

На правах рукописи

Астафьева Вера Олеговна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА И АНАЛИЗ
ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ТВЭЛОВ В ПЕРИОД ЗАГРУЗКИ
ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РБМК В КОНТЕЙНЕР**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт – Петербург – 2006

Работа выполнена в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» и на кафедре «Компьютерные технологии и эксперимент в теплофизике» ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Талалов Виктор Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
Готовский Михаил Абрамович
кандидат физико-математических наук,
Васильев Андрей Дмитриевич

Ведущая организация: ФГУП «Всероссийский НИИ неорганических материалов
им. акад. А.А. Бочвара» (ВНИИНМ)

Защита состоится "20" июня 2006 г. в 14 ч на заседании диссертационного
Совета Д 212.229.06 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, гл. зд., ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-
Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан " ____ " _____ 2006 г.

И. о. ученого секретаря
диссертационного Совета Д 212.229.06
доктор технических наук, профессор

Китанин Э.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в России проблема хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) является весьма актуальной. Основное количество топлива, требующего утилизации, составляет ОЯТ РБМК, переработка которого признается нецелесообразной из-за низкого остаточного содержания делящихся нуклидов. Это топливо хранится в приреакторных бассейнах выдержки (БВ) и отдельностоящих промежуточных хранилищах, расположенных на территориях атомных электростанций, суммарной вместимости которых достаточно лишь до 2005 - 2008 года, к тому же и срок его пребывания под водой к этому периоду времени уже будет близок к предельно-допустимому (~ 30 лет).

В качестве одного из вариантов следующего этапа промежуточного хранения ОЯТ РБМК Правительством РФ было признано целесообразным использовать транспортно-упаковочные комплекты ТУК-104 и ТУК-109, разработанные на основе металлобетонного контейнера (МБК) КБСМ (г. С.-Петербург). Такой подход потребовал разработки технологии перевода этого вида ОЯТ с «мокрого» на «сухое» хранение, и как следствие, анализа температурного состояния твэлов для переходных этапов с целью обоснования условий безопасности и сохранения целостности их оболочек. При этом необходимо отметить, что воспользоваться напрямую накопленным мировым опытом не позволили существенные отличия в конструкции транспортно-упаковочных комплектов, тепловыделяющих сборок и условия обращения с ними.

Одним из основных технологических этапов при переводе ОЯТ РБМК с «мокрого» на «сухое» хранение является разделка и загрузка отработавшего топлива в контейнер. Согласно разработанной на сегодняшний день технологической схеме, разделка отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС), их упаковка в специальные ампулы и размещение в чехле контейнера будет производиться на воздухе в соответствующем помещении, т. н. «горячей камере». После чего уже полностью загруженный ОЯТ чехол будет устанавливаться в контейнер. Далее контейнер будет герметизироваться и выдерживаться в таком состоянии в течение некоторого периода (этап предварительной выдержки), а затем доставляться в помещения для осуществления его вакуумной сушки. На температурное состояние твэлов на этапе загрузки будут влиять: мощность остаточных тепловыделений ОЯТ, температура помещения загрузки, остаточное количество воды, попадающей в ампулы, а также последовательность размещения ампул с ОЯТ в чехле контейнера. Период загрузки ОЯТ в контейнер характеризуется сложным тепломассообменом в топологически изменяющейся во времени системе тел, включающем в себя следующие процессы:

- нестационарную теплопроводность при наличии и отсутствии внутренних источников тепла;
- лучистый теплообмен в различных системах тел;
- конвективный теплообмен с воздухом межампульного пространства, водой и средой в ампулах, прогреваемых с течением времени и воздухом помещения загрузки;
- кипение и испарение воды в ампулах.

Наиболее быстрым и экономически эффективным способом для анализа температурного состояния твэлов на этапе загрузки ОЯТ в контейнер является численное моделирование. На сегодняшний день существует достаточное количество как отечественных, так и зарубежных программных средств для моделирования процессов теплообмена в пучках стержней и упаковках

с ОЯТ, но применить их для описанной выше проблемы весьма затруднительно из-за непригодности алгоритмов и входных данных к постоянно меняющейся во времени топологии системы тел.

Учитывая вышеизложенное, **основными целями диссертационной работы** являлись:

1. Разработка алгоритма и создание программных средств для анализа процессов сложного тепломассообмена в топологически меняющейся во времени системе тел применительно к технологическому этапу загрузки отработавшего ядерного топлива в контейнер.
2. Проведение численного анализа процессов тепломассообмена и получение температурных режимов твэлов с целью обоснования неперевышения их максимально допустимых температур на этапе загрузки и обеспечения равномерного прогрева корпуса контейнера в период предварительной выдержки применительно к технологическому регламенту, разработанному для Ленинградской АЭС.

Для достижения поставленных целей основными **задачами диссертации** являлись:

1. Теоретический анализ процессов тепломассообмена в условиях загрузки ОЯТ в контейнер, выбор и разработка расчетных методик для их моделирования в сложной теплопередающей системе тел с изменяющейся во времени топологией.
2. Разработка алгоритма для анализа температурного состояния твэлов на этапе загрузки ОЯТ в контейнер и его реализация в виде программных комплексов, позволяющих варьировать определяющими физическими и технологическими параметрами на уровне входных данных.
3. Тестирование и верификация разработанных программных средств.
4. Численный анализ принятых при моделировании допущений и оценка их влияния на точность расчета температурного состояния твэлов.
5. Расчетный анализ соотношения доли конвективного и лучистого тепловых потоков с поверхности твэлов в период загрузки ампул с ОЯТ.
6. Проведение расчетных исследований для анализа температурного состояния твэлов и корпуса контейнера в период загрузки в зависимости от остаточных тепловыделений, штатных и нештатных схем последовательного размещения ампул с ОЯТ в чехле контейнера.
7. Оценка возможности испарения воды из ампул в период загрузки, а также влияния ее наличия или отсутствия в ампулах на температурное состояние твэлов.

Научная новизна работы:

1. Для моделирования процессов тепломассообмена в период загрузки отработавшего ядерного топлива в контейнер на основе предложенной в диссертационной работе методики моделирования разработан алгоритм, основными достижениями которого являются:
 - учет основных механизмов тепломассообмена в сложной теплопередающей системе тел;
 - расчет угловых коэффициентов лучистого теплообмена в топологически меняющейся во времени системе тел, соответствующей произвольной последовательности размещения ампул с ОЯТ в чехле контейнера, с использованием метода Монте-Карло;
 - возможность варьирования последовательностью, количеством и временными интервалами размещения ампул в чехле контейнера;

- возможность учета различных остаточных тепловыделений отработавших тепловыделяющих сборок, загружаемых в контейнер.
- 2. На основе разработанного алгоритма применительно к технологическим этапам загрузки ампул с ОЯТ в контейнер и предварительной выдержки герметичного контейнера для численного анализа процессов тепломассообмена и расчета температурных режимов твэлов созданы программные средства, допускающие варьирование определяющими физическими и технологическими параметрами на уровне исходных данных.
- 3. Проведены расчеты, воспроизводящие протекание процессов тепломассообмена для технологического регламента Ленинградской АЭС в ходе которых обосновано непревышение максимально допустимых температур твэлов и обеспечение равномерного прогрева корпуса контейнера на этапах предварительной выдержки контейнеров, загружаемых ОЯТ РБМК-1000 10-ти и 30-летней выдержки.

Практическая ценность:

1. Результаты расчетов температурных режимов твэлов в период загрузки, были использованы ВНИИНМ им. А.А.Бочвара для обоснования условий обращения с ОЯТ РБМК-1000 при переходных режимах обращения в рамках выполнения работ по заказу Департамента атомной науки и техники Минатома России.
2. Поля температур твэлов и других конструкционных элементов, а также воды в ампулах, рассчитываемые с помощью разработанных автором программных средств, использовались в качестве исходных данных для уточнения расчетов по изменению параметров следующего технологического этапа – вакуумного осушения внутренней полости контейнера с ОЯТ РБМК-1000 в рамках выполнения работ по заказу Ленинградской АЭС и ВНИИНМ им. А.А.Бочвара.
3. Разработанные программные средства могут быть использованы для проведения расчетного анализа температурного состояния твэлов и обоснования эффективности технологического этапа загрузки ампул с ОЯТ для других АЭС, эксплуатирующих энергоблоки с реакторами РБМК – Смоленской и Курской, с учетом привязки к их технологическим цепочкам.
4. Разработанные программные средства могут быть адаптированы к расчету температурного состояния твэлов других реакторов, как промышленных, так и исследовательских, загружаемых в контейнер с различным остаточным тепловыделением и с сильной неравномерностью по высоте.

Достоверность предложенного в работе алгоритма и разработанных программных средств подтверждается результатами их тестирования и верификации.

На защиту выносятся:

- разработанные методики, вычислительные алгоритмы, а также созданные на их основе программные средства для моделирования процессов сложного тепломассообмена в топологически изменяющейся во времени системе тел применительно к технологическому этапу загрузки отработавшего ядерного топлива в контейнер;
- результаты верификации и проведенного численного анализа процессов тепломассообмена для этапов загрузки ампул с пучками твэлов в чехол и предварительной выдержки контейнера при

воспроизведении технологического регламента для Ленинградской АЭС в широком диапазоне варьирования основными физическими и технологическими параметрами.

Апробация работы.

Материалы диссертации были доложены и обсуждены: на международных конференциях "Радиационная безопасность" – Санкт-Петербург, 2000 и 2002; на XI семинаре по проблемам физики реакторов – Москва, 2000; на Техническом семинаре/совещании МАГАТЭ «Dry Spent Fuel Technology», Санкт-Петербург, 2002; на 4-м семинаре/совещании Ливерморской Национальной Лаборатории (США) по российско-американским контрактам по утилизации оружейного плутония – Санкт-Петербург, 2003; а также на отраслевых совещаниях по данной тематике.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 12 работ. Основное содержание диссертации отражено в работах /1 - 4/.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений.

Работа представлена на 145 стр., в том числе основного текста 133 стр., библиографии 6 стр. (91 наименование) и приложений 6 стр.

Работа содержит 79 рисунков и 11 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и в общей характеристике работы показана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования и положения, выносимые на защиту. Приводится краткий обзор содержания работы.

В первой главе диссертационной работы представлен объект и предмет исследования. Проведен сравнительный обзор основных этапов зарубежной и отечественной технологии по переводу отработавшего топлива РБМК на сухое контейнерное хранение.

Рассмотрены конструкции двух типов упаковок УКХ-104 и УКХ-109 (или с транспортировочным кожухом ТУК-104 и ТУК-109), разработанные КБСМ для хранения ОЯТ РБМК-1000. Данные упаковки позволяют размещать во внутренней полости чехол, загруженный ампулами с пучками твэлов (рис. 1) в количестве 114 (УКХ-104) или 144 (УКХ-109) штук при выгорании топлива не более 22,8 МВт·сут/кг U.

Приведено описание основных технологических этапов перевода ОЯТ РБМК-1000 на сухое контейнерное хранение с использованием данных упаковок для первой, реализующей данную технологию, старейшей атомной станции данного типа – Ленинградской АЭС.

Более подробно рассмотрена последовательность технологического процесса разделки и загрузки ОЯТ РБМК-1000 в металлобетонный контейнер для Ленинградской АЭС, поскольку именно этот этап является предметом расчетных исследований автора диссертационной работы.

Согласно разработанной технологической схеме, каждая ОТВС после доставки её из «мокрого» хранилища делится на две части и загружается в специальные ампулы, которые в течение достаточно продолжительного времени последовательно размещаются в чехле МБК.

Продолжительность технологического процесса загрузки одного контейнера ОЯТ РБМК-1000 оценивается из длительности проведения транспортно-технологических операций. Для Ленинградской АЭС продолжительность общего технологического цикла разделки одной ОТВС принята равной 80 мин (исходя из заданной производительности – 3600 ОТВС в год). Согласно проекту, на этой станции планируется работа двух независимых линий по разделке ОТВС, производительностью 9 ОТВС за одну 6-ти часовую рабочую смену. Тогда, при 2-х сменной работе на двух технологических цепочках общая длительность загрузки чехла составит от 3-х до 4-х суток в зависимости от типа загружаемого контейнера.

Загрузка ампул с ПТ в чехол контейнера для УКХ-104 и УКХ-109 на Ленинградской АЭС должна осуществляться согласно регламенту, определяемому техническим проектом по загрузке ОЯТ, и в соответствии со схемой, представленной на рис. 1. Цифрами I и II обозначены две технологические цепочки по загрузке ампул с ПТ в чехол МБК, работающие одновременно (жирная линия, проходящая через центр чехла, является границей разделяющей эти цепочки). Последовательность размещения ампул в чехле совпадает с направлением стрелок.

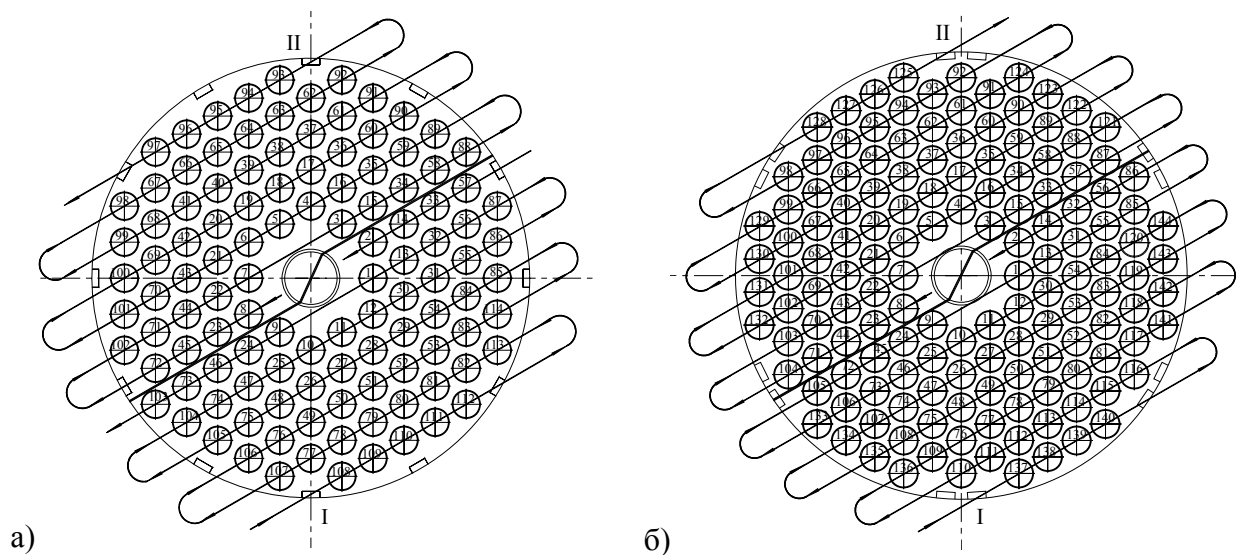


Рис. 1. – Схема загрузки ампул с ОЯТ в чехол МБК для УКХ-104 (а) и УКХ-109 (б)

Технология разделки ОТВС перед загрузкой в контейнер в настоящее время не предусматривает специальных операций по удалению воды из их конструктивных элементов, поэтому во внутреннюю полость ампул неизбежно попадание определенного количества влаги как из внутренней полости несущей трубы ОТВС, так и в капельном виде на внешних конструктивных поверхностях сборки.

После загрузки чехла с отработавшим топливом в контейнер и герметизации последнего, предполагается вывоз упаковочного комплекта в хранилище и его выдержка в герметичном состоянии в течение 24 часов.

Во второй главе описываются основные процессы теплообмена, протекающие при загрузке ОЯТ РБМК в контейнер, дается обзор отечественных и зарубежных расчетных кодов, предназначенных для моделирования процессов теплообмена в многостержневых системах, в том числе и контейнерах с ОЯТ.

В период загрузки ампул с ПТ в чехол контейнера за счет остаточных тепловыделений происходит разогрев твэлов, тепло от которых посредством конвекции, кондукции и тепловой

радиации передается элементам конструкций ТВС, корпусам ампул и чехлу контейнера, а также приводит к прогреву воды в ампулах, в случае ее возможного попадания. При высоких остаточных тепловыделениях отработавшего топлива не исключается возможность испарения воды, содержащейся в ампулах. Также последовательная установка ампул с пучками ТВЭЛов в чехол контейнера приводит к образованию областей, ограниченных корпусами установленных ампул и конструктивными элементами чехла, воздух в которых начинает прогреваться, причем достаточно плотная упаковка ампул и дистанционирующие решетки чехла препятствуют образованию развитой естественной конвекции в этих объемах. Таким образом, необходимо решать задачу со сложным тепломассообменом в топологически меняющейся во времени системе тел. Основными требованиями при выборе методов численного моделирования и разработке расчетных программ являлись:

- достоверное описание процессов тепломассообмена при загрузке ампул с пучками ТВЭЛов в контейнер и соответствие современному уровню моделирования;
- вычислительная эффективность разработанных расчетных программ.

В разделе 2.2 содержится методика расчета нестационарных полей температур в топливе, конструктивных элементах и корпусе контейнера. Нестационарные уравнения теплопроводности, дополненные граничными условиями по лучистому и конвективному теплообмену, решаются с применением метода конечных элементов (МКЭ). Для дискретизации расчетной области используются квадратичные лагранжевы четырехугольные элементы. Уравнения метода конечных элементов для задач теплопроводности выводятся на основе вариационных принципов. Для аппроксимации производной по времени используется конечно-разностный алгоритм, соответствующий схеме Кранка-Николсона. Все вычислительные алгоритмы, связанные с матричными операциями, для программного модуля расчета полей температур выполнены автором диссертации в технике разреженных матриц. Решение систем уравнений осуществляется с помощью стандартного пакета программ библиотеки NAG, являющегося версией известного программного комплекса MA28 разработки Харуэллского вычислительного центра. В заключение этого раздела приводятся оценки погрешности дискретизации и вычислительной эффективности, затраты оперативной памяти для программного модуля расчета нестационарных полей температур. Показана эффективность применяемого алгоритма для конечно-элементных задач.

В разделе 2.3 представлено описание расчета лучистого теплопереноса и проведен сравнительный анализ радиационных моделей, используемых в некоторых хорошо известных расчетных кодах.

При создании методики моделирования радиационного теплообмена необходимо было учитывать изменение коэффициентов переоблучения по мере изменения во времени топологии системы. В разработанной радиационной модели, в общей формулировке, нет допущений об осевой симметрии задачи, однако при ее наличии многие соотношения для коэффициентов переизлучения значительно упрощаются, и это используется, если такое допущение применимо при моделировании структур.

Лучистый теплообмен между конструктивными элементами и топливом при моделировании технологической операции загрузки, а также во внутренних объемах ампул

рассматривается в рамках зонального метода. Угловые коэффициенты φ_{ij} для рассматриваемых систем тел вычисляются с помощью метода Монте-Карло и использованием свойств замыкаемости и взаимности. Перечислим основные допущения, принятые при разработке математической модели:

- все рассматриваемые тепловые структуры разбиваются на зоны, имеющие однородные термические и оптические характеристики в пределах поверхности;
- переизлучение носит диффузный характер;
- газовая среда, находящаяся между поверхностями переизлучения является однородной и прозрачной.

Решение систем линейных алгебраических уравнений для нахождения разрешающих угловых коэффициентов и результирующих потоков теплового излучения осуществляется так же стандартным пакетом МА28.

В разделе 2.4 приводится описание используемых эмпирических соотношений по конвективному теплообмену для горизонтальных, вертикальных поверхностей и замкнутых объемов. Для сборок топлива применяются корреляционные зависимости для числа Нуссельта, полученные американскими учеными на основе экспериментальных исследований свободной конвекции в вертикальных сборках стержней, находящихся в замкнутой полости, включающие в себя число Рэлея и геометрические параметры.

Разделы 2.5 и 2.6 посвящены моделированию процессов прогрева воздуха в ампулах и межампульном пространстве. Показано разбиение расчетных областей на контрольные объемы, записаны уравнения теплового баланса для определения осредненных температур, соответствующих этим объемам, приведен алгоритм расчета температурного состояния воздуха в межампульном пространстве. Основным достижением этого алгоритма является учет неравномерного прогрева воздуха в массиве загружаемых ампул, как по сечению, так и по высоте. Разбиение области на контрольные объемы ведется в соответствии с зональным разбиением основных конструктивных элементов и топлива. Так, например, для одного из вариантов разбиения межампульного пространства для УКХ-104 используется 52 слоя по высоте и 186 контрольных объемов в каждом слое.

В разделе 2.7 приводятся уравнения сохранения массы и энергии, замыкающие соотношения для пузырькового режима кипения и соотношение для генерации пара в ампуле.

В разделе 2.8 диссертационной работы содержится описание алгоритма, блок-схема которого представлена на рис. 2. Структура алгоритма заключается в следующем. На основе исходных данных, задаваемых пользователем, в основной программе происходит формирование массивов для обеспечения работы алгоритма в топологически меняющейся во времени системе тел. Таким образом, на каждом временном шаге существует информация об изменении (или неизменности) количества ампул, установленных в чехол МБК. Последовательно, в соответствии с изменением топологии системы тел, с помощью метода Монте-Карло производится расчет угловых коэффициентов лучистого теплообмена в системе тел *ампулы – чехол МБК – корпус шахты*. Расчет угловых коэффициентов лучистого теплообмена в системе тел *корпус ампулы – пучок твэлов* производится в самом начале работы программы один раз. В рамках разработанного алгоритма, на каждом временном шаге формируются граничные условия по лучистому и

конвективному теплообмену и решаются уравнения нестационарной теплопроводности для всех рассматриваемых конструктивных элементов; уравнения теплового баланса для определения температур воздуха в ампулах и в межампульном пространстве (при этом учитывается неоднородность полей температур по высоте ампул (или твэлов) и по сечению чехла) и уравнения по разогреву и испарению воды для каждой ампулы. Новые граничные условия по лучистому теплообмену получаются из решения систем уравнений для нахождения результирующих потоков излучения, получаемых на основе данных по излучательным способностям поверхностей, рассчитанным разрешающим угловым коэффициентам и температурному состоянию поверхностей, для таких систем тел, как *корпус ампулы – пучок твэлов* и *корпуса ампул – чехол МБК – стенка шахты МБК*. Граничные условия по конвективному и межфазному (в случае кипения воды в ампулах) теплообмену определяются из эмпирических соотношений по известному температурному состоянию поверхностей и воздуха в помещении загрузки и в межампульном пространстве, воздуха и воды во внутреннем объеме ампул.



Рис. 2. – Блок-схема алгоритма численного моделирования загрузки ампул с ОЯТ РБМК-1000 в чехол МБК

Учитывая возможности имеющейся вычислительной техники, в настоящее время достаточно затруднительно создать эффективную программу, позволяющую рассчитывать одновременно температурные поля в 2 – 3-х тысячах тел, моделируемых в трехмерной геометрии. Именно такое количество тел необходимо рассматривать при воспроизведении технологического процесса загрузки ампул с ОЯТ в контейнер: 2282 тела для УКХ-104 и 2882 тела для УКХ-109. Поэтому представленный алгоритм был реализован в виде двух программных комплексов различного целевого назначения.

Первый из разработанных программных комплексов предназначен для проведения расчетов в реальном времени и дает фактически трехмерный анализ изменения температурного состояния твэлов, корпусов ампул, чехла и корпуса контейнера, а также температуры воды и ее количества в

каждой из загружаемых ампул (при ее предполагаемом наличии и возможности выкипания). При этом используется осесимметричное описание геометрии каждого рассматриваемого тела, а температурное состояние воздуха в межампульном пространстве является неравномерным, как по сечению чехла, так и по высоте. При разработке этого варианта предполагалось, что твэлы, расположенные в одном коаксиальном ряду пучка, имеют одинаковые температуры, и пренебрегалось перетечками тепла по боковой образующей корпуса ампулы и аксиальными составляющими лучистых тепловых потоков. Использование таких допущений позволило практически в 5 раз уменьшить количество рассчитываемых тел при моделировании загрузки и ввести в рассмотрение лишь 458 тел для УКХ-104 и 578 тел для УКХ-109.

Второй из разработанных программных комплексов предназначен для детального анализа температурных полей твэлов, корпусов ампул, чехла и корпуса контейнера в горизонтальном сечении. В этом случае, каждое из тел описывается в двумерной плоской геометрии, что позволяет учитывать неоднородные граничные условия по периметру моделируемых объектов и детально анализировать поля температур по их сечению.

Третья глава диссертационной работы посвящена тестированию и верификации разработанных программных средств.

В разделах 3.1 и 3.2 содержатся результаты по тестированию разработанных программных модулей, описывающих процессы теплопроводности и лучистого теплообмена. Тестирование проводилось на базе задач, допускающих аналитическое решение для решения нестационарного уравнения теплопроводности и нахождения угловых коэффициентов излучения в геометрически сложных системах тел.

В разделе 3.3 представлены результаты верификации на немногочисленных экспериментальных данных по тепловому поведению имитатора ампулы с имитатором пучком твэлов, полученных на установке «Овал», разработанной и сооруженной в НИТИ, изменяемыми параметрами для которых являлись мощность суммарных тепловыделений в обмотке имитатора твэла и давление во внутреннем объеме имитатора ампулы. Сопоставление расчетов с экспериментальными данными позволило обосновать корректность применения разработанной методики для описания процессов теплообмена, как во внутреннем объеме ампул при остаточных тепловыделениях, соответствующих ОЯТ 10-ти и 30-летней выдержки, так и конвективным охлаждением одиночной ампулы на воздухе.

В разделе 3.4 представлены результаты верификации на данных экспериментальных исследований, полученных в ЦКТИ при испытании модели, состоящей из 127-ми электрообогреваемых трубок, расположенных в кожухе по гексагональной решетке с шагом $s=13,4$ мм. На этой модели проводился анализ распределения температур по диаметру модели при моделировании симметричных и несимметричных граничных условий по периметру кожуха. В первом случае, постоянную температуру кожуха $t_{\text{пр}}$ обеспечивала водяная «рубашка» охлаждения. Во втором случае, условия теплоотвода заключались в следующем: две соседние грани кожуха нагревались с помощью электрического нагревателя, от двух противоположных граней осуществлялся отвод тепла посредством охлаждающей воды, прокачиваемой через водяную камеру, приваренную ним, на двух остальных гранях имитировались адиабатные условия путем установки на них асбоцементной изоляции.

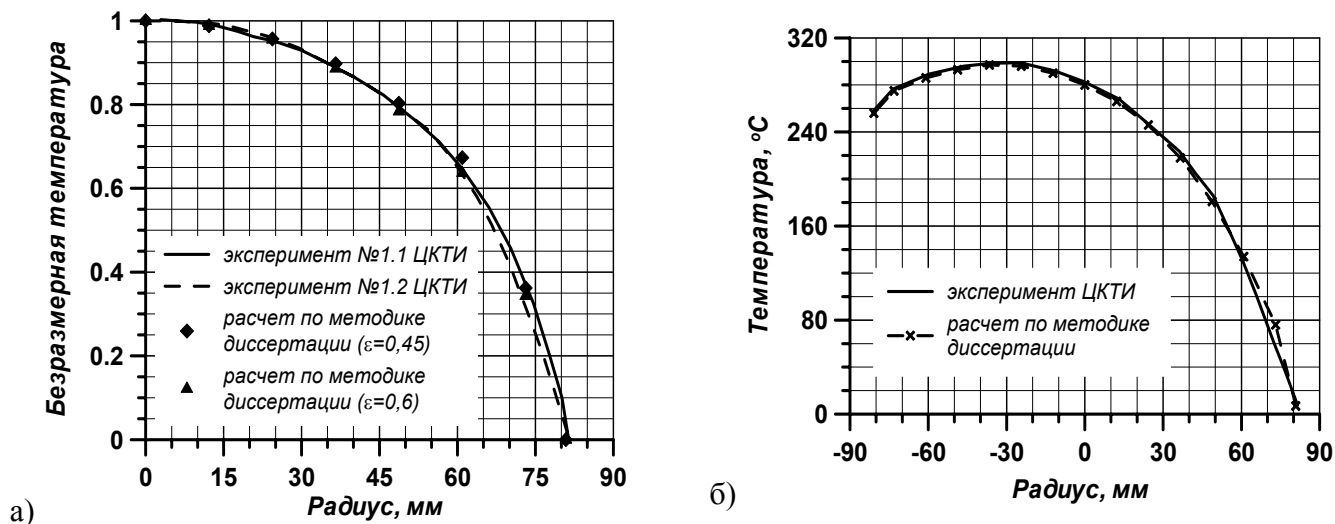


Рис. 3. – Распределение температуры по радиусу модели в эксперименте для симметричных граничных условий (а) и по диаметру модели для несимметричных граничных условий (б)

Сопоставление расчетов по распределению температур по диаметру тепловыделяющей 127-ми стержневой сборки с экспериментальными данными ЦКТИ (см. рис. 3) показало, что использование методики, представленной в диссертационной работе, обеспечивает достаточно высокую точность расчетного анализа температурного состояния твэлов, независимо от температурного диапазона по сечению сборки, а также накладываемых граничных условий, являющихся однородными или неоднородными по периметру кожуха.

В четвертой, заключительной главе диссертационной работы, приведены результаты расчетов, выполненные с использованием компьютера DEC AlphaServer 41005/300.

Для оценки погрешностей и обоснования используемых допущений, обеспечивающих высокую вычислительную эффективность расчетной программы, автором были проведены численные эксперименты, которые показали следующее:

- допущение о распространении потоков теплового излучения с боковых поверхностей в направлении, нормальном к поверхностям излучающего объекта, дает отклонение по температурам в наиболее термонапряженном сечении для твэлов внешнего ряда 1,5 °С, а для внутреннего (наиболее горячего) менее 1 °С по отношению к полной модели с учетом аксиального радиационного теплопереноса;
- при моделировании каждого тела в осесимметричном приближении, пренебрегается температурным градиентом по периметру боковой поверхности корпусов ампул, достигающим значений от 2,8 до 0,8 °С для 95 % и 8,4 °С для 5 % ампул с ОЯТ, упакованных в чехол контейнера, в сечении с максимальным тепловыделением, при этом погрешность по максимальному значению температуры твэлов составляет 3,2 °С.

При проведении серийных расчетов использовались реальная геометрия рассматриваемых объектов (сборок РБМК, корпусов ампул и контейнера, и т.д.) и существующий на настоящий момент регламент проведения транспортно-технологических операций для Ленинградской АЭС. Начальная температура отработавшего топлива принималась в соответствии с условиями хранения в бассейне выдержки. Также в качестве исходных данных принимались следующие значения: температура в камере разделки и загрузки ОТВС из диапазона от +15°С до +45°С; давление в камере разделки и загрузки 98,8 кПа; количество воды из расчета 0,25 кг в каждой

ампуле; мощность остаточных тепловыделений ОЯТ полагалась одинаковой для каждой ампулы и ее значение соответствовало исходным данным, предоставленными КБСМ, и расчетным оценкам НИТИ, проведенным для Ленинградской АЭС; максимальный коэффициент неравномерности тепловыделений по высоте пучка твэлов принимался равным 1,15. Физические свойства элементов конструкции и топлива задавались в соответствии со справочными данными.

Некоторые из моделируемых режимов по загрузке отработавшего топлива в чехол контейнера и наиболее важные результаты расчетов приведены в табл. 1. Для УКХ-104 был проведен дополнительный расчет при отсутствии воды в ампулах и остаточных тепловыделениях, соответствующих ОЯТ РБМК-1000 10-летней выдержки (см. табл. 1).

Таблица 1 – Сводная таблица моделируемых режимов и результатов расчетов.

Тип МБК	№ расчета	Температура воздуха в помещении загрузки, °С	Температура воды в БВ, °С	Остаточные тепловыделения, кВт/ТВС	Максимальная температура ОЯТ (окончание загрузки), °С	Максимальная температура воды в ампулах (окончание загрузки), °С
УКХ-104	Расчеты с водой в ампулах					
	4_10/1	+45,0	+45,0	87,6	126,6	88,3
	4_10/3	+45,0	+40,0	75,0	117,0	82,4
	4_30/1	+45,0	+40,0	52,6	97,8	71,3
	4_30/3	+15,0	+34,0	52,6	77,2	47,1
	Расчеты без воды в ампулах					
4_10/4	+45,0	+45,0	87,6	133,3	–	
УКХ-109	Расчеты с водой в ампулах					
	9_10/1	+45,0	+40,0	87,6	126,9	87,9
	9_30/1	+45,0	+40,0	52,6	98,1	71,0
	9_30/3	+15,0	+34,0	52,6	75,7	44,6

Проведенные расчетные исследования процессов теплообмена при воспроизведении регламента транспортно-технологических операций по загрузке УКХ-104 и УКХ-109 для Ленинградской АЭС в соответствии со штатными технологическими схемами последовательного размещения ампул, разработанными ЦКБМ (см. рис. 1), позволяют сделать следующие выводы:

- Во время загрузки топливные стержни, находящиеся внутри ампул, так же как и сами ампулы, прогреваются неравномерно, причем к окончанию загрузки в чехле существуют локальные области с сильно и слабо разогретыми ампулами с ОЯТ. Максимальные значения температур в топливе оказываются близки как для чехла УКХ-104, так и для УКХ-109, и на момент окончания загрузки ампул с ОЯТ составляют +127 °С для ОЯТ 10-летней выдержки и +98 °С для ОЯТ 30-летней выдержки, что существенно выше температурного состояния топлива при его пребывании в бассейне выдержки.
- К моменту окончания загрузки ампул с отработавшим топливом РБМК в чехол контейнера вода, находящаяся в ампулах прогревается, но не достигает температуры насыщения.

- При отсутствии воды в ампулах для максимально возможных остаточных тепловыделений ОЯТ максимальная температура топлива на 13 °С больше этого же значения при наличии воды в ампулах.

Автором диссертации рассмотрены также нештатные схемы последовательного размещения ампул в чехле контейнера при воспроизведении регламента транспортно-технологических операций по загрузке УКХ-104 для Ленинградской АЭС. Основной целью такого расчетного анализа являлась демонстрация влияния последовательности установки ампул с ОЯТ в чехол контейнера на распределение температур ТВЭлов в массиве ампул, при этом были получены следующие основные отличия:

- при загрузке ампул с ОЯТ РБМК в соответствии со схемой от периферии к центру примерно 46 % ампул с ОЯТ, расположенных в центре чела имеет одинаковое температурное состояние, полученное максимальное значение температуры ТВЭлов соответствует этому же значению при загрузке ампул в соответствии со схемой ЦКБМ;
- при загрузке ампул с ОЯТ РБМК в соответствии со схемой от центра к периферии характер распределения температур по сечению чехла имеет ярко выраженный радиальный характер, а максимальное значение температуры топливных стержней превышает на 12 °С это же значение при загрузке ампул в соответствии со схемой ЦКБМ;
- при реализации схем загрузки, отличных от схемы ЦКБМ, вода, находящаяся в ампулах, к моменту окончания загрузки также прогревается, но не достигает температуры насыщения.

Автором были также проведен расчетный анализ по изменению температурного состояния ТВЭлов, конструкционных элементов и корпуса МБК при различных вариантах загрузки на этапе предварительной выдержки. Моделирование проводилось для сечения с максимальными тепловыделениями. Полученные результаты показали следующее:

- К окончанию этого периода прогрев ТВЭлов в массиве ампул с ОЯТ в контейнере независимо от способа загрузки носит выраженный радиальный характер т.е. в каждом гексагональном ряду ~ 80 - 90 % ампул с пучками ТВЭлов имеют одинаковое температурное состояние.
- Неоднородность температурного состояния загружаемого в контейнер массива ампул с ОЯТ в соответствии со штатной схемой загрузки приводит к неравномерному прогреву корпуса контейнера по периметру боковой поверхности, при этом максимальный перепад температур составляет 6 °С.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для моделирования процессов тепломассообмена в период загрузки отработавшего ядерного топлива в контейнер, на основе предложенной в диссертационной работе методики моделирования разработан алгоритм, основными достижениями которого являются:

- учет основных механизмов тепломассообмена в сложной теплопередающей системе тел;

- расчет угловых коэффициентов лучистого теплообмена в топологически меняющейся во времени системе тел, соответствующей произвольной последовательности размещения ампул с ОЯТ в чехле контейнера, с использованием метода Монте-Карло;
 - возможность варьирования последовательностью, количеством и временными интервалами размещения ампул в чехле контейнера;
 - возможность учета различных остаточных тепловыделений отработавших тепловыделяющих сборок, загружаемых в контейнер.
2. На основе разработанного алгоритма созданы программные комплексы, допускающие варьирование определяющими физическими и технологическими параметрами на уровне исходных данных, следующего целевого назначения:
- для анализа процессов тепломассообмена в реальном времени в трехмерной системе, состоящей из тел, моделируемых в осесимметричном приближении, и учитывающей неравномерное распределение температур прогреваемого воздуха в межампульном пространстве как по сечению, так и по высоте;
 - для детального анализа температурного состояния тел в выбранном горизонтальном сечении, при моделировании каждого рассматриваемого тела в двумерной плоской геометрии и учетом неоднородных граничных условий по их периметру.
3. Проведены тестирование и верификация разработанных программных средств, подтверждающие приемлемую точность и достоверность полученных результатов при моделировании сложных процессов тепломассообмена в области изменения рассчитываемых параметров.
4. Проведен численный анализ процессов, влияющих на температурное состояние ТВЭЛов:
- аксиального лучистого теплопереноса при различном удалении ампул с ОЯТ друг от друга;
 - неоднородности лучистых и конвективных тепловых потоков по периметру моделируемых объектов;
 - соотношения долей лучистого и конвективных тепловых потоков в течение всего периода загрузки.
5. Проведено численное моделирование процессов тепломассообмена на этапах загрузки ампул с ОЯТ в чехол и предварительной выдержки контейнера при воспроизведении технологического регламента для Ленинградской АЭС в широком диапазоне варьирования основными исходными данными, в ходе которых впервые в отечественной практике получены следующие результаты:
- для массива ампул с ОЯТ РБМК-1000 10-ти и 30-летней выдержки рассчитано распределение температур в ТВЭлах в зависимости от штатных и нештатных схем последовательного размещения ампул в чехле контейнера, а также наличия или отсутствия воды в ампулах, при этом доказано непревышение максимально допустимых температур ТВЭЛов;
 - к моменту окончания этапа загрузки для штатных схем последовательного размещения ампул с ОЯТ в чехле контейнера вода, находящаяся в ампулах, прогревается, но не достигает температуры кипения, поэтому при моделировании дальнейших этапов

целесообразно предполагать, что вся содержащаяся в ампулах вода попадет в контейнер;

- для сечения с максимальным тепловыделением рассчитано распределение температур в корпусе контейнера, и показана неравномерность прогрева по внутреннему периметру корпуса в зависимости от схем последовательного размещения ампул с ОЯТ.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ефимов В.К., Иванова В.О., Иванов М.Б., Черный О.Д. Расчетно-экспериментальное исследование температурного состояния металлобетонного контейнера для сухого хранения отработавшего ядерного топлива. // Материалы XI семинара по проблемам физики реакторов. Москва, 4 - 8 сент. 2000 г., С. 168-170.
2. Иванов М.Б., Иванова В.О., Ефимов В.К., Черный О.Д. Разработка программного комплекса для расчета температурного состояния контейнера с отработавшим ядерным топливом в период подготовки к длительному сухому хранению. // Материалы 3-й ежегодной Международной конференции «Радиационная безопасность», 31 октября - 4 ноября 2000 г., С-Петербург, Россия, С. 59-61.
3. Иванов М.Б., Иванова В.О. Математическое моделирование режимов функционирования металло-бетонного контейнера с отработавшим ядерным топливом в период подготовки к длительному сухому хранению. // Материалы 4-й Международной конференции «Радиационная безопасность: Экология – Атомная энергия». 24 - 28 октября 2001 г., С-Петербург, Россия, С. 202-207.
4. Иванов М.Б., Иванова В.О. Математическое моделирование загрузки чехла МБК ампулами с ОЯТ РБМК-1000 при подготовке к сухому хранению. // Материалы 5-й Международной конференции «Радиационная безопасность». 24 - 27 сентября 2002 г., С-Петербург, Россия, С. 153-156.