

**ГОСКОРПОРАЦИЯ «РОСАТОМ»
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА Е.И. ЗАБАБАХИНА**

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Волощенко Андрея Михайловича «Адаптивные положительные аппроксимации и согласованная КР1 схема ускорения итераций для уравнения переноса в задачах радиационной защиты» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

В связи с ускоренным развитием ядерной энергетики возрастают требования к ее безопасности, и, следовательно, к точности, надежности и оперативности предсказания поведения ядерных энергетических объектов в различных ситуациях. Развитие ядерной энергетики и ядерной промышленности предполагает наличие возможности проведения надежных расчетов радиационной защиты ЯУЭ от проникающих излучений в различных ситуациях на основе решения уравнения переноса нейтронов, фотонов и заряженного излучения. За последние годы произошло заметное развитие методов, алгоритмов и расчетных кодов решения уравнения переноса излучения для различных ядерных приложений, связанное, в первую очередь с бурным развитием возможности рассчитывать прямыми численными методами задачи большой размерности, например, полномасштабные ядерные энергетические реакторы.

Диссертация Волощенко А.М. посвящена решению актуальной проблемы математического моделирования ядерных энергетических установок, а именно: развитию и программной реализации S_n -методов расчета радиационной защиты ядерных реакторов. В диссертации представлены результаты научных исследований автора, связанные с решением следующих задач:

1. Разработкой положительной второго порядка AWDD схемы для 1D криволинейных, 2D и 3D геометрий и положительной адаптивной WLD-WLB/QC схемы 3-4-го порядка точности
2. Разработкой согласованных с WDD и WLD-WLB/QC схемами KPI1 схемы ускорения внутренних и внешних итераций по области термализации нейтронов и по источнику деления при решении подкритической задачи
3. Разработкой алгоритмов расчета электронно-фотонного и адронного каскадов в различных приближениях.
4. Разработкой оригинальной методики распараллеливания вычислений, основанной на использовании Open MP интерфейса и КВА алгоритма.
5. Разработкой методики аппроксимации геометрии и источника задачи, основанной на использовании интерфейса между программой, реализующей метод Монте-Карло, и S_n кодами, а также VF метода, поддерживающего локальный баланс масс/источников излучения в системе.
6. Реализацией разработанных алгоритмов в комплексах из 1D, 2D и 3D S_n кодов РОЗ-6.6, КАСКАД-С и КАТРИН для решения уравнения переноса нейтрального и заряженного излучения в задачах радиационной защиты.

В главе 1 рассмотрены построение и свойства AWDD схемы, которая в значительной степени удовлетворяет требованиям, предъявляемым к разностным схемам для решения уравнения переноса: консервативности, 2-го порядка аппроксимации, возможности использования в многомерной криволинейной геометрии, арифметической простоты алгоритма, положительности, приемлемого уровня монотонности, хорошего сочетания с алгоритмами ускорения итераций по интегралу рассеяния. Рассмотрено также семейство взвешенных нодальных WLB/QC – LD схем 2-4-го порядка точности, как средство для построения адаптивной положительной схемы высокого порядка точности, обладающей требуемыми свойствами.

Следует подчеркнуть высокий математический уровень разработок, многие важные результаты сформулированы в виде соответствующих теорем. В частности, доказана теорема о необходимых и достаточных условиях монотонности WDD схемы.

Многомерное уравнение переноса имеет большую размерность, а сам оператор переноса является интегро-дифференциальным. Отсюда следует, что при решении разностных уравнений приходится применять итерационные методы. Хорошо известно, что метод простых итераций во многих случаях сходится плохо. Поэтому нельзя обойтись без ускорения итераций. В диссертации этому вопросу уделяется большое внимание, ему посвящены четыре из восьми глав. За основу взят КР1 метод ускорения итераций, в котором основная тяжесть итераций перекладывается с кинетического уравнения большой размерности на P_1 -приближение низкого уровня. В главах 2, 3 и 4 рассмотрены согласованные КР1 схемы ускорения внутренних итераций для 1D, 2D и 3D геометрий, соответственно. Следует подчеркнуть, что автором предложен оригинальный метод согласования КР1 уравнений с WDD схемой для уравнения переноса. По уровню согласованности он превосходит известную многошаговую процедуру Ларсена, хотя последняя обладает большей универсальностью. В приведенных численных примерах выигрыш в числе итераций КР1-метода по сравнению с простыми итерациями достигает более двух порядков для r, z и x, y, z -геометрий.

В главе 5 КР1 применен к ускорению внешних итераций по области термализации нейтронов и по источнику деления при решении подкритической задачи. Особенностью задач этого класса является наличие межгрупповых переходов вверх по группам, что затрудняет сходимость ускоряющих итераций. Для решения данной задачи Волощенко А.М. предложил специальное представление ускоряющих поправок с факторизованной энергетической зависимостью. Причем алгоритм определения формы спектра для ускоряющих поправок основан на оценке энергетической зависимости собственной функции, отвечающей наиболее медленно убывающей Фурье-гармонике ошибки итерационного метода Гаусса-Зейделя (неускоренных внешних итераций). Численные расчеты радиационной защиты реакторов ВВЭР-440, ВВЭР-1000 в 2D,

3D геометриях по программам КАСАД-С, КАТРИН, соответственно, подтверждают эффективность нового метода КР1 ускорения итераций. Выигрыш составляет от 5 до 10 раз по числу итераций в зависимости от разных параметров.

В неодномерных геометриях наиболее сложным элементом построения КР1 схемы ускорения итераций является алгоритм решения P_1 системы для ускоряющих поправок. Для этой цели в 2D геометрия в диссертации используется циклический метод переменных направлений (ADI метод), а в 3D геометриях – циклический метод расщепления. При этом теоретическое обоснование известно только для циклического ADI метода в случае гомогенной задачи, а для циклического метода расщепления такое обоснование отсутствует. Однако, приводимые в диссертации результаты численного эксперимента свидетельствуют, что данный алгоритм устойчив и достаточно успешно работает. Реально решаемые задачи гетерогенны. В этом случае оценка границ спектра P_1 оператора по каждой из переменных, которая необходима для выбора шагов ADI метода (метода расщепления), выполняется для гомогенизированной задачи. При неудачном выборе шагов может возникать медленная сходимость (либо отсутствие сходимости) ADI метода (метода расщепления). Волощенко А.М. предложен оригинальный способ борьбы с этой неустойчивостью, заключающийся в раздвижении границ спектра по заданному закону. Как показал численный эксперимент, предложенный алгоритм коррекции границ спектра практически всегда приводит к достаточно быстройходимости итераций ADI метода (метода расщепления).

Численные методы, разработанные в первых пяти главах диссертации, Волощенко А.М. успешно применяет к задачам расчета переноса электронно-фотонного и адронного каскадов в мишенях и радиационной защите ускорителей, в бланкетах ADS систем, а также в медицинской физике. 1D, 2D и 3D S_n программы РОЗ-6.6, КАСКАД-С и КАТРИН были модифицированы для решения данного класса задач. Разностные аппроксимации и итерационные алгоритмы в задачах переноса заряженного излучения рассмотрены в главе 6. Перенос заряженных компонент описывается в рамках уравнения Больцмана-Фоккера-Планка (БФП). Рассмотрены AWDD метод и согласованная КР1 схема ускорения сходимости внутренних итераций для БФП уравнения. Эффективность разработанных

алгоритмов демонстрируется на многочисленных результатах численного моделирования переноса электронно-фотонного и адронного каскадов. Приводятся результаты автора в сравнении с методом Монте-Карло и экспериментальными данными, получено хорошее согласие.

Многомерные задачи переноса частиц, обладая большой размерностью фазового пространства, весьма дороги для численного моделирования. Поэтому для обеспечения расчетов за приемлемое время применяют параллельный счет. Этой проблеме Волощенко А.М. уделяет значительное внимание. В главе 7 им предложена оригинальная методика распараллеливания, основанная на использовании Open MP интерфейса и КВА (Koch, Baker, Alcouff) алгоритма. Эта методика реализована в 2D и 3D программах КАСКАД-С и КАТРИН. КВА алгоритм применяет пространственную декомпозицию расчетной области на примерно одинаковые подобласти. При этом каждая подобласть рассчитывается в определенной последовательности, в зависимости от заданного направления полета частиц. Последовательность расчета подобластей обеспечивает каждой из рассчитываемых областей правильные граничные условия в соответствии с неявным бегущим рекуррентным счетом ячеек сетки. Такой принцип счета реализуем на прямоугольных ортогональных сетках, которые применяются в комплексах программ КАСКАД-С и КАТРИН.

Численные эксперименты по расчету радиационной защиты ВВЭР-1200 подтвердили высокую эффективность предложенного алгоритма распараллеливания. При наличии достаточно большой оперативной памяти астрономическое время расчета радиационной защиты ВВЭР-1200 в 3D геометрии, как правило, не превышает 1 суток, а в 2D геометрии – 1 часа на 6-ти ядерном РС класса Intel Core i7. Это весьма приемлемые времена для проектных расчетов.

Разработанные алгоритмы реализованы Волощенко А.М. (совместно с соавторами) в комплексе программ из 1D, 2D и 3D S_n кодов РОЗ-6.6, КАСКАД-С и КАТРИН для решения уравнения переноса нейтрального и заряженного излучения в задачах радиационной защиты. Разработанный комплекс программ позволяет использовать для расчета радиационной защиты стандартные многогрупповые и мультигрупповые библиотеки сечений: CONSYST/ABBN-93, библиотеки сечений из системы SCALE-6.1.2, проблемно-ориентированные библиотеки сечений:

BUGLE-96, BGL-1000, BGL 440 и др. Для расчета переноса электронно-фотонного каскада используется константная система CEPXS-BFP, представляющая собой адаптированную Волощенко А.М. версию константной системы CEPXS (Sandy Nat. Lab. USA). Для расчета переноса адронного каскада используется отечественная система САДКО-2.4 в сочетании с одной из стандартных библиотек сечений для нейтронов и фотонов.

В главе 8 рассмотрены используемые алгоритмы аппроксимации геометрии и источника на разностной сетке задачи. Задание 3D геометрии ЯЭУ и источника деления для их использования в расчете радиационных полей S_n методом представляет собой весьма сложную и большую по объему информационно-вычислительную задачу. Для решения этой задачи Волощенко А.М. применяет методику, основанную на использовании интерфейса между известной программой MCU, реализующей метод Монте-Карло, и S_n кодами, а также VF (volume fraction) метода, поддерживающего локальный баланс масс/источников излучения в системе.

Все шесть положений, выносимых Волощенко А.М. на защиту, являются научно значимыми и хорошо обоснованными. **Научная новизна** результатов, представленных в диссертации, состоит в следующем:

- Разработаны положительные AWDD схемы для 1D криволинейных, 2D и 3D геометрий и адаптивная схема 3-4-го порядка точности, основанная на использовании семейства взвешенных WLD-WLB/QC схем
- Разработана согласованная с WDD и WLD-WLB/QC схемами KP1 схема ускорения внутренних и внешних итераций по области термализации нейтронов и по источнику деления при решении подкритической задачи
- Разработан алгоритм расчета электронно-фотонного и адронного каскадов в различных приближениях
- Разработана оригинальная методика распараллеливания вычислений, основанная на использовании Open MP интерфейса и KBA алгоритма

- Разработана методика аппроксимации геометрии и источника задачи, основанная на использовании интерфейса между программой, реализующей метод Монте-Карло, и S_n кодами, а также VF метода, поддерживающего локальный баланс масс/источников излучения в системе
- Реализованы (совместно с соавторами) разработанные алгоритмы в комплексе из 1D, 2D и 3D S_n кодов РОЗ-6.6, КАСКАД-С и КАТРИН для решения уравнения переноса нейтронного и заряженного излучения в задачах радиационной защиты

Достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с аналитическими решениями, сопоставлением с опубликованными экспериментальными данными, а также расчетными данными других авторов. Волощенко А.М. выполнена детальная верификация комплекса разработанных программ на большом числе бенчмарков. В диссертации приведены результаты тестирования программ при использовании различных разностных аппроксимаций и схем ускорения итераций; приведены численные результаты, демонстрирующие эффективность реализованных алгоритмов распараллеливания вычислений. Разработанная 3D S_n программа КАТРИН аттестована Ростехнадзором для расчета радиационной защиты реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что разработанный комплекс S_n программ используется для решения широкого класса задач радиационной защиты ЯЭУ, снабжен достаточно полной документацией, позволяющей его использование без участия авторов. Комплекс внедрен в ряде научных центров и опытно конструкторских бюро РОСАТОМа: НИЦ «Курчатовский институт», АО ГНЦ РФ «ФЭИ», ОАО ОКБ «ГИДРОПРЭСС», ГНЦ РФ «ИФВЭ», ОАО ОКБ «НИКИЭТ», а также передан в отечественные и зарубежные библиотеки программ: ОФАП ЯР, RSICC и NEA Data Bank.

Основные положения диссертации докладывались на многочисленных отечественных и международных конференциях и семинарах. По теме диссертации опубликовано более 120 научных работ в отечественных и зарубежных журналах,

препринтах и научно-технических отчетах ИПМ РАН, в том числе 17 публикаций в журналах из списка ВАК и ведущих зарубежных рецензируемых научных журналах.

Положения, выносимые на защиту, научно значимы и хорошо обоснованы.

По работе имеется следующее замечание. Представленные в диссертации алгоритмы (AWDD схема, KP1 метод ускорения, КВА принцип параллельности) ориентированы на 1D, 2D, 3D геометрии, но с применением прямоугольных ортогональных сеток. При этом не обсуждаются наиболее эффективные по точности и весьма перспективные криволинейные неортогональные сетки (включая нерегулярные). Именно они дают возможность строить сетки заданной подробности по отдельным физическим областям с точным отслеживанием границ раздела сред. Хорошо бы знать, обобщаются AWDD схема, KP1 метод ускорения, КВА принцип параллельности на сетки нового типа?

Но приведенное замечание не снижает общей высокой оценки представленной работы. Диссертация Волощенко А.М. является содержательным, оригинальным и законченным научным исследованием. В ней решена крупная научная проблема: разработаны и программно реализованы численные алгоритмы решения уравнения переноса нейтрального и заряженного излучения S_n методом в 1D, 2D, 3D геометриях, основанные на использовании положительных адаптивных аппроксимаций уравнения переноса 2-го порядка точности (2-4-го порядка точности для 1D и 2D геометрий), согласованных схем ускорения внутренних и внешних итераций, оригинальной методики расчета электронно-фотонного и адронного каскадов, оригинального варианта реализации КВА алгоритма распараллеливания вычислений, позволяющие решать широкий класс задач радиационной защиты с высокой точностью и приемлемыми вычислительными затратами. Результаты, представленные в диссертации, прошли широкую апробацию в печати и в докладах на научных конференциях. Волощенко А.М. известен научной общественности как высококвалифицированный специалист в области разработки методов и комплексов программ для проведения расчетов радиационных защит. Данная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к докторским диссертациям, а ее автор безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по

специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

Официальный оппонент главный научный сотрудник ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ, доктор физико-математических наук, профессор

Гаджиев А.Д.



Гаджиев
4.09.15

Подпись официально оппонента Гаджиева А.Д. заверяю. Ученый секретарь НТС ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ, кандидат физико-математических наук

Ногин В.Н.

