



ФАНО России
Федеральное государственное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша
Российской академии наук»
(ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)

125047, Москва, Миусская пл., 4 Тел. 8 (499) 972-37-14 Факс 8 (499) 972-07-37
http://keldysh.ru E-mail office@keldysh.ru
ОКПО 02699381 ОГРН 1037739115787 ИНН/КПП 7710063939/771001001

26.09.2017 № 11103-9422/770

На № 78-955 от 31.07.17

УТВЕРЖДАЮ

ФАНО России
Директор
Федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша
Российской академии наук»,
член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор

« » 2017 г. А.И. Аптекарев



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию **Васильева Александра Олеговича**

«Численное моделирование динамики диффузии нейтронов в ядерном реакторе»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ».

Цели исследования и актуальность темы. Диссертация посвящена разработке вычислительных алгоритмов для решения спектральных задач диффузии нейтронов, построению и исследованию схем для решения нестационарных задач диффузии нейтронов в многогрупповом диффузионном приближении в ядерном реакторе. Несмотря на большую историю и достаточно высокий уровень теоретической и практической исследованности проблем переноса нейтронов, в работе получены новые эффективные вычислительные

алгоритмы приближенного решения задач диффузии нейтронов в многогрупповом диффузионном приближении в ядерном реакторе.

С точки зрения возможных приложений результатов работы речь идет о достаточно важной проблематике, связанной со строительством новых конструкций, с оценкой риска аварийных ситуаций, с созданием работающих в режиме реального времени тренажеров для ядерных реакторов. Диффузионная теория является достаточно точной для того, чтобы обеспечить количественное описание многих физических особенностей ядерных реакторов и, по сути, является основным рабочим вычислительным инструментарием физики ядерных реакторов. Возможность моделирования динамических диффузионных процессов в трехмерных постановках основана на применении высокопроизводительных параллельных вычислений, а также новых эффективных вычислительных алгоритмов и их адекватной программной реализации. Именно в таком современном ключе поставлены и решены методические и прикладные задачи в диссертации Васильева А.О. Актуальность выбранной темы исследования не вызывает сомнений.

Основное содержание работы.

Диссертация изложена на 146 страницах. Она состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. При написании работы использовано 129 источников информации, диссертация содержит 74 рисунка и 19 таблиц.

Во *введении* приведен достаточно содержательный обзор литературы по теме диссертации. В частности, обсуждено состояние исследований как с методической стороны, так и прикладной. Необходимое внимание уделено обзору вспомогательного математического обеспечения прикладных инженерных и научных вычислений. Введение содержит краткое изложение содержания диссертации.

В *первой главе* рассмотрены спектральные задачи, которые могут характеризовать динамическое нейтронное поле ядерного реактора. Вычислительный алгоритм основан на конечно-элементной аппроксимации по пространству. Выделена α -спектральная задача, которая наиболее информативна при рассмотрении динамических процессов. Сформулирована новая спектральная задача (δ -спектральная задача) для характеристики динамики нормы решения. Расчеты различных комплексных собственных значений и собственных функций проведены в рамках двухмерной и трехмерной моделей ядерных реакторов. Программное обеспечение написано с использованием вычислительной платформы FEniCS и свободной библиотеки для решения спектральных задач SLEPc.

Во *второй главе* рассмотрены нестационарные задачи диффузии нейтронов. Выполнено моделирование нестационарного процесса в ядерном реакторе в

многогрупповом диффузионном приближении. Для аппроксимации по пространству использован метод конечных элементов. Исследован выход на регулярный режим для реакторов типа ВВЭР-1000. Проведено сравнительное исследование классических схем первого и второго порядка аппроксимации по времени и явно- неявной разностной схемы. Расчеты выполнены на суперкомпьютере с использованием эффективных библиотек для параллельных научных и инженерных вычислений.

Третья глава посвящена разработке алгоритма автоматического выбора шага по времени при приближенном решении краевых задач для параболических уравнений. Основной особенностью является то, что само решение находится на основе использования безусловно устойчивых неявных схем, а выбор шага проводится на основе решения, полученного с использованием явной схемы. Проведены численные расчеты решений модельной параболической задачи и задач диффузии нейтронов, подтверждающие работоспособность и эффективность разработанного алгоритма.

В *заключении* сформулированы основные научные результаты исследований, о которых упоминалось выше.

Список литературы, содержащий 129 ссылок и включающий публикации автора диссертации, вполне адекватно отражает актуальное состояние исследований в мире по обсуждаемой тематике и некоторым смежным вопросам.

Полученные результаты и их научная новизна.

В диссертационной работе получены следующие результаты.

1. Построены и исследованы спектральные задачи, характеризующие динамические процессы в ядерном реакторе, сформулирована новая спектральная задача, связанная с самосопряженной частью оператора поглощения-производства нейтронов.

2. Исследованы классические схемы первого и второго порядка аппроксимации по времени и явно-неявная разностная схема для моделирования динамических процессов диффузии нейтронов в ядерном реакторе. Разработан эффективный алгоритм автоматического выбора шага по времени при приближенном решении краевых задач для параболических уравнений, применяемый для решения задач диффузии нейтронов.

3. Разработан и зарегистрирован комплекс программ для решения задач динамики нейтронов в ядерном реакторе.

Замечания по работе. Рассматриваемая диссертация и форма представления результатов не свободна от недостатков. А именно:

1. Диссертация содержит неизбежное количество опечаток, описок и неаккуратных стилистически выражений, которые указаны автору.

2. Список цитируемых работ недостаточно полно отражает работы российских (советских) авторов, которые активно работали и работают по тематике диссертации.

3. Необходимо дать более детальное описание разработанных вычислительных алгоритмов и программного обеспечения, результатов расчетов на компьютерах параллельной архитектуры.

Однако приведенные замечания не являются существенными и не влияют на общую положительную оценку работы.

Достоверность полученных в диссертации результатов продемонстрирована широкомасштабным тестированием разработанного программного комплекса на ряде тестовых и прикладных задач. Результаты исследований изложены в 7 печатных работах в изданиях, входящих в перечень ВАК, они прошли апробацию на ряде конференций, в том числе международного уровня. **Автореферат полностью отражает содержание диссертации.** Полученные результаты могут быть рекомендованы к практическому использованию в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, НИЦ Курчатовский институт, ИБРАЭ РАН, НИЯУ МИФИ, СВФУ им. М.К. Аммосова и других организациях, ведущих научные исследования по моделированию процессов, происходящих в ядерных реакторах.

Заключение.

Рецензируемая диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором самостоятельно на хорошем научном уровне. Приведенные научные результаты позволяют квалифицировать работу как исследование, посвященное построению математических моделей, вычислительных алгоритмов и их программной реализации на высокопроизводительной вычислительной технике для описания процессов диффузии нейтронов в ядерном реакторе, что в точности соответствует специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертационная работа Васильева А.О. «Численное моделирование динамики диффузии нейтронов в ядерном реакторе» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертация и проект отзыва обсуждены на семинаре "Вычислительные методы и математическое моделирование" им. Ю.П. Попова при отделе № 11–Федерального

государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» 25 сентября 2017 г., протокол № 188.

Заведующий отделом № 11
Федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»
доктор физико-математических наук, профессор



Галанин

Михаил Павлович