

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, научного руководителя НИОКР ПН «Прорыв» Частного учреждения «ИТЦП «ПРОРЫВ» Рачкова Валерия Ивановича на диссертацию Мосуновой Настасьи Александровны «Развитие научно-методических основ и разработка интегрального программного комплекса для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.03 — Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Диссертационное исследование посвящено различным аспектам разработки (включая развитие научно-методических основ) интегрального программного комплекса, предназначенного для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым), использующих смешанное нитридное уран-плутониевое или оксидное топливо.

Актуальность темы не вызывает сомнений и следует, в частности, из необходимости научно-технического обеспечения решения задач, поставленных в Стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списков сокращений и условных обозначений, литературы, иллюстративного материала, а также словаря терминов. Характер изложения материала соответствует логике жизненного цикла программного комплекса и расчетного обоснования безопасности объектов ядерной техники в целом, причем не только с позиций разработчика и пользователя, но и с позиций «заказчика» (каковы стратегические цели, наличие условий и ограничений, современные требования и т.д.). Такой методологический подход позволил диссертанту выйти за рамки сугубо разработки расчетных средств, высветив проблемы и сформировав новые методические подходы по целому спектру проблем разработки и верификации расчетных кодов, предназначенных для обоснования безопасной эксплуатации и повышения технико-экономических показателей новых реакторных установок. Все это позволяет сказать, что в диссертации не только решена важная научно-техническая проблема, имеющая большое отраслевое значение – разработан интегральный программный комплекс, но и внесен существенный методический вклад в вопросы разработки и верификации программных средств.

Во **введении** отражена актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также указано, где была выполнена апробация полученных результатов.

В **первой главе**, состоящей из шести разделов, приведены основные характеристики интегрального программного комплекса, по сути, «техническое задание» на его разработку. Перечень требований к функциональным возможностям программного комплекса базируется на положениях нормативных документов, международных рекомендациях, систематизации, анализе и обобщении большого количества экспериментальных данных и более чем 50-летнего опыта эксплуатации экспериментальных стендов и реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем, и в связи с этим может быть охарактеризован как исчерпывающий для современного уровня развития науки и техники.

На основе сформированного релевантного списка явлений и процессов предложено включить в состав интегрального программного комплекса 5 модулей: теплогидравлический, нейтронно-физический, твэльный, а также модули для расчёта выгорания топлива и остаточного тепловыделения.

Физические модели, которые легли в основу перечисленных выше модулей, предметно рассматриваются во **второй главе**, где в семи разделах описаны разработанные или адаптированные для нужд диссертационного исследования модели (концептуальные, физические, математические). Данный материал является ключевым для оценки качества моделирования, которое обеспечивает интегральный программный комплекс. По нему имеется 5 публикаций в рецензируемых журналах.

Третья глава (10 разделов) посвящена обеспечению программно-технического комплекса оцененными значениями свойств материалов и теплоносителей. Разработанная база данных содержит тысячи записей по свойствам материалов и теплоносителей, сформированных на основе анализа сотен доступных литературных источников, включая эксперименты последних 5 лет. Важно отметить, что наполнение базы данных не сводилось к механическому переносу в базу данных рекомендованных в известных справочниках значений (хотя в связи с объемом работы даже эта скрупулезная деятельность сама по себе заслуживает высокой оценки), диссертант исследовал первичные источники экспериментальных данных, на основе анализа которых была сформирована база данных по теплофизическим свойствам жидкого свинцового теплоносителя.

В **четвертой главе** приведено описание разработанной архитектуры программного комплекса и наиболее важные аспекты её практической реализации. Это единственная сугубо «кодовая» глава и наиболее программно насыщенные 12 разделов. Разработанная

методика выделения в программных модулях стандартизированных операций в виде отдельных функций, помещения программных модулей в виде динамически загружаемых библиотек под интегрирующую оболочку, выполнения связанного расчёта управляющей программой интегрирующей оболочки, оправдала себя, о чем можно судить по результатам верификации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, представленным в шестой главе диссертационной работы.

В **пятой главе** (она относительно небольшая по объёму – три раздела) в связи с принципиальной важностью отдельно представлена методика оценки погрешностей результатов расчёта параметров (откликов), получаемых с использованием программных комплексов, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии. Она включает в себя оценку погрешностей на базе анализа неопределённостей, обусловленных точностью используемых моделей физических процессов, входных данных, и вычислительных неопределённостей. Автор глубоко проработал этот вопрос (обращает на себя внимание наличие отдельной публикации, посвященной данной тематике).

Шестая глава (пять разделов) посвящена вопросам верификации. Рецензия этого раздела требует минимальных слов, поскольку матрицы верификации и сами результаты верификации были всесторонне рассмотрены и одобрены в рамках процедуры аттестации программных средств.

В **седьмой главе** демонстрируется применение разработанного программного комплекса ЕВКЛИД/V1 для прогнозирования поведения реакторных установок РУ БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200 в режимах нормальной эксплуатации и при её нарушениях.

В **заключении** обобщены результаты выполненных исследований и намечены перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается использованием современных физических моделей, методов расчета и результатами верификации.

Несомненную **практическую ценность** исследования подтверждает отсутствие аналога разработанному программному комплексу в части охвата количества рассматриваемых процессов и явлений, а следовательно и перечня моделируемых режимов работы реакторных установок. Разработанный программный комплекс ЕВКЛИД/V1 может использоваться предприятиями атомной отрасли.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, **обоснованы** результатами верификационных расчетов, результатами экспертизы программного комплекса и его отдельных модулей экспертами, привлеченными ФБУ «НТЦ ЯРБ», публикацией в рецензируемых журналах и рассмотрением на российских и международных конференциях, а также заседаниях

экспертных групп МАГАТЭ и ОЭСР. Всего по теме диссертации Н. А. Мосуновой опубликовано 33 печатных работы (15 – в ведущих реферируемых журналах из списка ВАК при Минобрнауки России) и получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Новизна диссертационного исследования определяется предложенными в работе методами и моделями, большая часть которых – уникальна.

Структура работы соответствует задачам и не дает оснований для замечаний.

Замечания по диссертационному исследованию:

1. В работе показано, что как нейтронно-физический модуль, так и твэльный модуль интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 рассчитывают наработку продуктов деления. Не ясно, в чем отличие двух подходов, и какой именно подход используется при выполнении интегральных расчётов.

2. Требуется пояснения, почему автором диссертационного исследования рекомендовано использовать данные по теплопроводности свинца, полученные в ИТ СО РАН в 2011 г., в то время как в 2013 г. получены результаты измерения теплопроводности свинца в более широком диапазоне.

3. Данные, представленные в разделе 3 диссертационной работы, свидетельствуют о том, что свойства материалов и теплоносителей известны в определенных диапазонах. Из работы не ясно, каким образом проводится расчёт при выходе за диапазон рекомендованных значений свойств.

4. В методике оценки погрешностей результатов расчета приведено соотношение для сравнения набора данных, определяемых временными зависимостями, в соответствии с которым разбиение временного отрезка на интервалы определяется пользователем. Соответственно, величина погрешности существенно зависит от того, каким образом пользователь выберет соответствующее разбиение, что вносит значительную неопределённость в получаемый результат.

5. В таблице 6.21 приведены погрешности расчёта параметров твэла, однако не указано с использованием каких именно моделей (усовершенствованных или инженерных) получены данные погрешности.

6. При представлении результатов расчетов РУ БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300 было бы целесообразно сравнить расчётное время, полученное при использовании последовательной и параллельной версий программного комплекса.

Заключение.

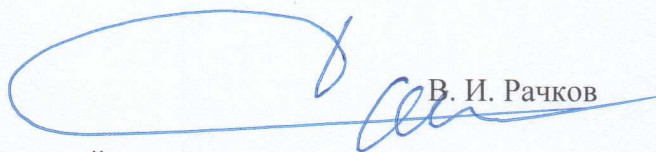
Указанные замечания не меняют общей положительной оценки диссертационного исследования.

Диссертация Н.А. Мосуновой является завершённым научно-методическим исследованием, выполнена на высоком научном уровне и вносит существенный вклад в разработку расчетных кодов и принятие научно обоснованных решений по безопасной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями.

Автореферат диссертации верно и полно отражает содержание диссертационной работы. Результаты, положения и выводы диссертации с достаточной полнотой опубликованы в научных изданиях.

Содержание диссертации полностью соответствует специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации. Диссертация «Развитие научно-методических основ и разработка интегрального программного комплекса для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями» удовлетворяет требованиям пунктов 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени доктора наук, а её автор, Мосунова Настасья Александровна, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора технических наук.

Официальный оппонент
профессор
доктор технических наук



В. И. Рачков

Частное учреждение Государственной корпорации
по атомной энергии «Росатом»
«Инновационно-технологический центр
проекта «ПРОРЫВ»
107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 4
Электронная почта: rvi@proryv2020.ru

Подпись В. И. Рачкова заверяю Главный специалист по персоналу Частного учреждения
«ИТЦП «ПРОРЫВ» _____ /М.А. Гарасова/ « 08 » 09 20 18 г.

