

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу АЛЕКСЕЕВА Андрея Тарасовича

«Моделирование термомеханического поведения графитового блока реактора РБМК-1000 с применением усовершенствованных алгоритмов расчетов»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

В представленной работе проведены исследования термомеханического поведения графитового блока на протяжении всего его срока службы.

Актуальность темы диссертации связана с тем, что на начало 2018 года в Российской Федерации действуют 12 энергоблоков с реакторами типа РБМК-1000. В качестве замедлителя в этих реакторах используется графит марки ГР-280. Графитовые блоки формируют графитовые колонны. Вместе эти колонны образуют графитовую кладку. В ходе эксплуатации графитовая кладка подвергается постоянному температурному и радиационному воздействию. Это приводит к формоизменению графитовых блоков и растрескиванию. Таким образом, срок службы реактора напрямую зависит от состояния графитовой кладки. При этом, чем ближе заключительные этапы эксплуатации, тем сильнее термомеханические процессы в графитовой кладке влияют на безопасность эксплуатации реактора. Таким образом, актуальность проведенных исследований не вызывает сомнений.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций заключается в выполнении расчётов, в которых применяются физические модели, позволяющие практически в полной мере учесть особенности деформационного поведения графита. Кроме того, автор переработал и модернизировал программный комплекс GRA3D, ориентированный на достижение целей, поставленных в данной диссертационной работе, а именно на выявление подлинных эксплуатационных факторов, влияющих на допустимый срок службы графитовой кладки.

Достоверность результатов обосновывается в главе «Верификация и обсуждение результатов», где автор сравнивает полученные результаты моделирования с данными расчётов, полученными другими научными коллективами, а также экспериментальными данными обследования графитовой кладки непосредственно на атомных электростанциях.

Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к моделированию, использовании большого количества моделей, характеризующих сложное напряженно-деформированное состояние графита. Кроме того, была разработана и внедрена методика учёта анизотропной ползучести графита в трёхмерной постановке задачи.

Практическую значимость работы сложно переоценить, поскольку её результаты в будущем можно будет использовать для адекватной оценки предельных сроков службы реактора РБМК-1000, причём появилась возможность составлять уточнённые прогнозы для каждого энергоблока АЭС в отдельности.

Автором выполнен анализ имеющихся на данный момент работ, относящихся к указанной тематике, включая основные достижения в этой области, в том числе к атомной энергетике, который представлен в **первой главе**. Следует отметить, что в главе «Литературный обзор» довольно полно приведена информация по освещаемой проблеме. Кроме того, следует отметить тщательность в поиске подходящих физических моделей. В работе критически проанализированы известные расчётные модели, проведено их тестирование, выявлены их ограничения, что тоже является результатом представленной диссертационной работы. Следует отметить, что в обзоре проведен анализ по более широкому спектру исследований, чем минимально необходимо для целей данной диссертации.

Вторая глава посвящена постановке задачи. Приведены основные использованные уравнения и исходные данные для расчетов. Подробно описаны основные уравнения метода конечных элементов, на котором и основана эта работа. Можно отметить, что в качестве исходных данных был использован РД ЭО 1.1.2.05.0788-2009, который на данный момент является последним разработанным документом, используемым для расчетов элементов и узлов, изготовленных из графита.

В диссертации реализован алгоритм учёта анизотропии графита не только в части исходных данных, но и в использованных уравнениях состояния, чему посвящена **третья глава**. В литературе вывод этих уравнений обычно не приводится. В этой главе автор делает выводы о том, что обязательно необходимо использовать полученные уравнения деформирования анизотропного тела для адекватного и полного учёта анизотропии графита. Кроме того, описывается модель, с помощью которой производился учёт растрескивания графита.

Методика и основные соотношения для учёта радиационной ползучести, а также обоснование необходимости её учёта представлены в **четвёртой главе**. Автор описывает несколько методик, применяемых для учёта ползучести, обосновывает выбор модели ползучести типа Беляева-Малинина.

В **пятой главе** дана сравнительная оценка критериев разрушения, которые на настоящий момент можно использовать в данной задаче. Адекватный выбор критерия ползучести, как отмечает автор, влияет на перераспределение напряжений после растрескивания и, следовательно, на дальнейшую деградацию свойств графитового блока. В качестве рекомендации, автор предлагает использовать для расчётов растрескивания графита критерий Трунина, так как результаты, полученные с его использованием результаты, наиболее близки к полученным экспериментально данным.

Наибольший научный интерес представляет **шестая глава** диссертации, в которой изложена феноменологическая модель поведения графита, позволяющая объяснить различия между свойствами исследуемых графитовых образцов и графита в составе блоков кладки реакторах РБМК. Эта модель, помимо всего прочего, помогает учесть градиенты температурных и нейтронных полей.

В **седьмой главе** автор сравнивает результаты своего моделирования с результатами двух отчетов других исследователей и экспериментальными данными с ЛАЭС-1. На основе сравнения расчётных и экспериментальных данных делаются выводы

о необходимости использования описанных в диссертации моделей, поскольку это позволяет существенно приблизиться к реальным значениям термомеханических параметров графитового блока.

Одним из наиболее важных результатов работы можно считать полученную модель анизотропной ползучести графита. В работе было опробовано несколько моделей ползучести, объяснена неприменимость некоторых и выбрана наиболее адекватная. В начале 2000-х годов в отечественных научных статьях можно было встретить фразу, что ползучестью графита можно пренебречь, ввиду её малости. Однако в настоящий момент доказано экспериментально, что ползучесть графита оказывает сильное влияние на формоизменение и растрескивание графита, что и подтверждено расчётно-теоретическими исследованиями диссертанта.

Приведенные в работе исследования в области критериев разрушения, применимых для графита, и использование модели, позволяющей учесть некоторые особенности микроструктуры графита, произведены впервые. Другие исследователи этой проблемы не учитывали возможное влияние микроструктуры графита на скорость протекания деформационных процессов и формоизменения графитовых блоков и кладки в целом.

Полученные результаты дают, ко всему прочему, более полное понимание влияние отдельных механизмов в формоизменение и растрескивание графита ГР-280 при эксплуатации его в РБМК-1000.

Оценивая работу в целом необходимо отметить, её как завершённый труд, показывающий эрудицию соискателя в решении задач механики разрушения, а также исследовании вопросов деформирования материалов в условиях терморadiационного нагружения. Диссертант овладел сложным математическим аппаратом и приёмами математического моделирования.

По работе можно сделать следующие замечания:

1. Несмотря на стремление к уточнению и достижению совпадения результатов расчётов с данными опыта эксплуатации, в диссертационной работе температурное поле задаётся в виде функции, не изменяющееся на протяжении кампании, хотя с помощью метода конечных элементов или метода балансов можно было бы провести расчёты и для изменяющегося температурного поля.

2. Следовало бы пояснить, почему использование в уравнениях деформирования графита различных моделей анизотропии ползучести не приводит к сближению результатов расчётов и экспериментов, а модель, основанная на учёте микроструктуры графита такое сближение результатов расчётов и эксперимента обеспечивает.

3. В диссертации не проанализированы возможности применения в рамках данной тематики зарубежные расчётные коды, такие как ANSYS и др.

Сделанные выше замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Актуальность темы диссертации, использование нескольких взаимно дополняющих друг друга физических моделей поведения материала, большой объём выполненной диссертантом работы, новизна и практическая ценность полученных результатов позволяют сделать вывод о том, что **диссертация и автореферат соответствует пункту 9 «Положения о присуждении ученых степеней»**,

утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.13 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, а её автор обладает высокой квалификацией и достоин присуждения искомой степени по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации».

Профессор НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н.

Е.М. Кудрявцев

адрес: Каширское шоссе, д. 31
г. Москва, 115409
Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»,
кафедра «Конструирование приборов
установок»
тел.: 8(910)-432-43-36;
e-mail: kudr51@mail.ru

Подпись удостоверю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ



Ирина Владимировна Сергеева