

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИБРАЭ РАН  
доктор физико-математических наук



П. В. Матвеев

2021 г.

## Заключение

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук  
(ИБРАЭ РАН)

Диссертация «Связанные расчеты макроячеек реактора на базе трехмерных нейтронно-физических и теплогидравлических кодов» выполнена в Лаборатории нейтронно-физических расчетов.

В период подготовки диссертации соискатель Колташев Дмитрий Александрович работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук в Лаборатории нейтронно-физических расчетов в должности инженера, инженера-исследователя, младшего научного сотрудника.

В 2011 г. Д. А. Колташев окончил Московский физико-технический институт (Государственный университет) по направлению «Прикладные математика и физика».

В 2014 году закончил аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, где ему выдано удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов.

Научный руководитель – Стрижов Валерий Федорович, доктор физико-математических наук, заместитель директора по разработке интегрированных программных комплексов анализа безопасности АЭС и ЯТЦ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

По итогам обсуждения на семинаре сотрудников Отделения разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС ИБРАЭ РАН и Отдела перспективных исследований и математического моделирования ИБРАЭ РАН принято следующее решение:

Диссертация Д. А. Колташева «Связанные расчеты макроячеек реактора на базе трехмерных нейтронно-физических и теплогидравлических кодов» выполнена на высоком научном уровне, является научно-квалификационной работой, в результате выполнения которой:

- Разработана программная оболочка Coupled Calculation Shell (CCS, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021610112 от 12 января 2021 г.), 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 и канальным теплогидравлическим кодам семейства HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H2O и HYDRA-IBRAE/LM).
- Выполнена верификация разработанной программной оболочки на базе ячеечных расчетов макроячеек реактора с водяным теплоносителем с применением нейтронно-физического кода MCU-FREE и теплогидравлических кодов HYDRA-IBRAE/H2O и OpenFOAM. Подтверждено удовлетворительное согласие интегральных характеристик, полученных с применением одномерного кода HYDRA-IBRAE/H2O и CFD моделирования на базе пакета OpenFOAM, с международными данными, представленными в открытых источниках.
  - Получены результаты расчетов макроячейки реактора со свинцовым теплоносителем с возмущением параметров, вызванных распуханием оболочки и топлива тепловыделяющих элементов. Показано влияние параметров распухания на рассчитываемые теплогидравлические характеристики. Нейтронно-физические характеристики при этом изменяются незначительно.
  - С использованием кода ЕВКЛИД/V1 проведен расчет стационарного состояния на номинальном уровне мощности для модели реакторной установки со свинцовым теплоносителем. В связанном расчете с применением кодов MCU-FR и OpenFOAM получены уточненные значения максимальной температуры топлива, которые попали в диапазон неопределенностей результатов расчетов по коду ЕВКЛИД/V1.

#### **Актуальность работы**

Современные требования к обоснованию безопасности реакторных установок как с водяным, так и с жидкометаллическим теплоносителем обуславливают необходимость моделирования широкого класса процессов, протекающих в активных зонах, на базе комплексных моделей с использованием нейтронно-физических и теплогидравлических кодов, выполняющих связанные расчеты.

Одним из передовых направлений расчетных обоснований является проведение прецизионных расчетов стационарных состояний с использованием нейтронно-физических кодов на базе методов Монте-Карло и CFD кодов.

Актуальность развития технологии прецизионных связанных расчетов обуславливается необходимостью получения численных решений ввиду объективной сложности, высокой стоимости или полной невозможности получения экспериментальных данных для объектов ядерной энергетики.

Диссертационная работа соискателя Колташева Д.А. посвящена разработке технологии и проведению 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.

#### **Научная новизна работы**

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/H2O 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 набуханием 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.

#### **Практическая значимость работы**

Разработанная программная оболочка Coupled Calculation Shell 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 с водяным или жидкометаллическим теплоносителем, а также для кросс-верификации инженерных расчетных кодов и методик.

Результаты стационарных расчетов макроячеек реакторов с водяным и свинцовым теплоносителем, 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.

#### **Личный вклад автора заключается:**

В реализации программной оболочки Coupled Calculation Shell (CCS), содержащей инструментальные средства для построения согласованных расчетных моделей и проведения связанных стационарных расчетов по нейтронно-физическим кодам семейства MCU (MCU-FREE и MCU-FR), CFD коду OpenFOAM и теплогидравлическим канальным кодам семейства HYDRA-IBRAE (HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O и HYDRA-IBRAE/LM).

В подготовке расчетных моделей макроячеек реакторов с водяным и жидкометаллическим теплоносителем для расчетов по нейтронно-физическим кодам MCU-FREE и MCU-FR, а также по теплогидравлическим кодам HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O,

HYDRA-IBRAE/LM и OpenFOAM.

В проведении многовариантных расчетов макроячеек реакторов с водяным и свинцовым теплоносителем с применением нейтронно-физических кодов семейства MCU – MCU-FREE и MCU-FR и теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/H2O и CFD кода OpenFOAM, анализе и обосновании достоверности полученных результатов.

В проведении связанных расчетов наиболее энергонапряженной ТВС реакторной установки со свинцовым теплоносителем с использованием кодов MCU-FR и OpenFOAM, а также в разработке нейтронно-физической модели активной зоны реакторной установки со свинцовым теплоносителем и проведении интегральных расчетов по коду Евклид/V1.

**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/H2O, HYDRA-IBRAE/LM, Евклид/V1).

Диссертация Колташева Д. А. является завершенной научно-квалификационной работой, соответствует специальности 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации» и отрасли наук «технические науки». Все положения и результаты работы, выносимые на защиту, получены лично автором и в полной мере отражены в 4 работах, опубликованных соискателем в рецензируемых изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России (всего по теме диссертационной работы опубликовано 15 работ). Основные результаты диссертационной работы были представлены Д. А. Колташевым на 10 научных семинарах, совещаниях и конференциях.

Диссертация «Связанные расчеты макроячеек реактора на базе трехмерных нейтронно-физических и теплогидравлических кодов» Колташева Дмитрия Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации».

Заключение принято на объединенном семинаре Отделения разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС ИБРАЭ РАН и Отдела перспективных исследований и математического моделирования ИБРАЭ РАН.

Присутствовало на заседании 35 чел. Результаты голосования: «за» – 35 чел., «против» – 0 чел., «воздержались» – 0 чел., протокол № 1 от «19» марта 2021 г.

Заведующий отделением  
разработки программного  
обеспечения для анализа  
безопасности АЭС

д.т.н.

Мосунова Настасья Александровна

Заместитель заведующего  
отделом перспективных  
исследований и математического  
моделирования

Токарчук Даниил Николаевич