой степени – нет,

недействительных бюллетеней – 1.

Протокол счетной комиссии утвержден открытым голосованием единогласно.

Председатель
диссертационного совета, д.ф.-м.н.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.ф.-м.н.

24.11.2020 г.




А.А. Ковалишин


Д.А. Шкаровский