

## **Отзыв**

официального оппонента Мелихова Олега Игорьевича  
на диссертацию Колташева Дмитрия Александровича на тему «Связанные расчеты макроячеек реактора на базе трехмерных нейтронно-физических и теплогидравлических кодов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации (технические науки, отрасль энергетика).

**Актуальность темы работы.** Возрастающие требования к обоснованию безопасности реакторных установок диктуют необходимость моделирования процессов в активных зонах реакторов на базе комплексных моделей с совместным использованием нейтронно-физических и теплогидравлических кодов, выполняющих связанные расчеты. Повышенное внимание уделяется применению трехмерному моделированию, поскольку при этом определяются характеристики в локальных областях в соответствии с конструктивными особенностями исследуемых объектов и учитываются тонкие нелинейные эффекты, связанные с различными пространственными неоднородностями в реакторах. Именно такого рода исследованиям посвящена диссертационная работа соискателя, что и определяет её актуальность.

**Оценка содержания диссертации и ее завершенности.** В диссертации разработаны технологии и выполнены связанные стационарные нейтронно-физические (на базе методов Монте-Карло) и теплогидравлические (на базе CFD и канальных кодов) расчеты макроячеек реактора с водяным и жидкометаллическим теплоносителем в различных режимах работы.

Первая глава диссертации, хотя и носит название «Постановка задачи», но включает в себя более широкий круг рассматриваемых вопросов. В первую очередь, в ней обсуждаются опыт работ и возникающие при этом проблемы в области проведения связанных расчетов активной зоны с помощью нейтронно-физических и теплогидравлических кодов. Выполнен сравнительно небольшой по объему, но емкий обзор нейтронно-физических кодов, основанных на методе Монте-Карло. Теплогидравлическим и CFD

кодам было уделено значительно меньше места. Значительное внимание уделено вопросам построения расчетной модели в связанных расчетах, корректности и устойчивости расчетов, критерию сходимости связанных расчетов, согласованию вычислительных сеток. На основании сделанных выводов по выполненному обзору диссертант строит свою дальнейшую работу, которая представлена во второй и третьей главах.

Вторая глава посвящена разработке программной оболочки для обеспечения связанных расчетов. Диссертант разработал специальный алгоритм, основанный на итеративной процедуре, согласно которой полученные одним кодом на очередной итерации новые значения искомым параметров трансформируются в величины, необходимые для расчета другим («связанным») кодом, и передаются этому коду. После расчета на этой итерации вторым кодом происходит обратная передача информации в первый код, и процесс далее повторяется.

Разработанная диссертантом программная оболочка включает интерфейсы для связи различных (нейтронно-физических, теплогидравлических и др.) модулей, а также обеспечивает средства для контроля данных и их представления в необходимом формате.

Согласованная расчетная модель формируется на базе единого набора данных, задаваемых во входном файле. С его использованием осуществляется определение параметров геометрии нейтронно-физической модели и формирование расчетной сетки теплогидравлической модели.

В третьей главе представлены результаты связанных стационарных расчетов макроячеек реакторов с водяным и свинцовым теплоносителем, выполненных соискателем по разработанной им технологии. Предварительно на базе систем с водяным теплоносителем проведена апробация и верификация программной оболочки в рамках разработанной методики связанных расчетов. Расчеты ранее проведенных бенчмарков для PWR и PWR показали хорошее согласие с результатами других исследователей.

Были определены расчетные параметры, которые являются оптимальными с точки зрения точности и времени расчетов.

Отработанные таким образом вычислительные технологии были применены для анализа ячейки из 3x3 ТВЭлов реактора со свинцовым теплоносителем. Для состояний с различными параметрами распухания определен критерий сходимости для завершения расчета на базе эффективного коэффициента размножения нейтронов. Были получены и проанализированы распределения скорости и температуры теплоносителя в условиях распухания ТВЭлов и при его отсутствии.

Для модели реакторной установки со свинцовым теплоносителем по коду ЕВКЛИД/V1 проведен расчет стационарного состояния на номинальном уровне мощности. Для наиболее энергонапряженной ТВС проведен уточняющий связанный расчет с применением кодов MCU-FR и OpenFOAM для получения потвэльного распределения температуры топлива. Полученные таким образом значения максимальной температуры топлива превышают средние значения, полученные в рамках инженерного интегрального расчета на величину до 41 К (3,0%), однако, даже с учетом такого отклонения значения укладываются в доверительный интервал полученный по результатам расчета с учетом анализа неопределенностей (до 45 К), что обосновывает качество результатов, получаемых каналными кодами.

**Обоснованность и достоверность научных выводов, апробация результатов.** Достоверность и обоснованность представленных в работе результатов и выводов, достигалась сравнением с результатами других исследователей, а также проведением методических и многовариантных расчетов.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на трех российских и одной международной конференциях.

**Научная новизна работы.** Автором получены новые научные результаты, среди которых следует отметить следующие:

- впервые для нейтронно-физических кодов семейства MCU (MCU-FREE и MCU-FR) и теплогидравлических кодов CFD класса OpenFOAM и канальных семейства HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O и HYDRA-IBRAE/LM) разработана программная оболочка, содержащая инструментальные средства для построения согласованной расчетной модели в связанных стационарных расчетах;
- с помощью программной оболочки построены согласованные расчетные модели для проведения связанных стационарных расчетов макроячеек реактора с водяным и жидкометаллическим теплоносителем с использованием кодов семейства и CFD кода OpenFOAM или теплогидравлических канальных кодов семейства HYDRA-IBRAE;
- с помощью связанных расчетов по кодам MCU-FR и OpenFOAM для ТВС реакторной установки со свинцовым теплоносителем проанализировано влияние локальных характеристик энерговыделения и теплообмена на температуру топлива, показано, что температура топлива наиболее энергонапряженного твэла в пределах диапазона неопределенностей соответствует результатам расчетов по коду ЕВКЛИД/V1.

**Практическая значимость работы.** Разработанная программная оболочка может использоваться для проведения в автоматизированном режиме связанных стационарных расчетов макроячеек реакторов с водяным или жидкометаллическим теплоносителем по нейтронно-физическим кодам семейства MCU и теплогидравлическим канальным кодам семейства HYDRA-IBRAE или CFD коду OpenFOAM.

**Публикации автора по теме диссертации.** Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в открытой печати, в том числе в 4 статьях в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России.

**Личный вклад автора.** Все представленные результаты получены автором лично и при его участии.

**Замечания.** По работе есть несколько замечаний непринципиального характера.

- 1 В диссертации несколько раз (например, на стр. 6) CFD код OpenFOAM классифицируется как теплогидравлический код, что неправильно.
- 2 Ссылка [33] на стр. 32 диссертации не вполне подходит. Эта статья посвящена вопросам описания трения двухфазного потока о стенки канала и не дает целостного представления о коде HYDRA-IBRAE.
- 3 Продолжение таблицы 1 на стр. 43, третья строка, последняя ячейка. Ошибочно написано «сформированные для расчета по теплогидравлическому коду.» Правильно – по нейтронно-физическому коду.
- 4 Текст диссертации на стр. 46, 47, связанный с рисунками 4 и 5, написан весьма неясно, и его суть оппонент понять не сумел.
- 5 Как уже отмечалось выше, название первой главы не соответствует её содержанию.

### **Заключение**

Несмотря на высказанные замечания, моя общая оценка диссертации – положительная. В работе решена задача разработки технологии выполнения связанных стационарных нейтронно-физических (на базе методов Монте-Карло) и теплогидравлических (на базе CFD и канальных кодов) расчетов макроячеек реакторов с водяным и жидкометаллическим теплоносителями. Полученные результаты имеют существенное значение для анализа реакторов с водяным и жидкометаллическим теплоносителями. Работа сделана на высоком уровне, изложена понятно, текст хорошо структурирован.

Содержание диссертации с достаточной полнотой отражено в научных работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России. Материал неоднократно апробировался при докладах на российских и международной конференциях.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа Колташева Дмитрия Александровича по актуальности, новизне, научному уровню и практической значимости соответствует требованиям установленных Положением о присуждении учёных степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Считаю, что автор работы Колташев Дмитрий Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Официальный оппонент

Профессор кафедры АЭС НИУ «МЭИ»

д.ф.-м.н.



Подпись \_\_\_\_\_

Удостоверяю \_\_\_\_\_

Начальник управления по

работе с персоналом

Мелихов Олег Игоревич

Н.Г. Савин

Тел. +7(916)686-56-83 E-mail: [oleg.melikhov@erec.ru](mailto:oleg.melikhov@erec.ru)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»)

РФ, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

Тел. +7 (495) 362-75-60 E-mail: [universe@mpei.ac.ru](mailto:universe@mpei.ac.ru) <https://mpei.ru/>