

Отзыв официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук
Иоаннисиана Михаила Викторовича
"Решение уравнения переноса нейтронов на основе модели трехмерной
многозонной кинетики с применением метода Монте-Карло"
по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

При математическом моделировании функционирования ядерных энергетических установок (ЯЭУ) приходится решать довольно сложную систему уравнений, включающую уравнение переноса относительно функции распределения в фазовом пространстве и времени, уравнения выгорания и реакторной кинетики, а также уравнения, описывающие теплогидравлические эффекты в системе. Эти системы уравнений связаны друг с другом, и их численное решение весьма затратно с точки зрения используемых вычислительных ресурсов. Это связано как с размерностью функции распределения, так и необходимой для полномасштабного моделирования подробностью пространственного, углового и энергетического представления решения. Теплогидравлические обратные связи имеют первостепенную важность при моделировании переходных процессов в ядерных энергетических установках, зачастую обуславливая их безопасность. Вопрос создания экономичных методик, особенно для моделирования нестационарных процессов, все ещё является актуальной задачей, несмотря на несколько десятилетий моделирования ядерных энергетических установок. Представленная диссертация посвящена созданию и реализации метода решения уравнения переноса на основе модели трехмерной многозонной кинетики, в которой обменные коэффициенты между зонами для заданных моментов времени вычисляются на основе стационарного прямого метода статистического моделирования Монте-Карло.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во **введении** обоснованы актуальность темы диссертации, научная новизна и достоверность полученных результатов, поставлены цели

исследования, обозначены методы исследования и практическая ценность полученных результатов, а также приведены основные защищаемые положения диссертации.

В **первой главе** изложена история метода многозонной кинетики от полученного эмпирическим путем уравнения Эйвери до работ группы ученых ФЭИ С.В.Пупко, А.В. Гулевича, О.Ф.Кухарчука, Б.Д.Абрамова и др., обосновавших метод многозонной кинетики.

Вторая глава посвящена описанию численного метода решения жесткой системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) очень большой размерности, к которой сводится задача многозонной кинетики. В основу метода положен одноитерационный метод Розенброка (3,2), основанный на трехстадийном однократно диагонально-неявном методе Рунге–Кутты. Данный метод имеет третий порядок аппроксимации и требует всего два вычисления правой части на каждом шаге по времени. На каждой стадии метода решается система линейных алгебраических уравнений с одной и той же матрицей, что позволяет строить эффективные алгоритмы. К удачам данной диссертационной работы можно отнести адаптацию данного метода к особенностям жесткой системы ОДУ многозонной кинетики. Адаптация основана на сворачивании информации по энергетическим группам мгновенных, запаздывающих и внешних нейтронов, при котором вводятся новые переменные, размерность которых равна только размерности используемых в расчете пространственных зон. Неявная схема Розенброка применяется для решения данной редуцированной системы. Математически доказано, что на основе решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений существенным образом редуцированной размерности можно восстановить решение исходной системы путем решения серии задач относительно малой размерности.

Валидация используемого метода проводилась сравнением с решением уравнений точечной кинетики на серии тестов.

Полномасштабное тестирование созданного программного комплекса было проведено на серии тестов, связанных с моделированием ВВЭР, RPCEU235, КЛТ-40С. Результаты тестирования приведены в **главе 3**. Показано, что предлагаемый в диссертации метод позволяет сократить расчетное время на разных задачах по сравнению с расчетами по программе КИР в 6 – 50 раз.

Данная работа выросла не на пустом месте — она является частью большой работы, проводимой в Курчатовском институте атомной энергии по созданию программного обеспечения для динамического моделирования реакторов на тепловых нейтронах. Мне кажется важным, что диссертант активно пользуется программными средствами, созданными коллегами, и, в свою очередь, встраивает свою работу в единый программный комплекс, предназначенный для динамического моделирования тепловых реакторов с учетом обратных связей по теплогидравлическим эффектам. Объединению с комплексом программ, рассчитывающим движение теплоносителя и теплосъём, посвящена **четвертая глава** диссертации.

На каждом этапе работы проводилось исследование точности используемых методов. Это касается количества испытаний метода Монте-Карло, которое менялось от 600 миллионов в простых задачах до 10 миллиардов при моделировании бэнчмарков. В каждой задаче исследовалась сходимость решения по количеству используемых пространственных зон. Было проведено сравнение результатов данной работы с результатами расчетов другими программными комплексами.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 журнальных статьях из списка ВАК и представлены в 6 докладах на 5 Всероссийских и Международных конференциях.

Замечания к диссертации:

1. Система уравнений многозонной кинетики применима к моделированию поведения ядерных энергетических установок на сравнительно небольших промежутках времени, т.к. не учитывает процессы выгорания топлива и изменение нейтронно-физических констант вследствие этого.
2. Подписи к рисункам и таблицам грешат излишней краткостью, так что иногда приходится догадываться, какая именно величина представлена. В качестве примера можно привести Таблицу 4.2 на стр. 100, в которой становится ясно, что таблица приведена для варианта ARO, только по признаку превышения единицы величины $K_{эфф}$, или рисунки на стр. 74, где приведены плотности потока в относительных единицах, и, опять же, приходится догадываться, что нормировка проводится на полный интеграл плотности по высоте. Примером излишней краткости является еще и то, что в работе не указано, с каким числом $N_{эксп}$ проводились многочисленные

расчеты, только в случае сравнения с результатами точечной кинетики очевидно, что это число равно 1.

3. В диссертации проводятся многочисленные сравнения с результатами работы других программ, и это очень хорошо. Для большинства программ сравнения есть краткое описание и ссылки, однако одна из основных программ сравнения КИР не описана никак.

4. Работа не свободна от досадных опечаток, грамматических и пунктуационных ошибок. В качестве примера опечаток можно привести отсутствие штрихов у аргумента времени в формулах без номера вверху стр. 17 и стр. 22, и разные обозначения для коэффициентов сборки решения на временном шаге по стадийным величинам в формуле без номера перед формулой (2.40) на стр. 44 и в ее описании, а также на той же странице в описании автоматического выбора шага. В работе встречается отсутствие согласования членов предложения по грамматическим формам, особенно в четвертой главе, и регулярное отсутствие запятых после вводных слов, в причастных и деепричастных оборотах. Однако отметим, что несмотря на это, диссертация написана хорошим научным языком и производит хорошее впечатление.

Использование модели многозонной кинетики позволяет сократить требуемое время расчетов динамических задач переноса нейтронов в активных зонах реакторов методами Монте-Карло за счет разделения временной и пространственной зависимостей решения. Отметим также, что модель многозонной кинетики позволяет аккуратно моделировать процесс движения управляющих стержней. Для пространственной зависимости используются коэффициенты связи между отдельными пространственными зонами, вычисляемые методом Монте-Карло в стационарном приближении, а для решения динамической задачи кинетики используется эффективный численный алгоритм, основанный на оригинальной адаптации (3,2) алгоритма Розенброка к особенностям решаемой жесткой системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Проведено включение в динамический расчет обратных связей по теплофизическим процессам в реакторных системах.

Считаю, что несмотря на указанные замечания, диссертация Иоаннисиана Михаила Викторовича "Решение уравнения переноса нейтронов на основе модели трехмерной многозонной кинетики с применением метода Монте-Карло" представляет собой законченное актуальное исследование, полностью удовлетворяющее требованиям ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Автореферат полно и правильно передает основное содержание работы. Считаю, что автор диссертации Иоаннисиан Михаил Викторович достоин присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

д.ф.-м.н.

24 декабря 2019 года.



Е.Н.Аристова

Сведения об оппоненте:

Аристова Елена Николаевна — д.ф.-м.н., главный научный сотрудник отдела №14 "Методы и модели в кинетике" Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН".

Раб. тел. 8(499)2207209, адрес электронной почты aristovaen@mail.ru

Почтовый адрес организации: 125047, Москва, Миусская пл., д.4

Web-сайт организации: <http://www.keldysh.ru/>

Подпись Аристовой Е.Н. заверяю:

Ученый секретарь Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

к.ф.-м.н.



А.И.Маслов