

## Отзыв

Официального оппонента о диссертации 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 посвящена решению актуальных проблем математического моделирования сложных и потенциально опасных процессов в ядерных реакторах. Решение этих проблем разыскивается в целом на пути развития и дальнейшего совершенствования традиционных методов расчета нейтронно-физических характеристик реакторов.

В диссертации рассматриваются проблемы развития следующих актуальных методов решения нейтронно-физических задач:

- методов декомпозиции (разделения) области;
- методов граничных интегральных уравнений (методов ГИУ) редукции краевых задач к ГИУ по границам раздела однородных подобластей;
- нелинейных методов эквивалентных разностей редукции краевых задач к системам нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) относительно важнейших функционалов типа интегральных по энергетическим группам, пространственным ячейкам и угловым секторам потоков нейтронов и т.д.;
- обобщений известного нелинейного метода групп (многогруппового метода) Г.И.Марчука на неоднородные и нестационарные задачи;
- методов расчета локальных возмущений полей нейтронов и сопутствующих им эффектов реактивности;
- методов точечной и многоточечной нейтронной кинетики реактора;

- методов решения обратных задач теории реакторов по идентификации реактивности и других коэффициентов уравнений точечной кинетики на основе измеряемой зависимости потока нейтронов от времени;
- нелинейных методов грубой сетки редукции многогрупповых конечно-разностных уравнений реактора на мелкой сетке к уравнениям на крупной;
- методов расчета флюенса быстрых нейтронов на корпус реактора и коррекции многогрупповых констант отражателя.

Методы, представленные в диссертации, могут рассматриваться в качестве обобщения, уточнения и дальнейшего развития соответствующих известных актуальных методов решения нейтронно-физических задач на задачи с общего вида энергетической, угловой и пространственной зависимостью сечений и подобластями. Их обоснование проводится автором, следуя основополагающим работам Г.И. Марчука, В.С. Владимирова, С.Б. Шихова и других авторов методами функционального анализа и теории положительных операторов в полупорядоченных банаховых пространствах. Это позволило получить ряд новых результатов, касающихся вопросов разрешимости рассматриваемых в диссертации задач и методов отыскания соответствующих решений.

Были получены, в частности, следующие новые результаты.

***1. Разработаны модификации метода декомпозиции области для решения краевых задач для кинетических интегро-дифференциальных уравнений переноса нейтронов с общего вида энергетической зависимостью и подобластями, включая:***

- постановку краевых задач в системах смежных подобластей;
- новые дифференциальные, интегральные и альбедные алгоритмы метода итераций по подобластям;
- новые алгоритмы метода граничных интегральных уравнений (ГИУ).

Эти модификации являются методами отыскания положительных решений соответствующих операторных уравнений в банаховых пространствах с конусами, к которым сводится указанная постановка краевых задач, исследованная в диссертации. Они могут рассматриваться в качестве обобщения и дальнейшего развития известных методов решения краевых задач частного вида (односкоростных, одномерных и т.п.) на задачи общего вида.

***2. Разработаны и обоснованы новые методы расчета функционалов на решениях краевых задач, включая:***

- методы эквивалентных разностей (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 предоставляют методическую основу для качественно нового шага в направлении дальнейшего развития многогрупповых конечно-разностных методов численного решения краевых задач теории переноса нейтронов и теории реакторов.

Обобщения известного метода Марчука дают новый подход к этой проблеме.

Модификации метода Askew-Takeda устраняют недостатки исходного метода, применяемого в ряде версий известного кода JARFR расчета быстрых реакторов. Использование же их в комплексе программ JARFR свидетельствует о наличии в диссертации оригинальных результатов одновременно из трех областей: математического моделирования, численных методов и комплексов программ, как этого требует формула специальности 05.13.18.

**3. Разработаны новые элементы математического моделирования и численного решения прямых и обратных нестационарных задач кинетики реактора, 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, анализ погрешностей метода;
- новый критерий выбора данных по запаздывающим нейтронам;
- методы идентификации коэффициентов уравнений нейтронной кинетики.

Указанные новые элементы являются уточнением известных методов моделирования нейтронной кинетики реактора и могут использоваться для дальнейшего совершенствования методов диагностики его режимов.

Результаты этого раздела соответствуют мировому уровню в теории реакторов.

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

- методы расчета локальных возмущений полей нейтронов;
- методы расчета эффектов реактивности по точной теории возмущений;
- методы расчета эффектов при термических деформациях ячеек реактора.

Эти методы открывают новые возможности для применения методов теории возмущений при моделировании динамических процессов в реакторах.

**5. Разработаны и реализованы в комплексе программ АСАДЕМ расчетные эффективные методы:**

- расчета флюенса быстрых нейтронов на корпус реактора;

- коррекции констант отражателя.

Эти результаты, наряду с вышеприведенными, являются, в согласии с формулой специальности 05.13.18, оригинальными результатами одновременно из трех областей: математического моделирования, численных методов и комплексов программ.

Из сказанного выше очевидна **актуальность диссертации, ее научная новизна и научная и практическая значимость.**

**Достоверность и обоснованность** результатов работы, а также **полнота изложения материалов в публикациях** подтверждается доказательствами теорем, сравнением полученных результатов с результатами других авторов, положительными оценками на российских и международных конференциях, и 32 статьями в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, включенных в список системы Scopus.

**Апробация и внедрение результатов диссертации.** Положения работы представлялись на многочисленных российских и международных конференциях и симпозиумах, указанных в автореферате и диссертации.

Полученные в диссертации результаты использовались при разработке алгоритмов и программ расчетов реакторов и, в частности, при:

- анализе методов расчета и измерения эффектов реактивности на критическом стенде БФС ФЭИ и реакторе БН-600;
- 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.

Следует отметить, что разработанный в ГНЦ РФ-ФЭИ и аттестованный в 2012 г. комплекс программ ACADEM использовался для расчетов блоков Би-

либинской, Балаковской и Курской АЭС и применялся в рамках проекта ТВС-КВАДРАТ для расчетов бельгийских PWR Tihange – 1 и Tihange – 2, а также шведского PWR Ringhals-3.

Изложенные в работе методы, подходы, результаты и выводы могут быть рекомендованы к использованию в научных учреждениях атомной отрасли и, в частности, в АО «ГНЦ РФ–ФЭИ», НИЯУ МИФИ, НИЦ «Курчатовский институт», АО «НИКИЭТ» и др.

Перечисленные выше положения характеризуют **достоинства** диссертации. К ее **недостаткам** общего характера можно, вероятно, отнести некоторое смещение акцентов в сторону теоретических исследований. Приведу конкретные замечания по диссертации.

#### **Замечания по теоретическим аспектам.**

1. Автор рассматривает уравнение переноса с зависимостью от энергии  $E$ , причем нижняя граница  $\underline{E}$  энергетического интервала может быть равна нулю. Само уравнение он записывает в таком виде, что коэффициент  $\Sigma$  (- "полное макроскопическое сечение") в уравнении ведет себя как  $\sim 1/\sqrt{E}$ , т.е. он неограничен. Для исследования задач для такой формы должны вводиться не обычные лебеговы пространства, а весовые пространства (В.С. Владимиров, В.И. Агошков). Отмечу, что ряд авторов записывают уравнение переноса, когда в него входит производная по направлению скорости в виде  $(\vec{v}, \nabla)\varphi$  или  $\sqrt{E}(\Omega, \nabla)\varphi$ , и входит коэффициент " $\sqrt{E}\Sigma$ " (именно он ограничен!), а не  $\Sigma$ . Анализ задач с такой формой записи уравнения переноса можно проводить в "обычных лебеговых пространствах" (С.Б. Шихов, А.В. Крянев, В.И. Агошков).

Если этого не делать, то возникает такой "казус": рассмотрим функцию  $\varphi \equiv 1$ , определенную по пространственным переменным на шаре. Эта функция принадлежит  $L_p$ ,  $1 \leq p \leq \infty$ , имеет следы на границе, равные единице, сколь угодно гладкая. Но ее нельзя отнести к области определения оператора переноса  $L$ , рассматриваемого в диссертации, поскольку значение оператора  $L$  на этой функции не принадлежит даже гильбертову пространству  $L_2$ , так как  $L\varphi = \Sigma \sim 1/\sqrt{E}$  и  $(L\varphi) \notin L_2(Y)$ .

Кроме того, автором диссертации не совсем полно дано описание пространств функций, заданных на границах исходной области и ее подобластей (если рассматривать, например, метод декомпозиции области). Как показано в работах Агошкова В.И., здесь необходимо вводить два типа пространств функций (с модификацией их при наличии зависимости от энергии  $E$ ). Без использования упомянутых выше функциональных пространств нельзя провести строгое исследование математических задач для уравнения переноса и, в частности, дать обоснование метода декомпозиции области и оценить скорость его сходимости. К сожалению этих исследований в диссертации нет. Это же замечание можно отнести и к работе [45], на которую много ссылок в диссертации и в которой, как пишет автор, приводятся доказательства ряда утверждений диссертации в ней уже опущенные.

2. На стр. 32-33 автор вводит области определения оператора переноса. Делает это, вводя функции вида (2.9), (2.15) функциями  $\varphi, f$  из лебеговых пространств (то есть из "хороших пространств"). Однако такой оператор не будет, вообще говоря, замкнутым, поскольку он был расширен на функции с "более широким набором" граничных значений (см. работы В.И. Агошкова). На стр. 34 (Замечание 1.2.1) автор пишет, что таких функций не будет возникать, если  $f$  заранее будет выбрано из лебеговых пространств. Однако, если, например, рассматривается метод декомпозиции области с поверхностью раздела, пересе-

кающейся (или соприкасающейся) с внешней границей, то в силу особенностей в точках пересечения (или соприкосновения) будут возникать "граничные функции", не принадлежащие пространствам типа  $L_p(\Gamma_{\pm})$ , рассматриваемых автором. Отмечу также, что в работе Агошкова В.И. [34] существование следов на границе исходной области и на подобластях, на которые она разбивается при рассмотрении "метода декомпозиции области", доказывается при введении требования липшицевости границ области и подобластей. Такого ограничения в диссертации нет.

3. При введении нормы графика (2.19) (стр.35) автор неправильно дает ссылку на [5], стр.24. (В известной работе В.С. Владимирова рассматриваются задачи только с "нулевым граничным условием". Подобные нормы графика исследованы в книге В.И. Агошкова (см. [34])).

4. На стр. 38 появляется условие (2.29): " $r(L^{-1}k) < 1$ ". Многие утверждения (Теоремы и т.п.) доказываются при условии выполнения этой оценки. Однако конструктивных оценок для  $r(L^{-1}k)$  (а они должны зависеть от параметров задачи, диаметра области, от  $\underline{E}$ ,  $\bar{E}$  и др.) в диссертации нет!? Такие оценки наиболее интересны. Если только говорить "пусть выполнено условие (2.29)", то доказательство сходимости итерационного процесса (2.31) (стр. 38,39), который лежит в основе почти всех алгоритмов диссертации, является тривиальным.

5. В Лемме 1.2.6 (стр. 40) рассматривается оператор  $A$  в банаховом пространстве  $L_p$ . Целесообразно дать пояснения, что автор понимает под неравенством " $0 \leq A_1 \leq A$ ".

6. На стр. 49 записывается (см. (3.14),(3.15)) метод последовательных приближений и автор называет "методами...итераций...по подобластям" и "методами декомпозиции области" (см. название Главы I). Под "методами декомпозиции области" понимаются другие методы. А это есть одна из реализаций итерационных методов типа Якоби, Зейделя, Некрасова. Так, например, если убрать



номера итераций, то вопрос: а как решать уравнение для  $\Psi$  в этом случае? То же замечание относится к алгоритмам на стр. 54.

7. В §1.8 автор рассматривает алгоритмы "распараллеливания по подобластям". Целесообразно привести результаты расчетов по этим алгоритмам и оценить их эффективность "на практике".

8. При чтении §2.3 опять таки возникает вопрос о пространствах для "граничных функций", а также замечание, что здесь излагается "обычный метод последовательных приближений". Если этот итерационный процесс будет медленно сходиться, то процесс численного решения исходной задачи, базирующийся на ГИУ, может быть неэффективным.

9. В уравнениях (3.1а,б) (стр. 139) функции  $Q, f$  непрерывно зависят от  $E$ , а в уравнениях (3.2а,б) левые их части кусочно-постоянные по  $E$ , а правые - непрерывны (?!). Вероятно, правильнее в правых частях уравнений (3.2а,б) также надо рассматривать многогрупповые приближения к  $Q, f$ .

10. На стр. 157, 6-ая строка сверху: не надо ли требовать " $\psi \geq 0$ "?

11. Есть ли практическая реализация изложенного на стр. 171-172? Или это очередное "теоретическое развитие"?

12. В §4.5 рассматриваются некоторые обратные задачи для уравнений кинетики. Здесь говорится об измерении (расчете) потока нейтронов  $n(t)$  в реакторе. Обозначения для функции поля измерений нет. Пусть это будет  $n_{obs}(t)$ . Можно только догадываться, что при рассмотрении формулы (5.4) в ней  $n(t)$  заменяется на  $n_{obs}(t)$ ? Здесь желательно сформулировать обратные задачи в строгой форме (!), ответить на вопрос о корректности поставленных задач, а затем уже переходить к алгоритмам их решения.

**Замечания редакционно-методического характера.**

1. Название диссертации слишком общее и не выделяет ту проблему, на решение которой направлена диссертация.
2. Автор (начиная уже со Введения) слишком вольно трактует понятие "метода декомпозиции области". Фактически этим методом он называет многие из известных алгоритмов (методы граничных интегральных уравнений, "альбедные алгоритмы метода итераций по подобластям" и др.), авторы которых не относили их к "методам декомпозиции области".
3. На стр. 50 (и далее) вместо приведения здесь доказательства утверждений дается ссылка на работы автора [45] и др. Считаю, доказательства должны быть приведены в диссертации. Можно заметить, что публикации даже в "солидных журналах" могут содержать ошибки.
4. На стр. 52 приводятся условия сшивки (4.1а), (4.1б) на границах раздела областей. Вопрос: равенства (4.1а), (4.1б) (см. также стр. 53) в каких пространствах? (См. замечания оппонента о возможной необходимости введения специальных пространств "граничных функций", если не вводить ограничения на способ разбиения исходной области).
5. Вопрос: алгоритмы на стр. 61, 67 (и ряде других мест диссертации) протестированы численно? (оппонент не нашел таких расчетов). Является ли это только "теоретическими рассуждениями", которые автор называет "развитием" методов и которые мало кто будет использовать в "практических расчетах".
6. Стр. 77, 2-ой абзац. В настоящее время в численных расчетах очень часто применяется именно метод конечных разностей (дискретных ординат и т.п.) в приложении к дифференциальным уравнениям. Метод ГИУ применим к задачам для специального вида областей, коэффициентов и т.д. Поэтому оппонент не стал бы утверждать, что он успешно конкурирует с методом конечных разностей.

7. Возможно в § 5.4 используются известные "многогрупповые константы или приближения", а не рассматриваемые в диссертации. Кроме того, здесь можно обратить внимание на то, что эта часть диссертации содержит не только результаты автора (но и его коллег), а само уравнение (4.4а) есть одно из приближений по методу сферических гармоник. Расчеты приводимые здесь не используют уравнений переноса и алгоритмов их решения, рассмотрению которых посвящена большая часть диссертации.

8. Желательно (с учетом требования к специальности 05.13.18) более подробно описать разработанные автором при его участии комплексы программ.

### **Опечатки.**

1. Стр. 30 (1-ая строка сверху): надо писать "точку".
2. Стр. 30 (нижняя строка): правильно писать " $(x, E, \Omega)$ ".
3. Стр. 174: перед формулой (6.5) имеется упоминание "требования (5.8)". Однако (5.8) это есть обозначение "суммарного тока нейтронов" (а не требование).

### **Заключение**

Сделанные оппонентом замечания не меняют общей его положительной оценки диссертации.

Диссертация Абрамова Б.Д. «Актуальные методы математического моделирования в задачах теории переноса нейтронов и теории ядерных реакторов» является завершенной научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Результаты диссертации являются крупным вкладом в теорию и методы математического моделирования нейтронно-физических процессов, в развитие и 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» соответствует специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а ее автор Борис Дмитриевич Абрамов заслуживает присвоения ему ученой степени доктора физико-математических наук за дальнейшее развитие и математическое обоснование методов математического моделирования в задачах теории переноса нейтронов и теории ядерных реакторов.

Официальный оппонент,  
Гл.н.с. ИВМ РАН,  
д.ф.-м.н., профессор

Агошков В.И.

15.03.2017

Подпись Агошкова В.И. заверяю  
Ученый секретарь ИВМ РАН  
д.ф.-м.н., профессор



Шутяев В.П.