

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию  
Мосуновой Настасьи Александровны на тему  
«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»

В связи с усилением конкуренции в области ядерной энергетики современные требования к программным средствам анализа и обоснования безопасности атомных станций можно сформулировать следующим образом: реалистичный подход к моделированию процессов для снижения консерватизма проектов, повышения экономических показателей АЭС с непременным обеспечением высокого уровня их безопасности. Магистральным направлением решения этой задачи в мировой практике является создание программных комплексов, обеспечивающих сквозной сопряженный расчет различных по природе физических явлений, одновременно протекающих в элементах оборудования АЭС. Такие программные комплексы за счет гибкой архитектуры, позволяющей объединять, управлять и организовывать обмен данными между разнородными программными модулями, а также при реализации наиболее совершенных математических моделей, численных методов и параллельных вычислений становятся реальным инженерным инструментом в проектных расчетах обоснования безопасности.

Развитие технологий замкнутого топливного цикла, осуществляемое в рамках проектного направления «Прорыв», потребовало создания такого программного комплекса для численного моделирования мультифизических процессов АЭС с жидкометаллическим теплоносителем. Поэтому тема диссертационной работы Мосуновой Н.А., посвященной разработке научно-методических основ создания интегральных программных комплексов и их практической реализации в программном комплексе ЕВКЛИД/V1, безусловно, является актуальной и практически значимой.

Содержание диссертации изложено в семи разделах, в которых автором поэтапно проанализированы особенности создания и валидации



интегрального программного комплекса для моделирования динамических процессов реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем.

В первом разделе автором на основе анализа и обобщения опыта, накопленного по изучению процессов в энергетическом оборудовании с жидкометаллическим теплоносителем, определены доминирующие физические явления, которые должны моделироваться в сопряженной постановке для корректного описания режимов нормальной эксплуатации и режимов с нарушениями нормальной эксплуатации реакторных установок.

Исходя из перечня доминирующих явлений, сформирован состав модулей функционального наполнения программного комплекса, включая:

- теплогидравлический модуль;
- нейтронно-физический модуль;
- модуль термомеханического поведения твэлов;
- модуль систем контроля и управления.

Второй раздел посвящен обоснованию математических моделей, требующихся для описания физических явлений.

Для описания теплогидравлических процессов выбрана одномерная двухжидкостная модель. При этом автором разработана оригинальная монодисперсная модель поведения паро-газовых включений в тяжелый жидкометаллический теплоноситель (свинец, свинец-висмут), а также картограмма режимов течения и замыкающие соотношения при кипении натрия.

Для расчета трения двухфазного потока о стенку автором предложена новая простая зависимость, опирающаяся на модифицированное число Рейнольдса, подтвержденная на представительном банке экспериментальных данных. Следует отметить также рекомендации автора по учету термического сопротивления оксидных пленок, образующихся в оборудовании со свинцовым теплоносителем.

Во втором разделе также представлено описание моделей расчета нейтронно-физических процессов в реакторе с жидкометаллическим теплоносителем и термомеханики твэлов с таблеточным топливом (диоксид урана, МОКС, мононитридное или смешанное нитридное уран-плутониевое топливо) и газовым подслоем.

Автором диссертации достаточно детально проработаны вопросы расчета теплофизических и механических свойств материалов и



теплоносителей. Описание созданной базы данных представлено в **третьем разделе**.

В **четвертом разделе** описана разработанная при непосредственном участии автора методика интеграции программных модулей функционального наполнения, реализованная в виде интегрирующей оболочки SMART\_LM. Методика апробирована при создании интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1. В четвертом разделе также представлены основные подходы к реализации в теплогидравлическом и твэльном программных модулях алгоритмов параллельных вычислений на основе технологии OpenMP под управлением операционной системы семейства Linux. На 24 ядрах вычислительной кластерной системы для теплогидравлического модуля получено ускорение расчета около 9 раз, а для твэльного программного модуля эффективность составила 89,2%.

Современные требования к обоснованию безопасности энергоблоков АЭС заключаются в необходимости выполнения расчетов в реалистическом приближении с оценкой погрешности получаемых расчетных результатов. Автором диссертации разработана методика оценки погрешностей результатов расчетов, основанная на методологии анализа неопределенностей и чувствительности. Методика представлена в **пятом разделе** и включает в себя оценку погрешностей, обусловленных точностью используемых моделей, входных данных и вычислительных неопределенностей. С учетом подтверждения пространственной и временной сходимости численной модели вычислительная погрешность, как показано в диссертации, может быть минимизирована.

В **шестом разделе** представлены достаточно детально проработанные автором матрицы верификации как отдельных программных модулей, так и интегрального комплекса в целом.

Следует отметить, что для верификации разработанного под руководством и при непосредственном участии автора диссертации программного комплекса ЕВКЛИД/V1 привлечен представительный банк экспериментов и тестов: результаты экспериментов, выполненных на локальных отечественных и зарубежных стендах, результаты испытаний действующих РУ: БОР-60, БН-600, БН-800, критсборки БФС (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»), расчетные данные международных бэнчмарков, аналитические тесты, а также результаты кросс-верификации с аттестованными программами.



Результаты верификации комплекса ЕВКЛИД/V1 представлены в диссертации обобщенно, со ссылкой на соответствующие публикации и верификационные отчеты.

В последнем **седьмом разделе** диссертации представлены результаты демонстрационных расчетов стационарных и аварийных режимов РУ БРЕСТ-ОД-300 и РУ БН-1200, выполненных с помощью программного комплекса ЕВКЛИД/V1, включая оценку неопределенностей расчета значений параметров, важных для безопасности.

Рассматривая диссертацию Мосуновой Н.А. в целом, следует, прежде всего, отметить ее высокий научный уровень. Даже не останавливаясь на отмеченных выше научных проблемах, решенных соискателем, очевидно, что разработка под ее руководством и при непосредственном участии интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 представляет собой решение важной народно-хозяйственной задачи. Следует подчеркнуть, что по возможностям моделирования одним программным средством теплогидравлических процессов, протекающих в трех жидкометаллических теплоносителях (натрий, свинец, свинец-висмут), а также процессов в оборудовании с водяным и воздушным теплоносителями аналогов комплексу ЕВКЛИД/V1 в России действительно нет.

Достоверность научных результатов, представленных в диссертации, базируется на грамотном представлении сложных процессов, их математическом описании, тщательной экспериментальной проверке, а также на экспертизе верификационных материалов в Совете по аттестации программных средств при Ростехнадзоре.

Результаты диссертационной работы Мосуновой Н.А. имеют большое практическое значение. Интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1, разработанный под руководством и при участии автора диссертации, является современным эффективным инструментом для расчетов динамики РУ с жидкометаллическим теплоносителем в проектно-конструкторских и исследовательских организациях.

Основные идеи и научные результаты диссертации в достаточной мере опубликованы в реферируемых изданиях, апробированы на семинарах и конференциях различного ранга, включая международные.

Заявленные цели диссертационной работы достигнуты, поставленные задачи решены.



Автореферат отражает все основные научные результаты работы и соответствует содержанию диссертации.

Некоторые соображения и замечания по диссертационной работе:

1. Реакторы с жидкометаллическим теплоносителем, как правило, имеют интегральную компоновку оборудования и бесчехловые ТВС активной зоны, что априори требует учета пространственных эффектов в проточной части первого контура, особенно при несимметричной работе оборудования и в условиях естественной циркуляции теплоносителя.

Модель пространственной кинетики, реализованная в комплексе ЕВКЛИД/V1, из соображений равноточности сопряженного расчета нейтронно-физических и теплогидравлических процессов, требует для моделирования термогидродинамических процессов программных средств класса CFD. Поэтому канальное приближение, реализованное в программном комплексе для моделирования теплогидравлических процессов, трудно назвать реалистичным при обосновании безопасности быстрых реакторов в режимах, в которых существенную роль играют пространственные эффекты.

2. Для моделирования дисперсно-кольцевых двухфазных потоков автором заимствована из расчетного кода КОРСАР идея дифференциального учета динамики жидкой фазы (пленка и капли) в двухжидкостной модели. Однако в диссертации отсутствует информация об алгоритме расчета объемной доли капель в паровом ядре (модель уноса и осаждения капель).

3. В седьмом разделе диссертации (табл. 7.1 и 7.11) представлено сравнение значений геометрических характеристик оборудования из проектных материалов и заложенных в расчетную модель в качестве исходных данных. Было бы куда полезнее проектные данные по точности изготовления оборудования (допуски) использовать как исходные неопределенности при выполнении расчетов. В частности, на основе анализа чувствительности можно получить рекомендации для проектирования (формирования допусков) и изготовления элементов оборудования.

Это замечание относится и к технологическим параметрам (см., например, стр. 234 диссертации), неопределенности которых задавались не на основе проектных материалов РУ БРЕСТ-ОД-300, а экспертным путем.

4. При расчете аварийного режима «Разрыв трубки парогенератора» БРЕСТ-ОД-300 расход пароводяной смеси, истекающей в свинец, задан величиной 0,7 кг/с с оговоркой, что эта величина получена специалистами АО «НИКИЭТ».



Непонятно, обладает ли комплекс ЕВКЛИД/V1 возможностью прямого расчета течи из второго контура в первый в авариях РУ с жидкометаллическим теплоносителем.

5. Расчетная модель РУ БН-1200 разработана при представлении активной зоны ограниченным числом эквивалентных каналов, что создает серьезную проблему при моделировании обратных связей в расчетной модели пространственной кинетики.

В диссертации эта проблема не обсуждается, отсутствует также информация о полях энерговыделения (их деформации) в динамических режимах и в процессе выгорания.

В целом, преимущества сопряженного моделирования нейтронно-физических, теплогидравлических и термомеханических явлений следовало бы продемонстрировать в диссертации более убедительно.

Например, в какой степени термомеханические явления в ТВЭлах изменяют температуру топлива и – через Допплер-эффект – энерговыделение в них в динамических режимах РУ с жидкометаллическим теплоносителем.

Высказанные замечания не снижают ценности диссертации в целом. Работа написана грамотным научно-техническим языком и ее оформление не вызывает замечаний.

Представленная диссертация полностью отвечает требованиям п.п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Мосунова Настасья Александровна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации».

Отзыв составил Мигров Юрий Андреевич, начальник отдела теплофизических исследований ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», старший научный сотрудник, доктор технических наук по специальности 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации».

Адрес:

188540, г. Сосновый Бор Ленинградской области, пр. Героев, д. 55, кв. 62.

Телефон:

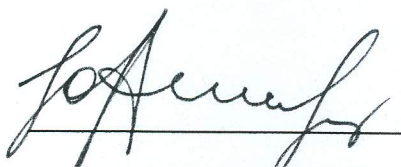
(81369) 607-03.

E-mail:

migrov@niti.ru.

Официальный оппонент

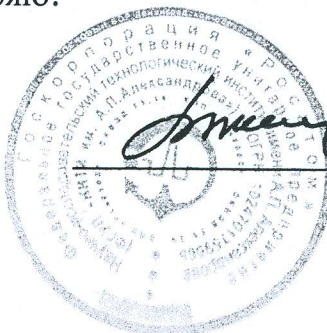
Начальник отдела,  
старший научный сотрудник,  
доктор технических наук

  
30.08.2018 г.

Ю.А. Мигров

Подпись Ю.А. Мигрова заверяю:

Первый заместитель  
генерального директора  
ФГУП «НИТИ им. А.П.  
Александрова»



Р.Д. Филин