

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03 НА БАЗЕ
ИНСТИТУТА ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ им. М.В. Келдыша РАН ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от « 8 » октября 2015 г., № 12

О присуждении **Волощенко Андрею Михайловичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Адаптивные положительные аппроксимации и согласованная КР1 схема ускорения итераций для уравнения переноса в задачах радиационной защиты», в виде рукописи, по специальности 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 29 января 2015 года, протокол № 4, диссертационным советом Д002.024.03 на базе ФГБУН Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 125047, Москва, Миусская пл., д.4, приказ №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Волощенко Андрей Михайлович**, 1950 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Процессы второго порядка в магнитном поле» защитил в 1976 году, в диссертационном совете Отделения экспериментальной и теоретической физики №2, созданном на базе Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, работает заведующим сектором в ФГБУН Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Диссертация выполнена в секторе №2 «Численные методы решения задач переноса излучения» отдела №6 «Вычислительная физика и кинетические уравнения» Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Официальные оппоненты:

1. **Ковалишин Алексей Анатольевич**, доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», руководитель отделения физики и моделирования энергетики курчатовского ядерно-технологического комплекса;

2. **Никитин Анатолий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежала», отдел физики защиты и радиационной безопасности, главный научный сотрудник;

3. **Гаджиев Ахмед Далгатович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е. И. Забабахина, главный научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского» г. Обнинск, в своем положительном заключении, подписанном начальником отдела, к.ф.-м.н. А.П. Пышко, г.н.с. и д.ф.-м.н., профессором Э.Е. Петровым, указала, что «... диссертация Волощенко А. М. посвящена развитию и программной реализации S_n метода в применении к задачам расчета радиационных характеристик конструктивных элементов, где применяются ядерные технологии. ...Волощенко А. М. разработаны эффективные разностные схемы 2-4-ого порядка точности, согласованные схемы ускорения внутренних и внешних итераций, алгоритмы расчета электронно-фотонного и адронного каскадов в различных приближениях; оригинальная методика распараллеливания вычислений, основанная на использовании OpenMP интерфейса и КВА алгоритма... Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что разработанный комплекс S_n программ позволяет решать широкий класс задач при создании ЯЭУ различного применения.

...В целом диссертационная работа Волощенко А. М. является содержательным, оригинальным и логически завершенным научным исследованием. В ней решена крупная научная проблема: разработаны и программно реализованы оригинальные методы, позволяющие решать широкий класс задач в области радиационной физики с высокой точностью и с приемлемыми вычислительными затратами... А. М. Волощенко известен

мировой научной общественности как высококвалифицированный специалист в области разработки методов и комплексов программ для проведения расчетов радиационных характеристик ЯЭУ. Представленная диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18.»

В отзыве ведущей организации имеются следующие замечания:

1. Из названия диссертации можно сделать вывод, что полученные автором диссертации результаты относятся только к задачам радиационной защиты. В действительности они относятся ко всем элементам реактора, для которых нельзя обойтись без расчета линейных функционалов от потоков ионизирующих излучений, например, при расчете активности элементов реактора, их термической и радиационной стойкости и др.
2. Материал диссертации выглядел бы более выигрышно, если бы диссертант кратко сформулировал наиболее значимые научно-практические результаты в выводах по диссертации в целом или по отдельным главам, включив в них, например, оценки выигрыша расчетного времени и снижения погрешности получаемых результатов при практическом использовании разработанных им схем и алгоритмов.

В диссертации имеются ссылки на 65 научных работ соискателя по теме диссертации в виде научных статей в отечественных и зарубежных журналах, в сборниках докладов российских и международных конференций, препринтов и научно-технических отчетов ИПМ РАН, в том числе 17 в журналах из списка ВАК и ведущих зарубежных рецензируемых научных журналах. Среди них:

1. А. М. Волощенко, “ КР1 схема ускорения внутренних итераций для уравнения переноса в двумерной геометрии, согласованная со взвешенной алмазной схемой,” *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.*, **41**, №9, 1379, 2001.
2. V. A. Pechenkin, Yu. V. Konobeev, I. V. Pyshin, E. E. Petrov, V. A. Khoromskij, V. P. Kryuchkov, A. M. Voloshchenko, V. I. Tsofin, K. G. Rozanov, “Method for calculating the characteristics of the damaging dose for VVER vessel steel,” *Atomic Energy*, **100**, №5, 332-339 (2006).

3. Волощенко А.М. “КР1 схема ускорения внутренних итераций для уравнения переноса в трехмерной геометрии, согласованная со взвешенной алмазной схемой”. Ж. вычисл. матем. и матем. физ., **49**, №2, 1-30, 2009.
4. А. А. Руссков, А. М. Волощенко, М. И. Гуревич, «Уменьшение дисперсии в расчетах радиационной защиты ВВЭР посредством гибридного метода CADIS», Атомная энергия, т. 110, №1, стр. 6-12, 2011 г.
5. Yu. E. Titarenko, V. F. Batyaev, K. V. Pavlov, A. Yu. Titarenko, V. I. Rogov, V. M. Zhivun, T. V. Kulevoy, N. M. Sobolevsky, A. M. Voloshchenko, A. N. Didenko, S. M. Polozov, A. B. Koldobsky, P. N. Alekseev, P. A. Fomichenko, A. A. Dudnikov, V. A. Nevinitza, A. A. Sedov, A. A. Frolov, A. S. Lubina, A. L. Balanin, S. A. Subbotin, A. S. Subbotin, A. Yu. Stankovskiy, G. Van den Eynde, S. G. Mashnik, “Analysis of the Parameters of the Target Unit of a Molten-Salt Subcritical Electronuclear Facility,” Atomic Energy, vol. 117, Issue 1, pp. 19-28, 2014.

На автореферат диссертации поступило 5 отзывов. Все отзывы положительные, некоторые из них содержат замечания.

В отзыве начальника группы радиационной защиты, заместителя начальника отдела А.Д. Джаландинова и инженера-конструктора 1-ой категории, к.т.н. С.Н. Антонова (АО «ОКБ ГИДРОПРЕСС») сказано, что «...Диссертационная работа А.М. Волощенко посвящена актуальной задаче, связанной с разработкой новых программ, позволяющих более точно и оперативно проводить поисковые и проектные расчеты переноса нейтронов и гамма-квантов для решения задач радиационной защиты различных типов ядерных реакторов на тепловых нейтронах с достаточной для инженерной практики точностью и с использованием приемлемого объема вычислительных ресурсов.» Замечаний нет.

В отзыве начальника лаборатории ФБУ «НТЦ ЯРБ», к.ф.-м.н., с.н.с. А.И. Попыкина сказано, что «...Алгоритмы разрабатывались специально для использования возможностей современных параллельных вычислений. Они были реализованы в ряде программ для ЭВМ под руководством и при личном участии диссертанта. По мнению рецензента, цели, поставленные в

диссертации, достигнуты. Практическая ценность диссертационной работы значительна.» В отзыве имеются замечания:

1. Несмотря на заголовок диссертации, что она относится к решению уравнения переноса в задачах радиационной защиты, все методы предложенные автором, особенно методы ускорения итераций КР1, могут быть использованы при расчете активных зон, в том числе и для определения эффективного коэффициента размножения. Однако, они имеют ограничения именно при расчете радиационной защиты, связанные с прямыми прострелами, о чем не упоминается в автореферате.

2. При изложении эффективности ускорения внешних итераций по области термализации, следовало бы дать сведения о том, сколько энергетических групп в используемых многогрупповой библиотеке, относятся к области термализации, о вкладе эффекта термализации в конечный результат и как все это влияет на эффективность предложенных методов расчета.

3. В автореферате следовало бы упомянуть о том, что детерминистические методы являются основным средством для решения сопряженных задач, к которым применимы все методы решения, представленные в работе, и содержатся в разработанных им программах и упомянуть об ограничениях на решение таких задач, если они существуют.»

В отзыве начальника подразделения 77, к.т.н. С.Л. Осипова и начальника бюро подразделения 77 А.В. Саляева (АО «ОКБМ Африкантов») сказано, что «...Практическая значимость работы определяется реализацией разработанных алгоритмов и методик в комплексе S_n кодов РОЗ-6.6, КАСКАД-С, КАТРИН.» В отзыве имеется замечание:

1. Недостаточно подробно описаны ограничения на использование различных численных схем, а также VF метода при решении различных задач.

2. Отсутствует информация об эффективности алгоритма распараллеливания в сравнении с другими методами и кодами.

В отзыве ведущего научного сотрудника НИЦ «Курчатовский институт», д.ф.-м.н., с.н.с. Н.В. Султанова сказано, что «...Результаты, полученные А.М. Волощенко в диссертации, являются новыми и представляют большую практическую значимость. Разработанные методики, алгоритмы и компьютерные программы являются универсальными, применимыми для расчетов разных типов реакторов, они позволяют повысить точность расчетов радиационной защиты ядерных реакторов при ограниченном потреблении вычислительных ресурсов.» Замечаний нет.

В отзыве главного научного сотрудника НИЦ «Курчатовский институт», д.ф.-м.н., с.н.с. М.И. Гуревича сказано, что «...Развиваемый автором S_n метод относится к прецизионным методам расчета и совершенно незаменим в случаях ослабления потока частиц в существенных для пользователя областях пространства на несколько десятичных порядков необходимости получения детальной картины пространственно-энергетического распределения потока частиц или скоростей ядерных реакций. Поэтому этот метод стал основным инструментом, например, при анализе радиационных нагрузок на корпус реакторов.» В отзыве имеются замечания:

1. Есть некоторая несбалансированность изложения, Очень подробно дано обоснование разностных схем, а о методах ускорения итераций написано очень сжато. Вероятно, объем автореферата не позволял изложить все достаточно подробно.
2. Рисунок 8 следовало бы лучше пояснить.
3. Автор вел распараллеливание с помощью системы OpenMP, идеально приспособленной для ЭВМ с разделяемой памятью, например, многоядерного процессора. Следовало бы сказать, оправдано ли это распараллеливание для систем с распределенной памятью.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации объясняется их широко известной компетенцией в вопросах ядерной энергетики и радиационной защиты, высоким квалификационным уровнем, знакомством с защищаемой проблематикой.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований **разработаны**:

1. положительные AWDD схема для 1D криволинейных, 2D и 3D геометрий и адаптивная схема 3-4-ого порядка точности, основанная на использовании семейства взвешенных WLD-WLB/QC схем;

2. согласованная с WDD и WLD-WLB/QC схемами KP_1 схема ускорения внутренних и внешних итераций по области термализации нейтронов и по источнику деления при решении подкритической задачи;

3. алгоритм расчета электронно-фотонного и адронного каскадов в различных приближениях;

4. методика распараллеливания вычислений, основанная на использовании OpenMP интерфейса и KVA алгоритма;

5. 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.

6. комплекс 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 которых реализованы разработанные алгоритмы

Рассматриваемая диссертация является научно-квалификационной работой, в которой решена крупная научная проблема: разработаны и реализованы в кодах численные алгоритмы решения уравнения переноса нейтрального и заряженного излучения методом дискретных ординат в 1D, 2D и 3D геометриях, позволяющие решать широкий класс задач переноса ионизирующих излучений в радиационной защите ЯЭУ с высокой точностью и с приемлемыми вычислительными затратами. Астрономическое время расчета типичного варианта радиационной защиты РУ ВВЭР-1200 для сектора поворотной симметрии 60° с источником, заданным потвэльно, в r, ϑ, z геометрии с пространственной сеткой из 4 578 000 ячеек в P_3 приближении, с использованием 47 нейтронных и 20 фотонных групп проблемно-

ориентированной библиотеки сечений BGL1000_B7, с точностью сходимости итераций 10^{-3} , квадратурой ES_{16} для энергий $E > 3.0$ МэВ и ES_8 для $E < 3.0$ МэВ на ПК с процессором Intel Core i7 3930K по программе КАТРИН составило ~12 часов. Выбранная пространственно-угловая сетка и библиотека сечений обеспечивают точность расчета основных функционалов задачи с погрешностью не более 10%.

Достоверность результатов расчетов, полученных на основе реализованных автором разностных схем и алгоритмов ускорения итерационного процесса, подтверждена большим количеством сопоставлений с опубликованными экспериментальными данными, а также расчетными данными других авторов. Разработанный 3D S_n код КАТРИН аттестован Ростехнадзором для расчета радиационной защиты РУ с ВВЭР-440/1000/1200/ТОИ.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что в работе доказана теорема о необходимых и достаточных условиях монотонности WDD схемы, построено обобщение AWDD схемы на случай криволинейной многомерной геометрии, предложено семейство взвешенных WLD-WLB/QC схем 2-4-ого порядка точности для уравнения переноса, предложен итерационный метод решения P1 системы для ускоряющих поправок KP1 схемы в 2D и 3D геометриях.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что разработанные 1D, 2D и 3D S_n коды снабжены пре- и пост- процессорами и достаточно полной документацией, позволяющих их использование без участия авторов. Они внедрены в ряде научных центров и опытно-конструкторских бюро Росатома: НИЦ «Курчатовский институт», АО «ГНЦ РФ ФЭИ», АО «ОКБ ГИДРОПРЕСС», ГНЦ РФ ИФВЭ, АО «НИКИЭТ», а также переданы в отечественные и зарубежные библиотеки программ: ОФАП ЯР, RSICC и NEA Data Bank. 3D S_n код КАТРИН аттестован Ростехнадзором для расчета радиационной защиты реакторов ВВЭР-440, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ.

Личный вклад соискателя состоит в разработке вышеперечисленных в п. 1-4 алгоритмов для решения уравнения переноса нейтрального и заряженного излучения методом дискретных ординат и их программной реализации в 1D, 2D и 3D S_n кодах, выполнении верификационных расчетов. Методика аппроксимации геометрии и источника задачи, основанная на использовании интерфейса между программой MCU, реализующей метод Монте-Карло, и S_n кодами, разработана соискателем совместно с соавторами. Диссертация охватывает все основные вопросы поставленной научной задачи, является целостным и законченным научным исследованием.

На своём заседании 8 октября 2015 года Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация Волощенко А.М. представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и принял решение присудить Волощенко Андрею Михайловичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 21, против нет, недействительных бюллетеней - нет.

Заместитель председателя диссертационного совета

Д 002.024.03, д.ф.-м.н., профессор _____ В.Ф. Тишкин

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 002.024.03, к.ф.-м.н. _____ М.А. Корнилина

«09» октября 2015 года.