

Заключение комиссии

по представлению диссертации

Абрамова Бориса Дмитриевича «Актуальные методы математического моделирования в задачах теории переноса нейтронов и теории ядерных реакторов», для принятия 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 дальнейшему совершенствованию методов математического моделирования нейтронно-физических процессов в ядерных реакторах и методов численного решения краевых задач теории переноса нейтронов и теории ядерных реакторов с целью обеспечения современных требований к безопасности и эффективности атомной энергетики.

Актуальность

Математическая теория переноса нейтральных частиц (нейтронов, фотонов) интенсивно развивалась в связи с работами по использованию атомной энергии и к настоящему времени в этой области науки накоплены значительные результаты. Создано, в частности, большое количество различных методов приближенного решения задач теории переноса. Однако многие из них устарели и уже не используются. Другие же продолжают использоваться, но, зачастую, без должного математического обоснования и полного использования заложенного в них потенциала.

Вместе с тем, прогресс в области вычислительной математики и техники, приводящий к переоценке возможностей тех или иных численных методов, их качества и эффективности, а также постоянно возрастающие требования к безопасности и эффективности атомной энергетики выдвигают задачу отбора накапливаемых знаний в области теории и методов математического моделирования нейтронно-физических процессов и дальнейшего развития их до уровня, адекватного современным требованиям и возможностям, которыми располагает современная вычислительная математика и техника.

Отсюда и вытекает актуальность работ автора по модернизации известных и разработке новых математически обоснованных вычислительных методов теории переноса нейтронов и теории ядерных реакторов, таких как:

- модернизация методов декомпозиции области, где задача определения плотности нейтронов в рассматриваемой геометрически сложной области пространства сводится к задаче определения этой плотности на границах раздела подобластей более простого вида, на которые разделяется исходная область;

- модернизация методов редукции уравнений переноса с общего вида зависимости сечений от энергии и координат к уравнениям с кусочно-постоянной зависимостью;

- модернизация методов эквивалентных разностей (ЭР) редукции краевых задач к системам нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) относительно важнейших функционалов;

- модернизация многосеточных методов редукции конечно-разностных уравнений реактора на мелкой сетке к уравнениям на крупной сетке;

- методы точечной и многоточечной кинетики редукции уравнений распределенной нейтронной кинетики реактора к уравнениям с независимыми от пространственных, энергетических и угловых переменных коэффициентами.

- методы решения обратных задач кинетики реактора по определению реактивности и других коэффициентов уравнений нейтронной кинетики;

- методы теории возмущения для расчета эффектов реактивности.

Научная значимость и новизна определяется как значимостью самой проблемы все более достоверного математического моделирования весьма сложных и потенциально опасных процессов в ядерных реакторах, так и использованием для этого адекватного математического аппарата и соответствующих новых методов повышенной точности и надежности, адаптированных к возможностям современной вычислительной математики и техники.

Таким математическим аппаратом, как известно, является функциональный анализ и теория положительных операторов в полуупорядоченных банаховых пространствах. Применение этого аппарата позволило получить ряд новых результатов, касающихся принципиальных вопросов существования и единственности положительных решений для соответствующих линейных или нелинейных операторных уравнений рассматриваемых в диссертации задач теории переноса нейтронов и теории ядерных реакторов в их исчерпывающе общей постановке, разработать и обосновать эффективные методы отыскания этих решений.

На этом пути были получены следующие новые результаты.

1. Разработаны и математически строго обоснованы новые методы декомпозиции области для задач с общим видом энергетической зависимостью и подобластями, включая:

- постановку краевых задач в системах смежных подобластей;
- схемы итераций по подобластям в интегро-дифференциальных, интегральных и альбедных формулировках;
- схемы операторной прогонки и распараллеливания вычислений по подобластям;
- схемы граничных интегральных уравнений (методы ГИУ).

Эти методы являются методами отыскания положительных решений соответствующих операторных уравнений, к которым сводится новая постановка

краевых задач, исследованная в диссертации. Они могут рассматриваться в качестве обобщения известных методов решения краевых задач частного вида (односкоростных, одномерных и т.д.) на задачи более общего вида, охватывающих более широкий круг прикладных задач теории переноса нейтронов.

2. Разработаны и обоснованы новые нелинейные методы и схемы расчета функционалов на решениях краевых задач, включая

- методы ЭР редукции однородных, неоднородных и нестационарных краевых задач к СНАУ относительно важнейших реакторных функционалов;
- обобщения известного метода групп (многогруппового метода) Марчука на неоднородные и нестационарные задачи теории переноса нейтронов;
- модификации известного многосеточного метода Askew-Takeda.

Значимость методов ЭР заключается, в частности, в том, что они представляют методическую основу для качественно нового шага в направлении дальнейшего развития многогрупповых конечно-разностных методов решения краевых задач теории переноса нейтронов и теории реакторов. Обобщения метода Марчука дают новый подход к решению краевых задач теории переноса нейтронов. Модификации метода Askew-Takeda устраняют недостатки исходного метода, что повышает эффективность этого метода. Строгое математическое обоснование перечисленных нелинейных методов получено впервые.

3. Разработаны новые элементы математического моделирования прямых и обратных задач нестационарного переноса нейтронов, включая:

- уравнения распределенной кинетики с учетом зависимости постоянных распада предшественников запаздывающих нейтронов от энергии;
- уравнения точечной и многоточечной кинетики, обобщающие и уточняющие известные уравнения Усачева, Henry и Avery;
- алгоритмы метода обратной кинетики измерения реактивности и анализ погрешности метода;
- критерий выбора данных по запаздывающим нейтронам;
- методы идентификации коэффициентов уравнений нейтронной кинетики.

Указанные новые методы могут рассматриваться в качестве уточнения, обобщения и дальнейшего развития известных методов моделирования нейтронной кинетики реактора, используемых в целях диагностики и управления его режимов. В частности, новые точечные и многоточечные уравнения обобщают известные схемы расчета функционалов, а на их основе построены новые алгоритмы метода обратной кинетики, которые уточняют известные алгоритмы.

4. Развита новая методика расчета возмущений полей нейтронов и обусловленных ими эффектов реактивности, включая:

- методы расчета локальных возмущений полей нейтронов;

- методы расчета эффектов реактивности по теории возмущений;
- методы расчета эффектов при термических деформациях реактора.

Значимость этих новых методов заключается в том, что они позволяют находить решение возмущенной задачи в подобласти локализации возмущения, не прибегая к ее решению во всей области реактора; вычислять эффекты реактивности по известным возмущениям коэффициентов уравнения переноса, а не по разности значений реактивности возмущенного и исходного состояний реактора; вычислять эффекты реактивности при термических деформациях, связанных с изменением размеров, формы и взаимного расположения ячеек реактора.

5. Разработанные новые методы реализованы в комплексе программ ACADEM расчета реакторов

- вычисления флюенса быстрых нейтронов на корпус реактора;
- коррекции констант отражателя.

Эти методы расширяют возможности известного комплекса программ расчета реакторов ACADEM.

Практическое значение проведенных исследований состоит в том, что они способствуют расширению и обновлению базы знаний математической теории переноса, выводу её на качественно новый уровень математически обоснованными высокоэффективными методами численного решения задач теории переноса. Тем самым, стимулируется дальнейший прогресс в области теории математического моделирования нейтронно-физических процессов, методов численного решения краевых задач теории переноса нейтронов и задач теории ядерных реакторов. Полученные в диссертации результаты содействуют повышению качества и надежности прогнозирования характеристик ядерных реакторов как косвенно, путем развития теории, так и непосредственно - путем внедрения разработанных алгоритмов в расчетную практику.

Особое внимание в диссертации уделяется вопросам математического обоснования предлагаемых методов, включая доказательства теорем существования и единственности решений рассматриваемых линейных или нелинейных задач теории переноса нейтронов, схем отыскания этих решений.

Эти результаты использовались затем при разработке алгоритмов и программ расчетов реакторов, в частности, 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 при моделировании динамических режимов быстрых реакторов в комплексе программ COREMELT, создаваемый в

ФЭИ для моделирования динамических и аварийных режимов быстрых реакторов.

Следует отметить, что разработанный в ГНЦ РФ-ФЭИ комплекс программ АСАДЕМ предназначен для связанных трехмерных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов реакторов с квадратной и гексагональной геометрией тепловыделяющих сборок на покассетном и потвэльном уровнях. Он использовался для расчетов блоков 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, а также шведского PWR Ringhals-3.

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 работы неоднократно докладывались на семинарах, конференциях, симпозиумах и научных семинарах различного уровня, среди которых отметим: 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 “ICSdT”, 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. Общее число научных работ по теме диссертации 75, включая 32 статьи в рецензируемых 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 получены диссертантом лично.

Диссертация Абрамова Б.Д. «Актуальные методы математического моделирования в задачах теории переноса нейтронов и теории ядерных реакторов» является законченной научно-исследовательской 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.

Результаты диссертации представляются 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.

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

Диссертацию Абрамова Б.Д. «Актуальные методы математического моделирования в задачах теории переноса нейтронов и теории ядерных реакторов» рекомендуется принять к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18.

В качестве официальных оппонентов предлагаются:

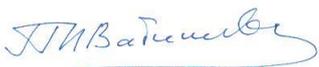
1. Агошков Валерий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института вычислительной математики РАН (ИВМ РАН);

2. Зизин Михаил Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, НИЦ «Курчатовский институт»;

3. Щукин Николай Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, НИЯУ МИФИ.

В качестве ведущей организации предлагается:

Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ РАН).

Д.ф.-м.н., профессор		Вабищевич П.Н./
Д.ф.-м.н., профессор		/ Иванченко И.М. /
Д.ф.-м.н., профессор		/ Крянев А.В. /
Д.ф.-м.н., профессор		Севастьянов Л.А. /