

Утверждаю  
Заместитель директора –  
научный руководитель



А.Л. Ижутов  
» 06 2021 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Акционерного общества «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»)) на диссертационную работу Колташева Дмитрия Александровича на тему: «Связанные расчеты макроячеек реактора на базе трехмерных нейтронно-физических и теплогидравлических кодов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 - «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

### Актуальность темы диссертации

Современные требования к обоснованию безопасности реакторных установок предполагают моделирование широкого класса процессов, протекающих в активных зонах, с использованием связанных расчетов на базе нейтронно-физических и теплогидравлических кодов. Прецизионные расчеты с использованием современных нейтронно-физических кодов на базе Монте-Карло и теплогидравлических CFD кодов позволяют определять локальные характеристики в сложных 3D системах, а также учитывать локальные эффекты, связанные с различными пространственными и плотностными неоднородностями.

Специфика связанных расчетов предполагает построение согласованной расчетной модели, для создания которой автором диссертации разработан инструмент автоматизированной подготовки.

**Целью** исследования в диссертационной работе Колташева Д.А. является решение актуальной задачи - разработка технологии и проведение связанных стационарных нейтронно-физических (на базе методов Монте-Карло) и теплогидравлических (на базе CFD и канальных кодов) расчетов макроячеек реактора с водяным и жидкометаллическим теплоносителем.



## **Достоверность и научная новизна диссертационного исследования**

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается сравнением результатов расчетов с реперными значениями, представленными в открытых источниках, результатами методических расчетов, а также результатами многовариантных расчетов, выполненных с применением валидированных или аттестованных расчетных кодов (HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O, HYDRA-IBRAE/LM, ЕВКЛИД/V1).

Автором диссертации получены новые научные результаты:

– 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 Coupled Calculation Shell (CCS), 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 MCU (MCU-FREE и MCU-FR) и CFD кода OpenFOAM или теплогидравлических канальных кодов семейства HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O и HYDRA-IBRAE/LM).

– Для макроячейки реактора с водяным теплоносителем показано согласие результатов связанных расчетов интегральных характеристик, полученных с помощью разработанной модели, с результатами, полученными международным сообществом и опубликованными в свободном доступе.

– С использованием нейтронно-физического кода MCU-FR и пакета OpenFOAM проанализировано влияние возмущения расчетных параметров, обусловленного распуханием оболочек и топлива твэлов, на теплогидравлические и нейтронно-физические характеристики в расчетах макроячеек реактора со свинцовым теплоносителем.

– 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.



## **Теоретическое и практическое значение работы**

Автором заявлено, что практическая значимость работы заключается в разработке программной оболочки Coupled Calculation Shell (CCS, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021610112 от 12 января 2021 г.), которая 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 или по другим кодам схожей области применимости.

Верифицированная на базе макроячеек реакторов с водяным теплоносителем программная оболочка для кодов MCU-FREE, MCU-FR, HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O, HYDRA-IBRAE/LM, OpenFOAM может использоваться для проведения уточняющих связанных расчетов локальных характеристик реакторных установок, а также для кросс-верификации инженерных расчетных кодов.

Результаты стационарных расчетов макроячеек реакторов, полученные с применением нейтронно-физических кодов семейства MCU (MCU-FREE и MCU-FR) и канальных теплогидравлических кодов семейства HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O или HYDRA-IBRAE/LM) или CFD кода OpenFOAM, могут быть использованы для сравнения с результатами, получаемыми с помощью других программ.

## **Оценка содержания диссертации и ее завершенности**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 60 библиографических ссылок, списка основных публикаций соискателя по теме диссертации из 15 наименований. Диссертационная работа изложена на 125 страницах, содержит 14 таблиц и 65 рисунков.

В тексте диссертации аргументированно отражены этапы решения поставленной автором задачи.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, достоверность результатов, личный вклад автора, информация об апробации работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены публикации по теме исследования

В первой главе формулируется постановка задачи, приведен обзор литературы и рассматриваются ключевые особенности нейтронно-физических и теплогидравлических кодов, применяющихся при моделировании реакторных



установок. Обсуждаются вопросы развития методики прецизионных связанных расчетов и формулируются основные проблемы, требующие рассмотрения в рамках формирования согласованной расчетной модели.

Во второй главе рассматривается программная оболочка Coupled Calculation Shell (CCS), содержащая инструментальные средства для построения согласованных расчетных моделей и проведения связанных стационарных расчетов по нейтронно-физическим кодам семейства MCU (MCU-FREE и MCU-FR) и CFD коду OpenFOAM или семейству теплогидравлических канальных кодов HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O и HYDRA-IBRAE/LM). Цель использования оболочки – построение согласованной расчетной модели с использованием расчетных кодов различной степени детальности и проведение расчетов на базе последовательных итераций. Связанность расчетов «нейтроника-теплогидравлика» обеспечивается с помощью алгоритма, в котором в качестве «связующих» характеристик используются распределения температуры, плотности и энерговыделения.

В третьей главе анализируются результаты связанных расчетов для стационарных задач. Апробация предлагаемой технологии проведения связанных расчетов выполнена на базе макроячеек реактора с водяным теплоносителем с применением нейтронно-физического кода MCU-FREE. Отработанная для ячеек тепловых реакторов технология проведения связанных расчетов была применена для расчетов ячеек с жидкометаллическим теплоносителем. Для модельной ячейки из 3x3 твэлов реактора со свинцовым теплоносителем в расчетах по кодам MCU-FR и OpenFOAM анализируются особенности построения согласованной расчетной модели в условиях пространственной гетерогенности, вызванной распуханием оболочки и топлива центрального твэла. С использованием разработанной технологии проведены прецизионные расчеты по кодам MCU-FR и OpenFOAM модели ТВС реакторной установки со свинцовым теплоносителем для определения температуры наиболее энергонапряженного твэла. Полученные результаты согласуются с результатами, полученными по интегральному коду ЕВКЛИД/V1 с учетом имеющихся неопределенностей.

Из представленных в диссертации материалов и результатов исследований можно сделать вывод, что диссертация выполнена на высоком научном уровне, представляет собой логически завершенный научный труд. Диссертация рассматривает комплексную проблему и предлагает конкретное решение.

Автореферат диссертации Колташева Д.А. в целом соответствует основным положениям диссертации и в полном объеме отражает основное содержание диссертационной работы, выводы и рекомендации.



## **Замечания**

1. В качестве практической значимости указано, что разработанная программная оболочка может использоваться для проведения в автоматизированном режиме связанных стационарных расчетов макроячеек реакторов с водяным или жидкометаллическим теплоносителем по другим кодам схожей области применимости, при этом не конкретизируется, каким образом подобные коды могут быть интегрированы в состав оболочки.

2. В тексте диссертационной работы и автореферате приводится информация о проведении верификации программной оболочки Coupled Calculation Shell только для расчетов макроячеек реакторов с водяным теплоносителем, но не содержится сведений о выполнении аналогичной верификации для расчетов макроячеек реакторов с жидкометаллическим теплоносителем.

3. Полезно было бы для модельной ячейки из  $3 \times 3$  твэлов реактора со свинцовым теплоносителем привести в диссертационной работе дополнительные сведения о распределения нейтронно-физических характеристик для проведения анализа влияния на них распухания твэлов.

4. Для расчета модели реакторной установки со свинцовым теплоносителем с применением ЕВКЛИД/V1 в автореферате следовало привести перечень варьируемых параметров вместе с диапазоном варьирования.

Однако указанные замечания не умаляют высокий научный уровень и практическую значимость диссертационной работы Колташева Д.А. для проведения расчетов макроячеек реакторов с водяным теплоносителем и жидкометаллическим теплоносителем.

Представленных в диссертации и автореферате данных достаточно для понимания личного вклада соискателя в получение основных результатов работы.

## **Заключение**

Диссертационная работа Колташева Дмитрия Александровича на тему «Связанные расчеты макроячеек реактора на базе трехмерных нейтронно-физических и теплогидравлических кодов» посвящена вопросам разработки технологии и проведения связанных стационарных нейтронно-физических (на базе методов Монте-Карло) и теплогидравлических (на базе CFD и канальных кодов) расчетов макроячеек реактора с водяным и жидкометаллическим теплоносителем.

По своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и практической значимости полученных результатов представленная диссертация соответствует требованиям п.9 Положения о

