

## ОТЗЫВ

официального оппонента, Раскача К.Ф., на диссертационную работу Иоаннисиана М.В. «Решение нестационарного уравнения переноса нейтронов на основе многозонного представления с использованием метода Монте-Карло», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертация соискателя посвящена развитию методологии и программных средств для решения нестационарных задач реакторной физики. Методы и программы решения подобных задач имеют важное значение для такой практически ключевой области исследований, как анализ безопасности ЯЭУ с реакторами различного типа.

Разумеется, на данный момент имеется достаточно большое количество нестационарных нейтронно-физических программ. Однако, большая их часть основана на решении уравнения диффузии нейтронов в групповом приближении с использованием метода гомогенизации и относительно небольшого числа энергетических групп. При этом процедура подготовки эффективных групповых констант является дополнительной проблемой, которая так или иначе решается с помощью специализированных программ подготовки констант и ячеечных программ. По сравнению с диффузионным приближением заметно меньше используется метод дискретных ординат из-за его существенно большей трудоемкости, что, в силу понятных причин, особенно затрудняет анализ нестационарных процессов достаточно большой длительности. В данном случае, как и для диффузионных программ, актуальной остается проблема подготовки эффективных групповых констант. С точки зрения решения собственно временной задачи часто используемым является т.н. квазистатическое приближение. Например, оно, как правило, используется в практике проведения динамических расчетов по программам, реализующим метод дискретных ординат. В нестационарном расчете по диффузионным программам используется как квазистатический подход, так и прямое решение нестационарного уравнения диффузии.

В прошлом ситуация, подобная описанной выше, наблюдалась и в области стационарных расчетов. Затем, развитие вычислительной техники и тесно с ним связанное развитие программ т.н. прямого моделирования – прецизионных Монте-Карловских программ – привело к их очень глубокому внедрению в расчетную практику. Прецизионность в данном случае означает возможность использования подробного воспроизведения реальной геометрии рассчитываемой системы и использование т.н. поточечного представления ядерных данных, что сразу исключает необходимость в достаточно сложной «кухне» подготовки эффективных групповых констант – используемые в расчете ядерные данные могут готовиться процессинговыми кодами непосредственно на основе файлов оцененных ядерных данных.

К настоящему времени дальнейший прогресс в области вычислительной техники, все большее внедрение в расчетную практику технологии параллельных вычислений и наличие доступных отраслевым расчетчикам вычислительных кластеров и даже больших суперкомпьютеров открыло возможности внедрения прецизионных Монте-Карловских программ и в области нестационарных расчетов, включая динамические расчеты в комплексе с теплогидравлическими и термомеханическими программами. Уже сейчас созданы у нас в стране и за рубежом прецизионные Монте-Карловские программы, которые, фактически, как говорится, из первых принципов позволяют получать решение сложных нестационарных нейтронно-физических задач (одна такая отечественная программа – КИР – неоднократно упоминается в диссертационной работе и используется для кросс-верификации программных разработок соискателя). Нет никаких сомнений, что в дальнейшем такое прямое моделирование на основе метода Монте-Карло займет то же место в анализе нестационарных процессов, которое сейчас занимает в анализе

стационарных задач, – получение реперных результатов, как имеющих самостоятельное значение, так и для поддержки расчетов по инженерным кодам. Однако, сейчас, все-таки, дело до этого не дошло. Нестационарные коды прямого моделирования пока еще слишком трудоемки для того, чтобы их можно было использовать для решения всего круга нестационарных задач и для всех реакторных аппаратов. В этих условиях для методистов и разработчиков программ открывается возможность хорошо и с большой практической пользой поработать над различными модификациями метода прямого моделирования и на пограничных с ним направлениях, пытаясь сохранить как можно больше его достоинств и, вместе с тем, увеличить скорость счета, сделать расчет как можно более доступным практически «здесь и сейчас». Представляется, что работа соискателя относится к такого рода пограничному направлению.

Каким же путем пытается идти соискатель? Как оказывается, это достаточно интересный и плодотворный путь интерпретации известной теории связанных реакторов Эйвери. Точнее, даже, не самой этой теории, а общего подхода Эйвери. В этой интерпретации вся расчетная область представляется как система определенного, вообще говоря, достаточно большого, числа связанных «реакторов» – подобластей, связь между которыми осуществляется через обменные коэффициенты, которые рассчитываются методом Монте-Карло с учетом реальной геометрии системы с использованием любого энергетического представления ядерных данных, в том числе, поточечного. Отличие от теории Эйвери заключается в учете спектров мгновенных и запаздывающих нейтронов, а также внешних источников нейтронов. Этот подход не нов, однако, соискатель внес в его формализм определенное усовершенствование, сделав его более универсальным, позволив определять потоки нейтронов в заданных энергетических интервалах и областях, в том числе, в тех, в которых отсутствует делящийся материал. Последнее обстоятельство весьма существенно для приложений, т.к. одной из важных частных задач нестационарного расчета является определение показаний детекторов в точках нейтронного контроля, которые, как правило, удалены от активной зоны реактора. Автор последовательно выстраивает замкнутый расчетный алгоритм, соответствующий выбранному подходу, реализует этот алгоритм на уровне расчетных программ, включающих модуль регистрации обменных коэффициентов на базе программы MCU-TR, программу решения уравнений многозонной кинетики MRNK, динамический комплекс MRNK/КЕДР-Д. Далее в обоснование этих программных разработок автор проводит их верификацию и кросс-верификацию. Есть у разработанного подхода и определенные издержки – например, необходимость дискретизации реально непрерывных свойств системы, когда каждая подобласть рассматривается, по существу, как точечный объект с усредненными характеристиками. Да и разбивка, собственно, может проводиться по-разному. Но, представляется, что такая разбивка может быть оптимизирована под конкретный тип аппарата и далее использоваться для решения большинства задач практически без изменений. В любом случае, данная оптимизационная проблема (сходимость результатов – скорость счета) в большинстве случаев может быть удовлетворительно решена.

Исходя из вышесказанного, диссертация представляется вполне **актуальной** и своевременной, лежащей в русле практических потребностей, современных тенденций и учитывающей современные возможности. Разработанные автором алгоритмы и программы могут способствовать повышению точности расчета переходных, в том числе, аварийных процессов в ядерных реакторах. Приведенные автором данные по апробации и верификации разработанных им методов и программ свидетельствуют об **обоснованности** результатов работы. Насколько может судить автор настоящего отзыва, работа обладает **новизной** по заявленным в ней позициям. Диссертация **соответствует** требованиям Положения.

По диссертации можно сделать следующие замечания.

1) Работа содержит многократные ошибки в нумерации формул (в первых главах диссертации): нумерация формул начинается с (1.3), очевидные ошибки встречаются на стр. 13, 18, 19 (в нескольких местах), 20, 25, 40 (в нескольких местах). Непонятно, почему автор не проделал элементарную редакторскую работу и переложил это на плечи читателя.

2) В последнем абзаце на стр. 30 приведена формула для подкритичности одного из двух одинаковых баков с раствором урановой соли в зависимости от расстояния между баками. Сказано, что по этой формуле проводился расчет подкритичности. Кем проводился расчет – соискателем, экспериментаторами? Как получена формула? Кроме того, в данной формуле не определены величины  $\tau$  и  $L$ . На рисунках 2.3-2.5, где приведены сравнения расчета и эксперимента, и при их обсуждении ничего не говорится об экспериментальных и расчетных погрешностях, не указана статистика расчета.

3) Тест RPCEU235. Здесь автором дается сравнение результатов расчета по MRNK с результатами КИР и Dynamic TRIPOLI. Время счета и статистика по MRNK даются, а соответствующие данные по программам прямого моделирования – нет. Если один из ключевых моментов диссертационной работы заключается в повышении эффективности счета при сохранении преимуществ метода Монте-Карло, то игнорирование этого момента непонятно. Это замечание справедливо и для всех остальных расчетных тестов, где производится сравнение с методом прямого моделирования!

4) Тест ВВЭР-КР – очень красивый расчетный тест, разработанный с участием автора диссертации. Задача имеет очень интересное и показательное решение. Жаль только, что, как и в предыдущих тестах ВВЭР-..., результаты не снабжаются статическими погрешностями. При анализе рисунков 3.16-3.17, где есть области с заметными расхождениями, это, возможно, объяснило бы их. Как и для других тестов, нет сравнения по трудоемкости счета с методом прямого моделирования.

5) Кстати, к вопросу о погрешностях расчета по MRNK. В данном случае видится две основные составляющие: а) погрешность дискретизации расчетной области при определении коэффициентов обмена; б) статистическая погрешность расчета, связанная со статистическими погрешностями расчета коэффициентов обмена методом Монте-Карло, особенно при достаточно большом числе подобластей. Если о погрешностях (или смещениях) первого рода автор упоминает и даже во многих местах диссертации численно исследует ее, то о погрешностях второго рода ничего не говорится. Между тем, очевидно, что они будут существовать, особенно, при больших объемах расчетной области и при достаточно подробном разбиении ее на подобласти.

6) Относительно тестовой модели активной зоны реактора КЛТ-40С. Из рисунков 3.27 и 3.30 на фоне заметных статистических погрешностей не совсем понятно, совпадают ли тенденции изменения мощности в конце расчетного временного интервала. Куда пойдут кривые при продолжении расчета?

7) Тест PWR. В таблице 4.2 перечислены различные расчетные программы. Если уж они упоминаются и проводится сравнение с ними полученных результатов, то следовало бы кратко охарактеризовать данные программы или хотя бы дать соответствующие ссылки. Потом, сравнивать прецизионные программы при расчете эффективного коэффициента размножения без указания использованных библиотек ядерных данных бессмысленно, т.к., по сути, сравниваются эти библиотеки. Из-за того, что программы, с которыми производится сравнение никак не описаны, интерпретация расхождений результатов динамических расчетов на рис. 4.7 затруднительна. Автор говорит о расхождениях, но также нигде не пытается их интерпретировать с точки зрения используемых методов расчета.

Подытоживая замечания, резюмируем наиболее существенные:

- В тексте диссертации не продемонстрированы скоростные качества метода по сравнению с методом прямого моделирования при примерном сохранении точности;

- Совершенно не рассмотренным оказался вопрос о проблеме вычисления статистических погрешностей результатов, получаемых по MRNK.

Несмотря на сделанные замечания, автор данного отзыва считает, что соискателем успешно проделана очень большая и практически значимая работа. Заявленная соискателем цель работы достигнута. Разработаны методы, алгоритмы и соответствующие программы, обладающие научной новизной. Все они могут быть использованы для решения важных задач анализа безопасности ЯЭУ с реакторами различного типа. Результаты работы апробированы на конференциях и семинарах, а также опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Автор диссертации показал свою высокую квалификацию и, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Начальник лаборатории отделения Ядерных  
реакторов и топливного цикла АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»,  
доктор физико-математических наук

К.Ф. Раскач

ЗАВЕРЕНО

Первый заместитель генерального директора  
АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» по науке,  
кандидат технических наук



Д.А. Клинов