

## Отзыв

**официального оппонента о диссертации Мишина Вячеслава Александровича на тему «Вычислительный комплекс для расчетного сопровождения измерений, выполненных на энергетических быстрых реакторах», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9. – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.**

**Актуальность темы работы.** Стратегической целью российской атомной отрасли является переход атомной энергетики к двухкомпонентной ядерной энергетической системе с тепловыми и быстрыми реакторами и с замыканием топливного цикла. В рамках этой стратегии в настоящее время происходит чрезвычайно важный для всей атомной энергетики этап развития реакторов на быстрых нейтронах – переход активной зоны (а.з) реактора БН-800 на полную загрузку МОХ-топливом, что открывает дорогу к осуществлению замкнутого топливного цикла. Одновременно на реакторе БН-600 проводятся эксперименты по отработке новых видов топлива и конструкционных материалов.

Новизна и важность этих работ требуют дополнительного обоснования точности расчета характеристик РУ БН, в связи с чем задача оперативного расчётного сопровождения быстрых реакторов, в том числе, со стороны научного руководителя (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), с надежными и достоверным расчётным прогнозированием становится очень важной и ответственной. Важность этой задачи обусловлена ещё и тем, что аналогичная система, разработанная в своё время в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» для сопровождения РУ БН-600, устарела и по разным причинам не может быть распространена на РУ БН-800 и БН-1200.

В результате выполнения диссертационной работы создан новый расчетный вычислительный комплекс нового поколения для научного расчётного сопровождения действующих реакторов типа БН – BNcode. Этот

комплекс универсален и позволяет восполнить недостатки и расширить область применения имеющихся в настоящее время расчётных средств, а также повысить точность прогнозных оценок характеристик быстрых реакторов. Это делает актуальной и востребованной работу автора.

#### **Оценка содержания диссертации и её завершенности.**

Разработанный автором расчётный комплекс BNcode предназначен для независимого расчётного сопровождения действующих реакторов БН (в настоящее время это БН-800) со стороны научного руководителя. Он существенно отличается от применяемых сейчас отечественных расчётных средств и от зарубежных аналогов. Во-первых, для нейтронно-физических расчётов в нём интегрированы не только программные модули диффузионного приближения, но и модули прецизионного нейтронно-физического расчета (транспортное  $P_N$ -приближение; метод Монте-Карло; многогрупповые или поточечные нейтронные данные, по аналогии с программой MCNP). Во-вторых, в BNcode, в отличие от прежней версии (ModExSys), заложена возможность сопряжённого нейтронно-физического и теплогидравлического расчёта с помощью модуля MIF-2.

Подробное описание структуры и принципа работы разработанного комплекса даётся в главе 1. Комплекс состоит из трёх основных частей: база данных (БД800), или топливный архив; вычислительный блок; блок интерфейсных модулей и генерации расчётных моделей.

Автор внёс существенные изменения (по сравнению с предыдущей версией) в структуру топливного архива, где хранится вся информация о состоянии активной зоны за весь жизненный цикл реактора БН-800. Результатом этих изменений явились независимость работы архива и хранимой информации от операционной системы и компиляторов.

Разработанный автором интерфейсный модуль содержит, в частности, алгоритм, обеспечивающий связь с сопровождаемым объектом и отслеживающий состав активной зоны реактора БН в процессе эксплуатации, учитывая выгорание топлива и поглотителя, перегрузки активной зоны и

движение органов системы управления и защиты. Разработан также модуль для планирования экспериментов, связанных с облучением ЭТВС.

Для вычислительного комплекса BNcode с участием автора разработана базовая модель активной зоны реактора БН-800, (или «скелет» расчетной модели), которая с максимальной подробностью и общностью описывает структуру а.з. и позволяет проводить тонкую настройку для конкретного расчётного случая с учётом температурных изменений геометрии, состава сборок и т.д. (глава 2). По этим моделям рассчитано более сотни состояний РУ БН-800, включая те микрокампании, в которых загрузка а.з. МОХ-топливом постепенно увеличивалась до полной. Результаты этой работы использованы для заполнения топливного архива РУ БН-800.

Эта работа позволила также провести анализ методических поправок нейтронно-физического расчёта с помощью широко используемых инженерных диффузионных кодов при переходе на полностью МОХ а.з. РУ БН-800. Это сделано путём сравнения результатов, полученных по кодам TRIGEX и ММКК на основе специальных бенчмарк-моделей а.з.

Главы 3 и 4 посвящены фактически верификации используемых в системе BNcode расчётных кодов на основе накопленных при эксплуатации РУ БН-800 экспериментальных данных. Ценность и важность этих данных в том, что они относятся к первому российскому опыту масштабного использования плутония как топлива для реакторов на быстрых нейтронах.

На основе этих данных оценена погрешность расчёта разными кодами таких характеристик активной зоны БН-800, как критичность, максимальный запас реактивности, уровень подкритичности, мощностной и температурный эффекты реактивности, эффективность РО СУЗ, а также распределения энерговыделения в а.з.

На основе результатов проведённых автором исследований дана рекомендация использовать в расчётах обновленную версию библиотеки констант РОСФОНД – библиотеку РОСФОНД 2020.2.

### **Достоверность научных выводов, апробация результатов.**

Достоверность полученных результатов обеспечивается тем, что они получены с помощью интегрированных в BNcode верифицированных и аттестованных Ростехнадзором программ: TRIGEX, ММКК, ММКС, MIF-2, CARE, CONSYST. Константное обеспечение расчётов основано на известных проверенных системах констант БНАБ-93, БНАБ-РФ и РОСФОНД.

### **Научная новизна работы.**

Впервые создан инструмент, позволяющий организации научного руководителя проводить независимые от эксплуатирующей организации высокоточные прогнозные расчёты нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора БН-800 с МОКС-топливом. Они используются для обоснования его безопасности при эксплуатации на мощности, при проведении измерений в процессе перегрузки топлива, при постановке экспериментальных ТВС, когда возникает необходимость рассмотрения нестандартных расчетных ситуаций повышенной сложности.

**Практическая значимость работы.** Созданный расчетно-вычислительный комплекс внедрён в расчётную практику в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» и используется для сопровождения реактора БН-800, в том числе при переходе на полную загрузку МОХ-топливом.

Полученные в ходе сопровождения РУ БН-800 результаты имеют большую ценность для лицензирования реактора БН-800 с активной зоной с МОХ топливом, а также перспективного коммерческого реактора БН-1200М.

Выработаны рекомендации по использованию методических поправок для расчета проектных характеристик активной зоны БН-800 с помощью инженерных программ.

**Публикации автора по теме диссертации.** По результатам диссертации опубликовано 6 печатных работ, из них 5 статей в изданиях из перечня ВАК РФ, и 13 – в докладах, опубликованных в трудах международных научно-технических конференций.

**Замечания.** К работе есть несколько замечаний.

1. В разделе 3.1, стр. 74 даются значения  $k_{эфф}$ , рассчитанные по коду ММКК с разными библиотеками констант (рис. 3.3). В тексте речь идёт о расчётно-экспериментальных расхождениях, но экспериментальных данных нигде не приведено.

2. На стр. 76, раздел 3.2 утверждается, что отклонение расчётного значения запаса реактивности от измеренного оценивается в 0.2% (рис.3.4). В то же время, судя по этому рисунку, погрешность самих экспериментальных данных составляет 0.6-0.8%, так что указанная оценка погрешности расчёта некорректна.

3. В таб. 2.4 показаны расхождения расчётной эффективности стержней СУЗ между кодом TRIGEX и кодом ММКК с учётом и без учёта гетерогенности. Учёт гетерогенности даёт меньшую расчётную оценку эффективности (в тексте некорректно утверждается, что этот учёт снижает эффективность стержней). Непонятно из текста, отклонение от какой из опций ММКК следует считать методической поправкой для TRIGEX.

**Заключение.** Несмотря на указанные замечания, считаю, что эта работа заслуживает высокой оценки. Автором разработан, верифицирован и внедрен в опытную эксплуатацию вычислительный комплекс нового поколения для расчётного сопровождения реактора БН-800 – BNcode. С его помощью осуществляется авторское сопровождение эксплуатации энергоблока № 4 Белоярской АЭС (согласование эксплуатационной и проектной документации на ТВС и а.з.; согласование объема перегрузок топлива перед началом каждой микрокампании и др.).

Содержание диссертации с достаточной полнотой отражено в открытых научных публикациях. Материал неоднократно обсуждался на российских и международных конференциях.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.4.9. – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

На основании изложенного считаю, что диссертация Мишина В.А. на тему «Вычислительный комплекс для расчетного сопровождения измерений, выполненных на энергетических быстрых реакторах» соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции).

Считаю, что автор работы Мишин В.А. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9. – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

Официальный оппонент

Зам. Заведующего отделением анализа безопасности

ядерных энергетических установок ИБРАЭ РАН

д.ф.-м.н.

Семёнов Владимир Николаевич

16.01.25

Подпись В.Н. Семёнова удостоверяю:

Ученый секретарь

ИБРАЭ РАН

к.т.н.



В.Е. Калантаров