На правах рукописи

ФИЛИППОВ МИХАИЛ ФЕДОРОВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА МАССОПЕРЕНОСА РАДИОНУКЛИДОВ В НАТРИЕВЫХ КОНТУРАХ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ ОСАЖДЕНИЯ, ПОВТОРНОГО ВЗВЕШИВАНИЯ И МЕЖФАЗНОГО ПЕРЕНОСА

Специальность 05.14.03 - «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Автор:

Москва 2017 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: Рачков Валерий Иванович
доктор технических наук, профессор, чл.-кор. РАН,
научный руководитель АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск

Официальные оппоненты: Соловьёв Сергей Леонидович
доктор технических наук, профессор,
начальник отдела ОАО «ВНИИАЭС»,
г. Москва

Затевахин Михаил Александрович
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
ведущий специалист Отдела обоснования
безопасности и НИОКР АО «АТОМПРОЕКТ», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Акционерное общество
"Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций", г. Электрогорск

Защита состоится 15.11.2017 г. в 12 ч. 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 при Национальном исследовательском ядерном университете "МИФИ" по адресу: 115409, г. Москва, Каширское ш., 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ"
http://ods.mephi.ru/dissertations
Автореферат разослан «4» сентября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук, профессор И.И. Чернов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Рост энергопотребления в современном мире требует активного развития существующих и разработки новых технологических процессов использования доступных энергетических ресурсов. Одно из направлений развития связано с переходом к безуглеродной энергетике (как более экологичной). И на данный момент ядерная энергетика – наиболее развитая ее часть. Несмотря на то, что доля ядерной энергетики в общемировом энергопроизводстве в настоящее время составляет всего 12 %, внедрение новых технологий может способствовать более интенсивному ее применению вовсем мире (в том числе в РФ). Одной из таких прорывных технологий является замыкание топливного цикла, предполагающее рециклинг отработанного ядерного топлива с помощью быстрых реакторов, обеспечивающих простое или расширенное воспроизводство ядерного топлива. Для перехода к замкнутому топливному циклу необходима разработка реакторных установок данного типа, удовлетворяющих современным требованиям по безопасности и экономичности.

Одной из задач, возникших в рамках развития технологии быстрых реакторов с натриевым теплоносителем, является повышение радиационной безопасности реакторной установки (РУ). Разработка новых решений в этой областитребует создания новых расчетных методов количественной оценки параметров, значимых с точки зрения безопасности.

В частности, важное значение имеет оценка интенсивности выхода дозообразующих радионуклидов за пределы контуров РУ в реакторные помещения и окружающую среду. Подобные оценки предполагают рассмотрение процессов миграции радионуклидов в пределах первого контура и газовой системы РУ. Очевидно, что экспериментальные исследования подобных процессов на крупномасштабных установках чрезвычайно дороги, а иногда и невозможны (как в случае оценки радиационных последствий запроектных

аварий, так и при оценке радиационной безопасности проектируемых РУ). В связи с этим возникает потребность в расчетно-теоретических методах исследования.

В настоящее время задачу разработки таких методов, удовлетворяющих современным требованиям к точности и области применения, нельзя считать до конца решенной. Для некоторых видов радионуклидов (газообразных продуктов деления, радиоактивных продуктов коррозии) уже существуют эффективные методы моделирования переноса и поведения в первом контуре и газовой системе РУ. В то же время, для таких значимых с точки зрения радиационной безопасности радионуклидов, как изотопы цезия и йода (летучие продукты деления), подобные методы отсутствуют. Известные же расчетные оценки недостаточно обоснованы.

Данная работа направлена на создание метода расчета массопереноса цезия и йода в первом контуре и газовой системе РУ и его внедрение в современное программное средство. Решение этих вопросов связано с развитием методов моделирования указанных процессов.

Целью диссертационной работы являлась в разработка и верификация метода расчета переноса и поведения цезия и йода в натриевом теплоносителе и в газовой системе РУ.

Исходя из поставленной цели, в диссертационной работе решены следующие **задачи.**

1. Проведен анализ исследований по моделированию процессов массопереноса цезия и йода в натриевом теплоносителе и в газовой системе РУ, а также по имеющимся методам и программным средствам для расчета этих процессов.
2. Сформировано математическое описание процессов массопереноса цезия и йода в натриевом теплоносителе. Рассчитаны значения параметров математических моделей этих процессов.
3. Сформировано математическое описание процессов массопереноса цезия и йода в газовой системе РУ. Разработаны рекомендации для расчета параметров математических моделей этих процессов.

4. Выполнена верификация разработанных моделей массопереноса цезия и йода в натриевом теплоносителе и в газовой системе РУ на представленных в открытой печати экспериментальных данных.
5. На основе математических моделей массопереноса разработан метод расчета переноса и поведения цезия и йода в натриевом теплоносителе и в газовой системе РУ. Проведена программная реализация разработанного метода.

Научная новизна работы.

1. Разработана математическая модель адсорбции йодида натрия в натриевом контуре РУ и определены температурные условия ее применения.
2. Разработана математическая модель адсорбции цезия в натриевом контуре РУ, учитывающая особенности изменения свойств адсорбирующей поверхности, и определены температурные условия ее применения.
3. Для моделей процессов межфазного массопереноса и поведения цезия и йода в газовой системе РУ разработаны рекомендации для расчета следующих параметров: скорости диффузионного переноса продуктов деления к межфазной поверхности; скорости диффузионного переноса паров продуктов деления к межфазной поверхности в паро-газовой среде; скорости диффузионного переноса паров продуктов деления к поверхности конструкционных элементов. Проведена коррекция моделей образования, переноса и поведения аэрозольных форм цезия и йодида натрия.
4. Разработан метод расчета переноса и поведения цезия и йода в первом контуре РУ БН, реализующий расчет массопереноса радионуклидов в натриевых контурахв интегральном коде СОКРАТ-БН

Практическая значимость работы.

1. Внедрение предложенного расчетного метода в программный модуль TRANS_FP интегрального кода СОКРАТ-БН может позволить обоснованно снизить консерватизм в оценке выхода значимых с точки зрения

радиационной безопасности радионуклидов из первого контура в реакторные помещения и окружающую среду.

2. Разработка и внедрение алгоритма эксперсс-расчетов накопления продуктов деления в технологических средах реакторной установки (РУ) за время нормальной эксплуатации позволяет корректно оценивать предаварийное распределение активности в контурах РУ, и проводить обоснование радиационной безопасности РУ проектных режимов работы РУ.
3. Разработанный метод может быть применен для описания переноса и поведения других радионуклидов в случае появления дополнительных экспериментальных данных для вычисления параметров моделей.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты анализа проведенных исследований по моделированию процессов массопереноса цезия и йода в натриевом теплоносителе и газовой системе РУ БН.
2. Математическое описание процессов массопереноса цезия и йода в натриевом теплоносителе и газовой системе РУ.
3. Результаты расчета параметров в математических моделях массопереноса цезия и йода в натриевом теплоносителе и газовой системе РУ.
4. Разработанный метод расчета переноса и поведения цезия и йода в натриевом теплоносителе и газовой системе РУ.

Достоверность полученных результатов. Достоверность моделей, применяемых в рамках разработанного метода, обеспечена результатами верификации на петлевых экспериментах (Таблица 1).

Таблица 1 - Набор верификационных тестов для применяемых моделей

Задействованные модели	**Эксперимент**
Модель осаждения йодида натрия в натриевом теплоносителе	Осаждение йодида натрия в холодной ловушке контура Toshiba FPL

Продолжение таблицы 1.

Модель осаждения цезия в натриевом теплоносителе	Осаждение цезия в контуре FPBL
Модели конденсации и нуклеации паров ПД, осаждения и коагуляции аэрозолей	Осаждение паров цезия в охлаждаемой трубе
Модели межфазного массопереноса ПД, конденсации и нуклеации паров ПД, осаждения и коагуляции аэрозолей	Испарение йодида натрия из натриевого теплоносителя в защитный газ в экспериментальной установке FRAT-1
Модели конденсации и нуклеации паров ПД, осаждения и коагуляции аэрозолей	Образование и поведение аэрозолей в защитном газе над уровнем натрия (установка SILVERINA)

Апробация работы: основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских конференциях и школах:

- конференции "XV Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН: Безопасность и риска в энергетике";
- 10-ой юбилейной Российской научной конференции "Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях";
- конференции молодых специалистов "Инновации в атомной энергетике" 2015 г.;
- конференции "Научная сессия НИЯУ МИФИ - 2015";
- на семинарах в НИЯУ МИФИ и ИБРАЭ РАН.

Публикации: по теме диссертации опубликовано8 работ в научных журналах и сборниках трудов Всероссийских конференций, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад. Непосредственный личный вклад автора в работу состоит в следующем:

1. Разработан вид и состав применяемых в рамках разрабатываемого метода моделей переноса и поведения цезия и йодида натрия, определены значения параметров моделей.
2. Разработан метод моделирования переноса и поведения ПД, включая разработку алгоритма конечно-разностного решения. Выполнена программная реализация разработанного метода.
3. Предложен набор верификационных тестов, проведена верификация.
4. Автор принял непосредственное участие в апробации работы и подготовке публикаций по теме диссертации.

Структура и объем диссертации: диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Материал изложен на 122 страницах, содержит 30 рисунков, 13 таблиц, список цитируемой литературы из 84 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, обоснована научная новизна и практическая значимость полученных результатов, определены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены результаты анализа публикаций, посвященных задачам моделирования переноса и поведения изотопов цезия и йода в натриевом теплоносителе. Выполнен анализ существующей нормативно-правовой базы, регулирующей процедуру обоснования радиационной безопасности реакторных установок (РУ) и определяющей перечень значимых с точки зрения радиационной безопасности радионуклидов. Показана важность задачи моделирования процессов переноса и поведения изотопов цезия и йода в первом контуре и газовой системе РУ в рамках обоснования ее радиационной безопасности. Проведен анализ методов количественной оценки выхода изотопов цезия и йода из первого контура РУ. Представлен перечень рассматриваемых в

рамках решения данной задачи процессов, проведен анализ степени проработанности соответствующих моделей.

В результате проведенного анализа выявлено, что методы моделирования, применяемые в настоящее время в отечественных и зарубежных кодах, не позволяют описывать все явления, важные с точки зрения распространения йода и цезия в первом контуре. Методы моделирования, реализованные в отечественном коде СОКРАТ-БН (версия 2012 г.), не являются универсальными и предназначаются только для описания переноса активированных продуктов коррозии и газообразных продуктов деления. Модели, реализованные в кодах TRACER и CONTAIN-LMR (сопряженным с кодом REVOLS), не предназначены для описания осаждения йода и цезия в натриевом теплоносителе. Метод, на базе которой разработан код ACTOR, ориентирован только на описание осаждения в натриевом теплоносителе.

Проведен анализ опубликованных экспериментальных данных, описывающих основные физико-химические особенности поведения цезия и йода в натриевом теплоносителе РУ БН. Определен перечень рассматриваемыхфизических процессов, перечень рассматриваемыхфизико-химические форм цезия и йода в натриевом теплоносителе и защитном газе. Анализ экспериментальных данных показал, что в условиях нормальной эксплуатации и аварийных процессов цезий в натриевом теплоносителе может присутствовать преимущественно в форме элементарного растворенного цезия, йод - в форме растворенного йодида натрия.

На основе анализа существующих подходов к моделированию процессов осаждения продуктов деления в натриевом теплоносителе, межфазного массопереноса, переноса и поведения продуктов деления в парогазовой среде выявлены основные недостатки существующих методов и моделей:

- отсутствие корреляций для замыкания существующих моделей осаждения, позволяющих описать известные экспериментальные данные;

- отсутствие рекомендаций по определению значений ряда параметров моделей осаждения, межфазного массопереноса, поведения паров ПД;
- не универсальность применяемых методов моделирования межфазного массопереноса, переноса и поведения ПД в защитном газе; ориентация этих методов преимущественно на описание процессов нормальной эксплуатации РУ;
- отсутствие информация о верификации известных методов и моделей.

Обоснованы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлены результаты разработки и верификации моделей осаждения цезия (в форме элементарного цезия) и йода (в форме йодида натрия) в натриевом теплоносителе.

Анализ экспериментальных данных показал, что процесс осаждения цезия и йодида натрия в натриевом теплоносителе можно рассматривать как физическую адсорбцию. Тогда процесс осаждения в одномерном приближении рассматривается как совокупность диффузионного переноса примеси к поверхности стенки и сорбционных процессов на стенке.

Представлены результаты разработки и верификации модели осаждения йодида натрия. Для количественного описания осаждения используется простая модель адсорбции, в рамках которой скорость адсорбции является константой, скорость десорбции равна отношению скорости адсорбции к коэффициенту распределения. Проведено обоснование выбора корреляции для расчета коэффициента распределения, на основеанализа экспериментальных данных определено значение скорости адсорбции. Следует отметить, что разработанная модель ориентирована на описание процесса осаждения йодида натрия в интервале температур натриевого теплоносителя от 98 до 550 ^{o}C, при концентрациях йодида натрия, не превышающих предел насыщения.

С целью верификации разработанной модели был выполнен вычислительный эксперимент по исходным данным эксперимента на установке Toshiba FPL. Сравнительный анализ результатов расчета показал, что они с удовлетворительной точность совпадает с экспериментальными данными.

Анализ экспериментальных данных по осаждению цезия показал, что применение для описания его осаждения в натриевом теплоносителе модели, имеющий тот же вид, что и в случае йодида натрия, сопряжено со следующими затруднениями.

1. Основная проблема заключается в существенном расхождении между корреляциями для коэффициента распределения - оно может достигать двух порядков. В этих условиях процедура принятия решения при выборе одной из корреляций для обоснования безопасности проектируемых РУ представляется затруднительной задачей. Это не позволяет рассчитывать коэффициент десорбции как отношение скорости адсорбции к коэффициенту распределения.

2. Для адсорбции цезия в ходе экспериментальных исследований была выявлена особенность, не наблюдаемая в случае адсорбции йодида натрия.

Дж. Гуоном было установлено, что на способность стали сорбировать растворенный в натрии цезий оказывает влияние суммарное время нахождения стальной стенки в натрии и его температура. В результате длительного контакта (в зависимости от температуры, 1–100 часов) стальной поверхности с натриевым теплоносителем при одинаковых концентрациях цезия в натрии и одинаковых температурах происходит уменьшение значений коэффициента распределения для цезия («деактивация» поверхности- термин, предложенный Дж. Гуоном). Увеличение температуры натрия приводит к увеличению эффекта «деактивации». Данное явление наблюдалось и в ходе экспериментов М.Г. Купера, Г.Р.Тейлора и Ю.Г. Бобкова. Как показали исследования Дж. Гуона, явление деактивации является необратимым. В связи с этим, за основу модели осаждения цезия была взята модель адсорбции Ленгмюра. В рамках данной модели величина скорости адсорбции зависит от температуры, а также состояния поверхности (величины удельной поверхностной концентрации центров адсорбции). В разработанной модели используется предположение о том, что удельная концентрации центров адсорбции не является постоянной величиной. Именно ее уменьшение обуславливает явление «деактивации» сорбирующей поверхности. В ходе

диссертационной работы по известным экспериментальным данным были определены значения параметров данной модели - постоянных в соотношениях для коэффициентов адсорбции и десорбции, энергии активации, теплоты адсорбции, удельных поверхностных концентраций центров адсорбции на «активированной» и «деактивированной» поверхности. Полученная в результате модель ориентирована на описание процессов осаждения цезия в интервале температур натриевого теплоносителя от 98 до 600 ^{o}C.

С целью верификации разработанной модели был выполнен вычислительный эксперимент по исходным данным эксперимента на установке FPBL. Сравнительный анализ результатов расчета показал, что они с удовлетворительной точность совпадает с экспериментальными данными (рисунок 1).

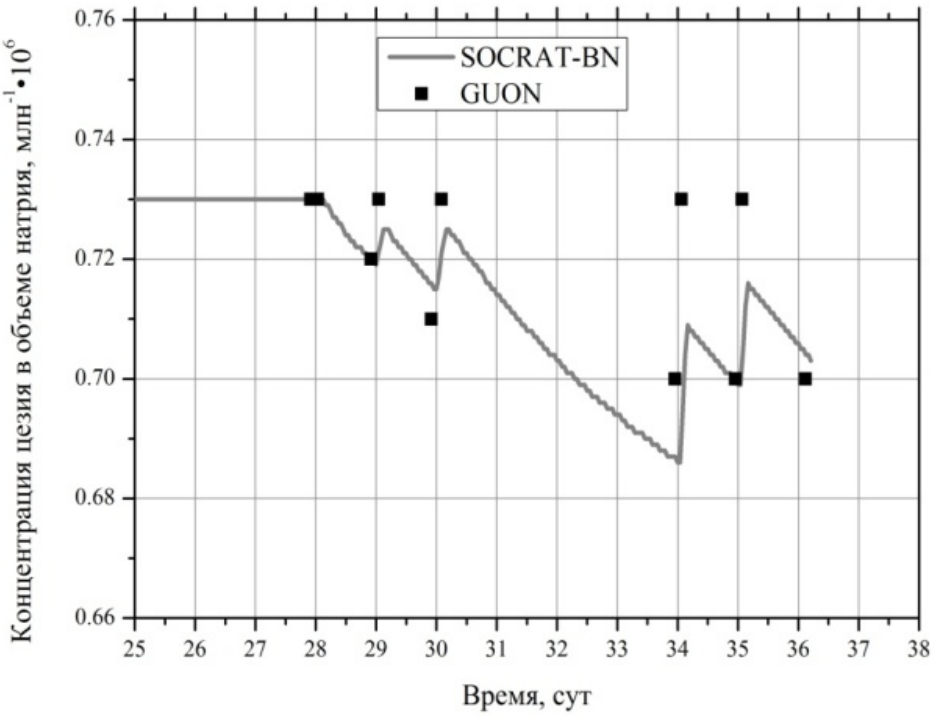

Рисунок 1. Временная зависимость средней объемной концентрации цезия в контуре FPBL (первый кинетический тест Дж. Гуона). Сплошная линия - результаты расчета, маркеры - результаты измерений.

Представлены результаты анализа данных по эмпирическим соотношениям для расчета коэффициента массопереноса через пограничный слой. В рамках разработанного метода моделирования переноса и поведения ПД вид соотношений для скорости диффузионного переноса зависит как от теплогидравлических параметров теплоносителя и геометрических параметров омываемых структур, так и от характера обтекания (поперечного или продольного). Сформирован набор корреляций для основных типов геометрических структур, характерных для первого контура РУ БН.

В третьей главе представлены результаты разработки и верификации моделей процессов межфазного массопереноса и поведения цезия и йода в газовой системе РУ БН. В первую очередь, на основе анализа имеющихся экспериментальных данных и ранее проведенных исследований обоснованы состав и общий вид математического описания процессов межфазного массопереноса ПД, переноса и поведения ПД в парогазовой среде. В рамках него выход ПД из натриевого теплоносителя в защитный газ рассматривается как совокупность процессов диффузионного переноса ПД к межфазной поверхности.

Для разработанного метода моделирования предложен подход к расчету объемных концентраций паров продуктов деления у стальных стенок и межфазной поверхности. Проведен анализсуществующих эмпирических корреляций для расчета равновесных значений объемных концентраций паров продуктов деления у стальных стенок и межфазной поверхности при заданной температуре. На его основевыбраны корреляции, дающие наилучшее совпадение с известными экспериментальными данными. Представлены результаты расчетов скоростей диффузионного переноса продуктов деления к межфазной поверхности, выполненные с помощью предложенного подхода.

Очевидно, что в рамках одномерного приближения для описания переноса ПД в направлениях, не совпадающих с направлением потока теплоносителя, необходимо использовать эмпирические корреляции для расчета эффективных

скоростей диффузионного переноса примеси. Вид корреляций зависит как от гидродинамических условий, так и от вида межфазной поверхности. В рамках разработки модели межфазного массопереноса ПД был определен вид корреляций для расчета диффузионного переноса ПД к межфазной поверхности для наиболее характерных условий, имеющих место в РУ БН как при нормальной эксплуатации, так и в ходе аварийных процессов. Полученные результаты могут использоватьсядля описания межфазного переноса на горизонтальной поверхности расплава натрия в газовой полости реактора, для случая горизонтально стратифицированного двухфазного течения теплоносителя в каналах газовой системы, для случая пузырькового режима течения натриевого теплоносителя.

Представлены результаты решения аналогичной задачи - разработки способарасчета скоростей диффузионного перенос ПД к поверхности конструкционных элементов. Он аналогичен применяемому для расчета скорости диффузионного перенос к межфазной поверхности. Скорость диффузионного переноса вычисляется по эмпирическим корреляциям, каждая из которых применяется при определенных геометрических и теплогидравлических условиях. Основываясь на анализе конструкции газовой системы и условий ее работы, для расчета интенсивности диффузионного массопереноса в ее элементах сформирован набор упрощенных моделей, для каждой из которых существует известная корреляция:

- круглая труба с ламинарным течением;
- канал сложной формы с ламинарным течением;
- естественная конвекция на вертикальной стенке;
- круглая труба с турбулентным течением;
- канал сложной формы с турбулентным течением.

Представлено описание разработанного подхода к решению задачи моделирования образования, переноса и поведения аэрозольных форм цезия и йодида натрия. В рамках разработанного метода моделирования переноса и

поведения ПД аэрозоли цезия и йодида натрия рассматриваются в однокомпонентном приближении. При этом для описания процессов их осаждения и коагуляции используются скорректированные модели из программного модуля ПРОФИТ кода СОКРАТ/В3.

Приведены результаты верификации разработанных моделей межфазного переноса и поведения ПД в защитном газе. В соответствии с заявленной областью применения разработанной модели (описание испарения цезия и йодида натрия из натриевого теплоносителя, переноса и поведение паров и аэрозолей в защитном газе) был сформулирован следующий список верификационных задач:

- осаждение паров цезия в охлаждаемой трубе в атмосфере аргона;
- испарение йодида натрия из натриевого теплоносителя в защитный газ в экспериментальной установке FRAT-1;
- образование и поведение аэрозолей в защитном газе над уровнем натрия (установка SILVERINA).

Для выполнения верификационных расчетов использовалась версия кода СОКРАТ-БН с внедренным в нее разработанным в рамках диссертационной работы методом моделирования переноса и поведения ПД. Этот код позволяетпроизводить расчет всех необходимых для решения задач массопереноса теплогидравлических параметров.

Сравнительный анализ результатов расчета показал, что они с удовлетворительной точность совпадает с экспериментальными данными (рисунок 2).

В четвертой главе представлено описание метода расчета переноса и поведения ПД в натриевом теплоносителе и защитном газе, описаны результаты его внедрения в современный интегральный код СОКРАТ-БН

Разработанный метод предназначен для согласованного моделирования переноса и осаждения ПД в натриевом теплоносителе, межфазного массопереноса ПД между жидким натрием и защитным газом, переноса, нуклеации и конденсации на стенках конструкционных элементов паров ПД, переноса,

осаждения и коагуляции аэрозольных форм ПД. В натриевом теплоносителе цезий и йод описываются как пассивная растворенная примесь, сорбируемая на стальных стенках.

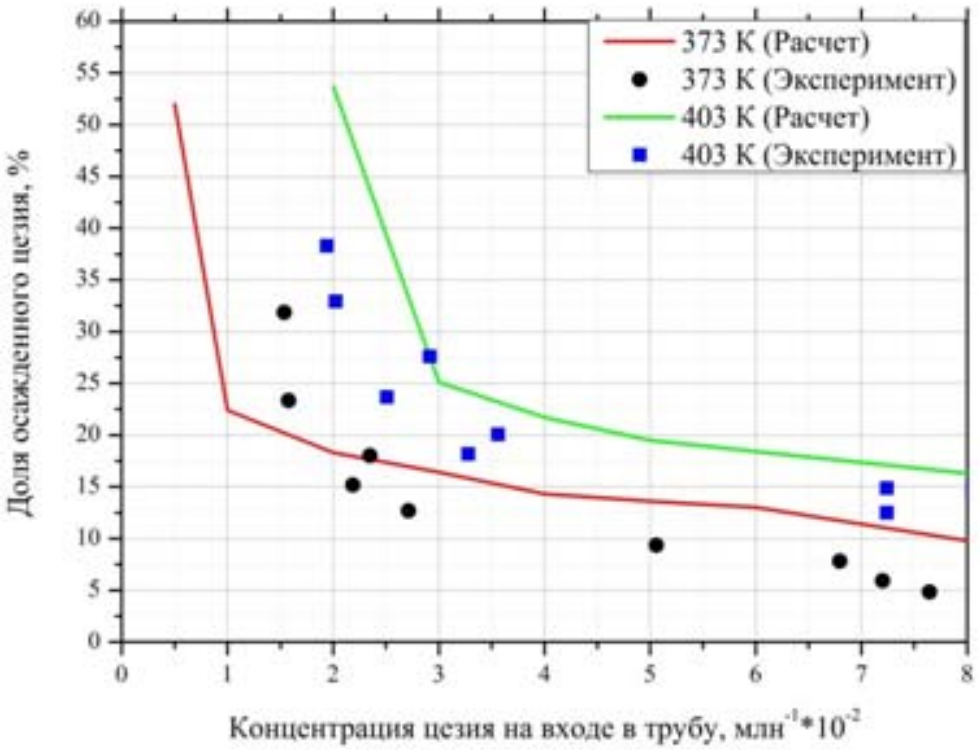

Рисунок 2 Зависимость доли осажденного в трубе цезия от концентрации паров цезия на входе в трубу. Сплошная линия - результаты расчета, маркеры - экспериментальные значения.

В качестве механизмов межфазного переноса ПД при этом рассматриваются испарение и конденсация паров ПД на межфазной поверхности, а также осаждение аэрозолей на поверхности натрия. Основу расчетного аппарата метода составляют следующие уравнения:

I. Одномерная система уравнений, описывающая перенос и поведение ПД в двухфазном натриевом теплоносителе РУ БН, включающая уравнение, описывающее изменение удельной объемной концентрации растворенных в натрии ПД:

$$\frac{\partial C_i^f}{\partial \tau} = \frac{1}{V_i^f}\left(\sum_{j=1}^{N_{in}} u_j^f \cdot C_j^f \cdot A_j^f - C_i^f \cdot \sum_{k=1}^{N_{out}} u_k^f \cdot A_k^f\right) + Q_{C,i}^f + \\ + \frac{S_{iph,i}^g}{V_i^f} \cdot \beta_{iph,i}^{eff} \cdot \left(\frac{\beta_{g,i}^{cond}}{\beta_{f,i}^{evap}} \cdot C_i^g - \frac{\rho_{Na,i}^g}{\rho_{Na,i}^f} \cdot C_i^f \cdot \alpha_i\right) + \\ + \frac{S_{dep,i}^f}{V_i^f} \cdot \left(-\frac{\beta_{D,i}^f \cdot k_{ads,i}^{eff}}{\beta_{D,i}^f + k_{ads,i}^{eff}} \cdot C_i^f + \frac{\beta_{D,i}^f \cdot k_{des,i}^{eff}}{\beta_{D,i}^f + k_{ads,i}^{eff}} \cdot C_{p,i}^f\right) \quad (1)$$

II. Уравнение, описывающее перенос и поведение паров ПД:

$$\frac{\partial C_i^g}{\partial \tau} = \frac{1}{V_i^g}\left(\sum_{j=1}^{N_{in}} u_j^g \cdot C_j^g \cdot A_j^g - C_i^g \cdot \sum_{k=1}^{N_{out}} u_k^g \cdot A_k^g\right) + Q_{C,i}^g - Q_{nucl,i}^g - \\ - Q_{cond,i}^g - \frac{S_{dep,i}^g}{V_i^g} \cdot \beta_{D,i}^{eff,g} \cdot \left(C_i^g - \frac{\beta_{f,i}^{evap}}{\beta_{g,i}^{cond}} \cdot C_{S,i}^{\max,g}\right) - \\ - \frac{S_{iph,i}^g}{V_i^f} \cdot \beta_{iph,i}^{eff} \cdot \left(\frac{\beta_{g,i}^{cond}}{\beta_{f,i}^{evap}} \cdot C_i^g - \frac{\rho_{Na,i}^g}{\rho_{Na,i}^f} \cdot C_i^f \cdot \alpha_i\right) \quad (2)$$

III. Уравнение, описывающее изменение удельной поверхностной концентрации ПД на поверхности конструкционных элементов в натрии

$$\frac{\partial C_{p,i}^f}{\partial \tau} = \frac{\beta_{D,i}^f \cdot k_{ads,i}^{eff}}{\beta_{D,i}^f + k_{ads,i}^{eff}} \cdot C_i^f - \frac{\beta_{D,i}^f \cdot k_{des,i}^{eff}}{\beta_{D,i}^f + k_{ads,i}^{eff}} \cdot C_{p,i}^f, \quad (3)$$

IV. Уравнение, описывающее изменение удельной поверхностной концентрации ПД на поверхности конструкционных элементов газовой системы

$$\frac{\partial C_{p,i}^g}{\partial \tau} = \beta_{D,i}^{eff,g} \cdot \left(C_i^g - \frac{\beta_{f,i}^{evap}}{\beta_{g,i}^{cond}} \cdot C_{S,i}^{\max,g}\right) + B_i^{aer} \cdot \sum_l \beta_{D,i}^l \cdot X_i^l \cdot \Delta\nu_l \cdot \nu_l \cdot \rho_{aer}, \quad (4)$$

V. Уравнения, описывающее перенос и поведение размерных групп аэрозолей:

$$\frac{\partial X_i^l}{\partial \tau} = \frac{1}{V_i^g}\left(\sum_{j=1}^{N_{in}} u_j^g \cdot X_j^l \cdot A_j^g - X_i^l \cdot \sum_{k=1}^{N_{out}} u_k^g \cdot A_k^g\right) - G_{nucl,i}^l -$$

$$- \frac{S_{dep,i}^g}{V_i^g} \cdot \beta_{D,i}^l \cdot X_i^l + G_{coag,i}^l \quad , \qquad (5)$$

Алгоритм численного решения системы уравнений (1)-(5) был построен с учетом метода разделения задачи по физическим процессам. К особенностям алгоритма относятся:

- раздельное численное решение задачи переноса примеси между ячейками и задачи расчета массообменных процессов в каждой из ячеек,

- использование в качестве начальных условий при расчете массообменных процессов для каждой ячейки результатов решения задачи переноса на каждом временном шаге.

Алгоритм внедрен в программный модуль TRANS_FP кода СОКРАТ-БН/В2. Функционирование TRANS_FP в составе СОКРАТ-БН/В2 решает задачу определения значений теплогидравлических параметров и величин источников ПД, необходимых для решения задачи массопереноса, в пространственных ячейках. Значения теплогидравлических параметров в TRANS_FP передаются из модуля канальной теплогидравлики РАТЕГ-БН. Расчет интенсивности поступления ПД в теплоноситель первого контура осуществляется посредством согласованной работы модулей:

- БОНУС-БН, предназначенного для расчета эволюции нуклидного состава топлива и активности продуктов деления в топливе с учетом цепочек распада на работающем и заглушенном реакторе,
- РЕЛИЗ-БН, предназначенного для моделирования миграции ПД внутри топливной таблетки и с выхода ПД из топлива в нестационарных аварийных режимах,
- ТВЭЛ-БН, предназначенного для решения термомеханической задачи и расчета моментов разгерметизации оболочек твэлов.

В четвертой главе представлены результаты методического расчета с

помощью кода СОКРАТ-БН с модулем TRANS_FP, в рамках которого проводится моделирование аварии на РУ БН-1200, вызванной непредусмотренным последовательным извлечением регулирующих стержней из активной зоны вследствие отработки ложного сигнала с отказом активных систем остановки реактора, представленные в третьем разделе четвертой главы.

Исходным событием аварии в рамках методического расчета является ввод положительной реактивности, что приводит к повышению мощности реактора до 2.2 раз по сравнению с мощность реактора при НЭ. Это приводит к повышению температуры теплоносителя на выходе из а.з. Через 120 секунд после начала аварии температура теплоносителя на выходе из а.з. достигает значения 700 ^{o}C, при этом происходит срабатывание ПАЗ-Т. В результате происходит ввод отрицательной реактивности, после чего реактор переходит в подкритическое состояние.

Аварийный разогрев топлива вызвал его дополнительное тепловое расширение, приводящее к разрушению оболочек части твэлов с последующим выходом ПД в теплоноситель первого контура (начиная с 10-ой секунды аварийного процесса). В результате этого произошло увеличение активности изотопов цезия и йода в технологических средах РУ – в натриевом теплоносителе, в отложениях на стенках конструкционного оборудования первого контура, в защитном газе (рисунки 4, 5).

Результаты расчета продемонстрировали практически полное удержание изотопов цезия и йода теплоносителем первого контура. Подобный результат качественно совпадает с данными, наблюдавшимися в ходе аварийного процесса на американском реакторе SRE.

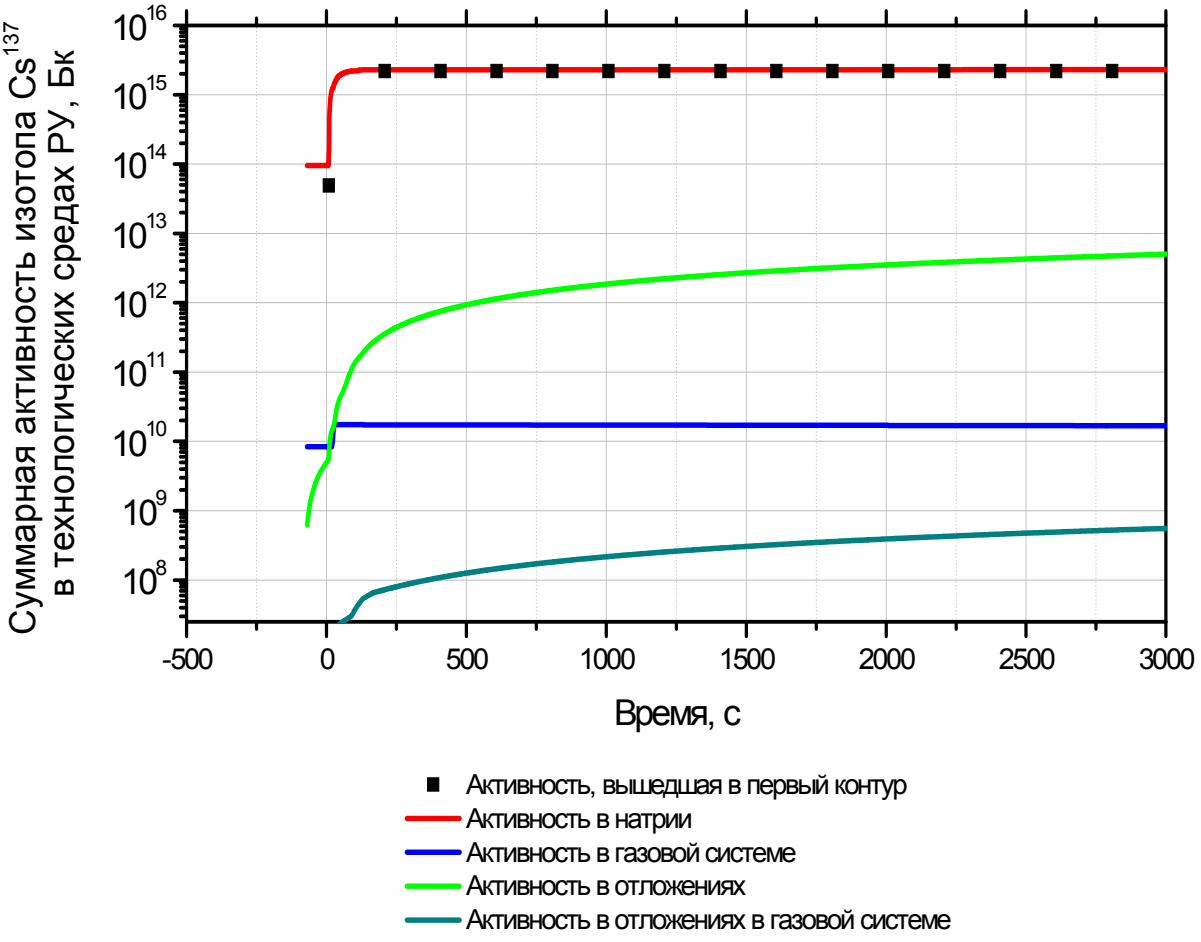

Рисунок 4. Временная зависимость суммарной активности изотопа ^{137}Cs в технологических средах РУ

В случае же применения старых консервативных методов оценки выхода ПД из первого контура (не учитывающих задержку ПД в теплоносителе первого контура) суммарный выход ПД в реакторные помещения и окружающую среду был бы необоснованно завышен на несколько порядков.

Итоги методического расчета подтверждают практическую значимость полученных в диссертационной работе результатов.

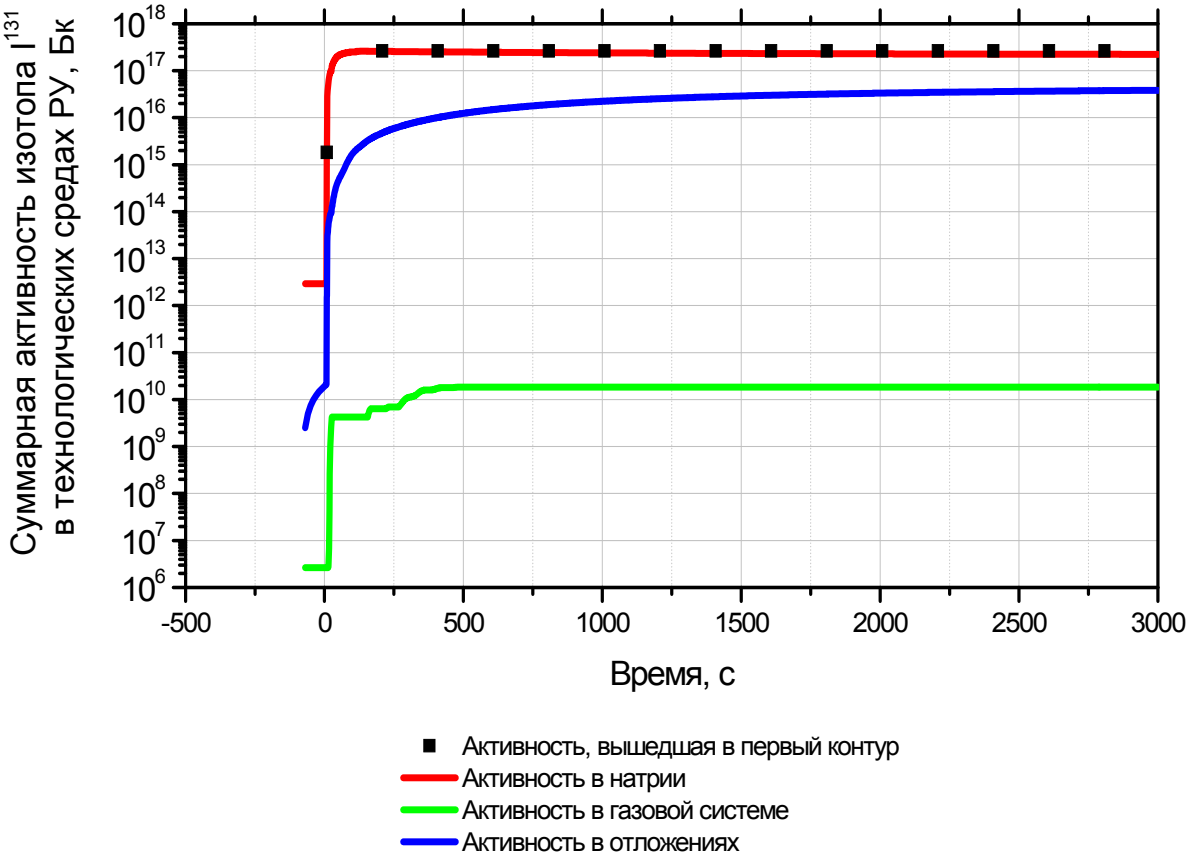

Рисунок 5 Временная зависимость суммарной активности изотопа ^{131}I в технологических средах РУ

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.

1. Разработана одномерная нестационарная модель, описывающая перенос и поведение растворенного в натрии цезия и йодида натрия, их паров и аэрозолей в защитном газе.

2. Разработана модель осаждения и повторного смыва растворенных в натрии цезия и йодида натрия на стенки конструктивных элементов первого контура реакторных установок БН. Рассчитаны значения параметров модели.

3. Разработана модель нестационарного межфазного массопереноса цезия и йодида натрия (в системе «жидкий натрий – парогазовая среда») как во время НЭ, так и в ходе нарушения НЭ, во время аварийных процессов. В рамках этого предложен подход к расчету величин, входящих в уравнения:

- объемных концентраций паров ЛПД у стальных стенок и межфазной поверхности,

- скорости диффузионного переноса а) ЛПД к межфазной поверхности в жидком натрии, б) паров ЛПД к межфазной поверхности в парогазовой среде,

- скорости диффузионного переноса ЛПД к поверхности конструкционных элементов.

4. Проведена коррекция моделей образования, переноса и поведения аэрозольных форм ЛПД в газовой системе реакторных установок БН.

5. Проведена верификация разработанных моделей на результатах петлевых и капсульных экспериментов. В результате верификационных расчетов установлено, что максимальное отклонение результатов расчета от экспериментальных значений для моделей осаждения ПД в натрии не превышает 100 %, среднее – 34, среднеквадратичное – 32 %. Для моделей переноса и поведения ПД в парогазовой среде максимальное отклонение результатов расчета от экспериментальных значений не превышает 115 %, среднее – 37 %, среднеквадратичное – 30 %.

6. На основе разработанных моделей создан метод расчета переноса и поведения цезия и йода в натриевом теплоносителе и в газовой системе РУ.

7. Сформированы конечно-разностные аналоги разработанных одномерных моделей, создан алгоритм его решения в интегральном коде СОКРАТ-БН. Проведена программная реализация разработанного алгоритма в программном модуле TRANS_FP данного интегрального кода.

8. В рамках моделирования радиационных последствий запроектных аварий на РУ БН-1200 продемонстрировано, что внедрение разработанного метода в интегральный код СОКРАТ-БН позволило снизить консерватизм в оценке выхода радионуклидов в реакторные помещения и окружающую в результате аварии. Это подтверждает практическую значимость полученных в диссертационной работе результатов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК

1. Корсун А.С., Харитонов В.С., Филиппов М.Ф. Анализ подходов к моделированию процессов формирования радиоактивных отложений на стенках контуров быстрых натриевых реакторов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2013. № 4. С. 64–68.

2. Корсун А.С., Семенов В.Н., Цаун С.В. Численное моделирование осаждения цезия в натриевых контурах с помощью кода СОКРАТ-БН // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2015. № 4. С.58–68.

3. Зайцев А.А., Казанцев А.А., Лукьянов А.А. и др. Тестирование интегрированного программного средства по моделированию гипотетических аварий на РУ БН // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2015. № 2. С. 60–70.

Другие издания

1. Zajtsev A.A., Kazantsev A.A., Luk'yanov A.A. and oth. Testing of the system code designed for simulation of hypothetical beyond design-basis accident on fast breeder reactor // Nuclear Energy and Technology. 2015. Vol. 1. Issue 3. PP. 165–169.

2. Семенов В.Н., Филиппов М.Ф., Цаун С.В. Разработка и внедрение модуля TRANS_FP, предназначенного для моделирования процессов переноса и поведения примесей в контурах реакторов типа БН. В кн.: Сборник трудов XIV научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. Препринт ИБРАЭ № IBRAE–2013–03, Москва, 2013.

3. Семенов В.Н., Филиппов М.Ф., Цаун С.В. Разработка модели переноса и поведения цезия в натриевом теплоносителе. В кн.: Сборник трудов XV научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2014-02, Москва, 2014.

4. Корсун А.С., Филиппов М.Ф. Разработка модели переноса и поведения цезия в натриевом теплоносителе. В кн.: Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотации

докладов. Том 1. Фундаментальные исследования и физика частиц. Ядерные технологии. Проблемы физического материаловедения. Композиты. Ядерная медицина. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. С. 26.

5. Семенов В.Н., Филиппов М.Ф., Цаун С.В. Моделирование переноса и поведения радиоактивных продуктов деления с помощью кода СОКРАТ-БН. В кн.: Инновации в атомной энергетике. Сборник тезисов докладов конференции молодых специалистов. М.: Изд-ва АО "НИКИЭТ", 2015. С. 37.