



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

09.03.2017 № 11103- 9422/178

На № _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН
Член-корреспондент РАН

 А. И. Аптекарев

" " 2017 г.

Заключение ведущей организации

ИПМ им. М. В. Келдыша РАН

на диссертацию

Абрамова Бориса Дмитриевича «Актуальные методы математического моделирования в задачах теории переноса нейтронов и теории ядерных реакторов», представленной к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертация Абрамова Б.Д. посвящена развитию и обоснованию методов математического моделирования нейтронно-физических процессов в ядерных реакторах и численного решения краевых задач теории переноса нейтронов и теории ядерных реакторов с целью обеспечения современных требований к безопасности и эффективности атомной энергетики.

Актуальность

Актуальность работы обусловлена, во-первых, необходимостью обеспечения непрерывно возрастающих требований к безопасности и эффективности атомной энергетики и, во-вторых, необходимостью развития и дальнейшего совершенствования для этого теории и методов математического моделирования

нейтронно-физических процессов в ядерных реакторах, адаптированных к возможностям, предоставляемым современной вычислительной математикой и многопроцессорной вычислительной техникой.

Научная значимость и **новизна** определяются как значимостью самой проблемы достоверного математического моделирования весьма сложных и потенциально опасных процессов в ядерных реакторах, так и использованием для решения этой проблемы в диссертации адекватного математического аппарата и соответствующих новых методов, предназначенных для решения нейтронно-физических задач теории реакторов, сформулированных в общем виде, и адаптированных к возможностям современной вычислительной математики и техники.

В гл.1 выполнено развитие и обоснование метода декомпозиции области для решения краевых задач теории переноса нейтронов и теории ядерных реакторов. Рассмотрена новая постановка краевой задачи для уравнения переноса нейтронов в системе смежных подобластей в рамках весьма общих предположений о сечениях взаимодействия нейтронов с веществом и о подобластях, в частности, невыпуклых и облучаемых извне. Эта задача исследована методами теории положительных операторов в полуупорядоченных банаховых пространствах как в интегро-дифференциальной формулировке, так и эквивалентных ей интегральной и альбедной формулировках. Обоснованы методы численного отыскания этих решений, включая методы итераций по подобластям, методы операторной прогонки и методы распараллеливания по подобластям

Результаты гл.1 являются крупным вкладом в развитие теории и алгоритмов реализации метода декомпозиции области.

В гл.2 развита теория и приложения метода граничных интегральных уравнений (метода ГИУ) для решения интегро-дифференциальных кинетических уравнений переноса в средах с однородными подобластями, включая постановку краевых задач с сингулярными источниками в пространстве обобщенных функций медленного роста. Развита теория построения фундаментальных решений методами интегральных преобразований Фурье и Радона обобщенных функций. Получены доказательства теорем существования и единственности решений ряда ГИУ типа сингулярных интегральных уравнений Соболева, а также ГИУ метода поверхностных псевдоисточников Лалетина.

Эти результаты формируют основы математической теории метода ГИУ, как метода редукции краевых задач теории переноса к ГИУ по границам раздела однородных подобластей. Они могут быть использованы для разработки и обоснования известных и новых алгоритмов этого перспективного метода, приводящего к снижению на единицу размерности задач.

Гл. 3 посвящена разработке алгоритмов метода групп Марчука и метода эквивалентных разностей для расчета реактора и защиты.

Доказаны теоремы о существовании, единственности и способах отыскания решений операторных уравнений для обобщения нелинейного метода групп Марчука на неоднородные и нестационарные задачи.

Разработаны и обоснованы алгоритмы нового перспективного метода эквивалентных разностей (ЭР) редукции неоднородных, условно критических и нестационарных краевых задач теории переноса нейтронов и теории реакторов к системам нелинейных алгебраических уравнений СЛАУ, эквивалентных исходной задаче относительно основных функционалов типа интегральных по пространственным ячейкам реактора, энергетическим группам и угловым секторам потоков нейтронов и т. п.

Эти перспективные методы представляют основу для качественно нового шага при развитии многогрупповых конечно-разностных методов численного решения краевых задач теории переноса нейтронов и теории реакторов.

В Гл.4 разработаны новые алгоритмы математического моделирования прямых и обратных задач нестационарного переноса нейтронов и расчета реактивности.

Установлен принцип невозможности точного измерения реактивности методом обратной кинетики. Приведен вывод новых уравнений точечной и многоточечной кинетики, эквивалентных уравнениям распределенной кинетики относительно искомым функционалов достаточно общего вида, разработаны методы их численной реализации. Уточнены положения известной теории «связанных реакторов» Avery. Предложен вывод и проведено аналитическое исследование новых уравнений точечной и многоточечной обратной кинетики для определения реактивности. Предложена новая концепция и метод измерения реактивности. Сформулирован и апробирован новый критерий оптимального выбора данных по запаздывающим нейтронам. Разработаны и обоснованы алгоритмы идентификации сразу нескольких коэффициентов уравнения точечной кинетики (реактивности, эффективного источника нейтронов, постоянных распада и долей предшественников запаздывающих нейтронов и т.п.) по измеряемой зависимости сигналов детектора нейтронов от времени;

Разработаны новые алгоритмы теории возмущений для расчета локальных возмущений полей нейтронов и сопутствующих им эффектам реактивности. Получены новые формулы кинетической теории возмущений для вычисления эффектов реактивности при термических деформациях ячеек реактора, в частности, радиальных расширениях при больших уплощениях активной зоны, характерных для быстрых реакторов типа БН. Приведено обобщение известных результатов на более общий случай кусочно-непрерывных деформаций, сопровождающихся искажениями как размеров, так и формы и взаимного расположения ячеек реактора.

Результаты гл.4 открывают новые возможности как для моделирования нейтронной кинетики и контроля реактивности ядерных реакторов, так и для более точного вычисления эффектов реактивности.

В Гл.5 разработан и апробирован ряд новых схем численного моделирования нейтронно-физических процессов для известных комплексов JARFR и ACADEM расчета быстрых и тепловых реакторов.

Разработаны и методами теории нелинейных положительных операторов в полуупорядоченных пространствах обоснованы линейные и нелинейные модификации известного метода грубой сетки Askew-Takeda решения конечно-разностных многогрупповых уравнений реактора в диффузионном приближении в трехмерной гексагональной и прямоугольной геометриях с одним эффективным узлом на шестигранную или прямоугольную призму (ячейку сетки), свободные от недостатков исходного метода. Эти модификации были имплементированы в комплекс программ JARFR, где показали свою работоспособность.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. Развита теория и алгоритмы метода декомпозиции области расчета.
2. Разработаны и математически обоснованы новые нелинейные методы расчета функционалов на решениях краевых задач.
3. Развита новая теория алгоритмов математического моделирования прямых и обратных задач нейтронной кинетики реактора и расчета эффектов реактивности.
4. Разработаны модификации схемы и алгоритмов реализации численных методов в комплексах программ JARFR и ACADEM

Практическое значение проведенных исследований состоит в том, что они вносят вклад в развитие математической теории переноса и способствуют повышению качества и надежности прогнозирования характеристик ядерных реакторов как косвенно, путем развития теории, так и непосредственно, путем внедрения разработанных алгоритмов в практику. Результаты использовались при

- анализе методов расчета и измерения эффектов реактивности;
- модернизации схем метода грубой сетки Askew-Takeda в известных комплексах программ JARFR и TRIGEX расчета быстрых реакторов;
- разработке опций вычисления флюенса и коррекции констант отражателя для комплекса программ ACADEM расчета тепловых реакторов;
- учете термических деформаций в быстрых реакторах.

Отметим, что разработанный в ФЭИ и аттестованный в 2012 для расчетов реакторов ВВЭР-1000 комплекс программ ACADEM предназначен для связанных трехмерных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов водо-

водяных реакторов с квадратной и гексагональной геометрией тепловыделяющих сборок на покассетном и потвэльном уровнях. Он использовался для расчетов Билибинской, Балаковской и Курской АЭС и применялся в рамках проекта ТВС-КВАДРАТ для нейтронно-физических и термомеханических расчетов бельгийских PWR Tihange – 1 и Tihange – 2 и шведского PWR Ringhals.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается доказательствами соответствующих теорем, публикациями в ведущих рецензируемых журналах, сравнением полученных результатов с экспериментами и расчетами других авторов, положительными оценками этих результатов на российских и международных конференциях и семинарах.

Апробация работы. Результаты докладывались на многочисленных семинарах, конференциях, симпозиумах и научных семинарах различного уровня, среди которых следует отметить: международный симпозиум «Численные методы решения уравнения переноса», ИПМ (1992); Российские научные конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок, ФЭИ (1994,1998,2006); International Conference on Simulation of Devices and Technologies “ICSDDT”, ФЭИ (1996); ANS International Topical Meetings on Mathematics and Computations M&C (1999, 2001,2003,2005,2009); International Conference on Computational Mathematics ICCM, Novosibirsk (2002); форум «Ядерные реакторы на быстрых нейтронах», ФЭИ (2003); International Conference on Transport Theory ICTT, ФЭИ (2007); International Conference on the Physics of Reactors PHYSOR’(2008); семинар «Современное состояние и развитие программных средств для анализа динамики и безопасности АЭС», ВНИИЭФ (2003); семинары «Актуальные проблемы физики ядерных реакторов», МИФИ (1995,1997,2000,2004,2006,2008); ежегодные межведомственные семинары «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики», ФЭИ (1992 – 2015).

Публикации. По теме диссертации представлено 75 работ автора, включая 32 статьи в рецензируемых научных журналах. Из них 25 входят в международную систему цитирования SCOPUS.

Личный вклад. Все представленные к защите положения и данные являются достоверными, а результаты новыми и полученными диссертантом лично.

Эти результаты содержатся в работах, написанных автором единолично.

Предложения об использовании результатов. Изложенные в работе методы, подходы, результаты и выводы могут быть рекомендованы к внедрению и использованию в научных учреждениях, связанных с атомной отраслью и, в частности, в АО «ГНЦ РФ–ФЭИ», НИЯУ МИФИ, НИЦ «Курчатовский институт», АО «НИКИЭТ», ОКБМ им. Африкантова, ОКБ «Гидропресс», ОАО «ГНЦ НИИАР», ИБРАЭ РАН, ИПМ РАН и др.

Перечисленные выше результаты относятся к **достоинствам** диссертации.

Недостатки изложим в виде следующих замечаний.

1. Прежде всего следует сказать, что результаты, полученные автором, описаны недостаточно четко. В каждом параграфе отдельной главы диссертации приведено большое количество лемм и теорем, назначение которых не очень понятно. Именно, в начале параграфа автор не сообщает, были ли известны эти теоремы до него, с какой целью он их доказывает, насколько расширена их область применения по сравнению с работами других авторов. Главным недостатком формулировок всех лемм и теорем является весьма частое отсутствие в них слов «пусть» и «тогда» (в первой главе это замечание относится ко всем доказываемым утверждениям). В результате не ясно, доказываемое ли свойство оператора прописано в первой фразе теоремы или это требование, которое накладывается на него. Кроме того, даже имея под рукой том диссертации, крайне сложно понять, о каких именно операторах в этих утверждениях идет речь, поскольку в формулировках не указаны ссылки на обозначения объектов, фигурирующих в тексте. Например, лемма 1.2.1 на стр. 32 диссертации начинается так:

« L_n^{-1} - линейный непрерывный оператор из D_{on}^p в $L_p(Y_n)$ и в $L_p(\Gamma_n^\pm)$. Для всякой $\Phi \in L_p(Y_n)$ справедливы оценки ...». Не ясно, где искать оператор L_n^{-1} . Из контекста можно понять, что, видимо, это оператор, обратный тому, который фигурирует строкой выше в формуле (2.10), но это умозаключение, строго говоря, является домыслом читателя. Где определены все прочие обозначения, совершенно не ясно. И если в начале работы еще можно как-то ориентироваться в обозначениях, то в середине такая деятельность со стороны читателя попросту невозможна.

2. Доказательства утверждений в главе I отсутствуют, хотя ссылки на соответствующие работы приведены. Это также достаточно странно представленный материал. Так, в первых четырех параграфах диссертации со стр. 32 по стр. 55 доказано 9 лемм и 9 теорем, т.е. 18 теоретических утверждений. Формулировка каждого из них занимает заметное место в тексте: от 5-10 строк для лемм до 2 страниц для теорем (теорема 1.2.2). При этом автор на стр. 32 отмечает, что «доказательства лемм и теорем, приведенные в [45], ниже опускаются». Вызывает некоторое напряжение тот факт, что на указанных страницах при доказательствах автор 12 раз ссылается на работу [45] и 9 раз на работу [12]. Работа [12] – это монография С.Б. Шихова, а работа [45] принадлежит совместно соискателю и С.Б. Шихову. Объем последней занимает всего 16 страниц. Совершенно непонятно, почему не привести доказательства из этой работы в диссертации. Поскольку же работа совместна, то должен быть указан вклад ав-

тора в доказательства приведенных утверждений, чего не сделано. (Это замечание можно отнести и к другим немногочисленным совместным работам автора такого же рода.) Если же эти утверждения не играют существенной роли в диссертации, то для чего они приведены с номерами, как доказательные положения работы?

3. Диссертация относится к специальности 05.13.18, где требуется, помимо прочего, описать комплекс программ. Из введения на стр. 12 следует, что аттестованные комплексы программ являются используемым инструментарием, т.е., видимо, не создаются, ибо уже существовали. По-видимому, к комплексу программ относится п.5 новых результатов, в котором сказано, что «в комплексе программ АСАДЕМ разработаны и реализованы эффективные методы». Оценки эффективности, однако, не приведены ни здесь, ни в основном тексте. Результатов расчетов крайне мало. На стр. 231 приведены три таблицы 4.5.1-4.5.3, которые не очень внятно прокомментированы и не представляют принципиальной важности, ибо дают всего лишь пример расчетов некоторых параметров при фиксированных значениях других параметров. Имеется таблица 4.9.1 на стр. 252 по расчету модельной задачи, к эффективности метода отношения не имеющая, а также таблицы 5.2.1-5.2.2 по расчету Кэф и табл. 5.4.2 по энерговыделению. Из рисунков и графиков приведен один рис. 5.3.1 – не расчетный, а иллюстративный, и один одномерный график – по азимутальному распределению флюенса (рис. 5.3.2). Следовательно, остается не ясно, что, собственно, сделано автором в этом направлении. По-видимому, к таковым следует отнести блок-схемы приложений Д1 и Д2, но из текста не понятно, что именно в блоках этих схем сделано автором.

4. Из выводов, представленных в конце глав 1, 3, 4 и 5 следует, что автором разработаны алгоритмы для решения ряда задач теории переноса нейтронов, но фраз о том, что были проведены расчеты, верифицирующие корректность работы этих алгоритмов, в выводах нет.

Тем не менее поскольку автором проведен большой комплекс работ по созданию и обоснованию численных алгоритмов решения уравнения переноса, являющийся существенным вкладом в теорию ядерных реакторов, считаем, что

указанные недостатки изложения не влияют на общую положительную оценку диссертации. Основной текст диссертации и результаты работы не вызывают сомнений в ценности многочисленных полученных автором результатов. Это уникальная как по широте охвата различных разделов теории переноса и теории реакторов, так и по глубине их теоретического анализа диссертация, в силу самой широты охвата не свободная от вышеуказанных критических замечаний.

Заключение

Диссертация Абрамова Б.Д. «Актуальные методы математического моделирования в задачах теории переноса нейтронов и теории ядерных реакторов» является завершенной научно-квалификационной работой, которая соответствует специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям. Все положения, выносимые на защиту, получены лично автором.

В диссертации изложены новые научно обоснованные наукоёмкие решения, внедрение которых вносит значительный вклад в модернизацию атомной энергетики РФ.

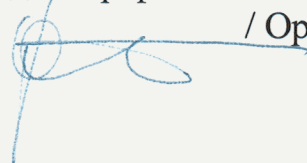
Результаты диссертации являются крупным вкладом в теорию и методы математического моделирования нейтронно-физических процессов. Они обеспечивают развитие и дальнейшее совершенствование математической теории переноса нейтронов и методов расчета ядерных реакторов.

Диссертация Абрамова Б.Д. «Актуальные методы математического моделирования в задачах теории переноса нейтронов и теории ядерных реакторов» рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв рассмотрен на заседании семинара «Методы вычислительной физики» отдела №6 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, состоявшегося 7 февраля 2017 года, в 12 ч, в конф. зале, рук. Орлов Ю.Н., секретари И.Ю. Вичев, А.С. Грушин.

Данные об организации согласно приказа МОН РФ № 326 от 16.04.2014 г. представлены.

Зав отделом №6 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор

 / Орлов Ю.Н./

7 марта 2017 г.