

На правах рукописи



Шмельков Юрий Борисович

**РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ И КОМПЛЕКСА  
ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ АНАЛИЗА  
РАДИАЦИОННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ  
АВАРИЯХ НА АЭС С ВВЭР**

Специальность 2.4.9. – Ядерные энергетические установки,  
топливный цикл, радиационная безопасность

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

**МОСКВА – 2024**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

**Официальные оппоненты:**

**Чусов Игорь Александрович**, доктор технических наук, профессор, ведущий эксперт АО «ОКБ Гидропресс», г. Подольск;

**Деревич Игорь Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики МГТУ имени Н.Э. Баумана, г. Москва;

**Морозов Андрей Владимирович**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования НИУ «МЭИ», г. Москва.

Защита диссертации состоится 15 октября 2024 г., начало в 14 часов, на заседании диссертационного совета 02.1.003.04 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте [www.ngsk.i.ru](http://www.ngsk.i.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 02.1.003.04, к.ф.-м.н.



Шкаровский Д.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Обеспечение безопасности работников атомных электростанций (АЭС) и населения является одной из наиболее важных задач при проектировании АЭС. При этом, радиационная безопасность АЭС – один из ключевых факторов, определяющих безопасность АЭС в целом. Радиационная безопасность АЭС определяется критериями, задаваемыми в зависимости от величины дозовой нагрузки на население и персонал АЭС. Дозовая нагрузка в значительной мере определяется величиной выброса радиоактивных веществ, возникающего при аварии на АЭС. В соответствии с международными рекомендациями моделирование процессов, протекающих при нарушении нормальной эксплуатации (ННЭ) и в ходе проектных аварий (ПА), должно проводиться в консервативном приближении, а моделирование процессов при запроектных авариях (ЗПА), в том числе при запроектных авариях с плавлением топлива (тяжелых авариях (ТА)), необходимо выполнять в реалистичном приближении, что накладывает дополнительные требования на модели, программные средства и экспериментальные данные, используемые при валидации. Также необходимо отметить, что авария на АЭС является сложным, комплексным процессом, включающим в себя множество разноуровневых физико-химических явлений и взаимодействий. В особенности это справедливо по отношению к ТА, при которых могут одновременно протекать процессы, связанные с диффузией газов через топливную матрицу, плавлением топлива, переносом и химическим взаимодействием аэрозолей и паров радиоактивных продуктов деления (ПД) в первом контуре реакторной установки (РУ) и защитной оболочке (ЗО), переносом радиоактивных ПД в окружающей среде. В связи с этим описание радиационных последствий для всего комплекса аварий с помощью одной модели и одного программного средства представляется крайне сложной, практически нерешаемой задачей. Более рациональным подходом является разработка набора моделей для каждого из ключевых явлений и реализация их в виде комплекса программ для ЭВМ, каждая из программ которого будет решать определенную задачу, возникающую при обосновании радиационной безопасности АЭС.

Основными проблемами при обосновании радиационной безопасности АЭС при запроектных авариях являются:

1. Моделирование выхода ПД из топлива, в том числе при его плавлении, если авария перешла в тяжелую стадию. При реалистическом подходе

к моделированию радиационных последствий аварии важно учитывать возможные отличия в поведении продуктов деления при нагреве и плавлении разных типов топлива (на основе диоксида урана, смешанное на основе оксидов урана и плутония (МОХ топливо) и др.) в ходе ТА. Также важно учитывать состав среды, в которой протекает авария. При аварии в реакторе в большинстве случаев среда будет состоять из смеси водяного пара и водорода, в то время как для аварии с течью облицовки бассейна выдержки (БВ) основным компонентом будет воздух, что повлияет на окислительные свойства среды;

2. Моделирование выхода ПД из расплава при его удержании в корпусе реактора или в устройстве локализации аварии (УЛР) или при его взаимодействии с бетоном шахты реактора или бассейна выдержки. При этом, топливо поступает на днище корпуса реактора или бассейна выдержки не только в расплавленном состоянии, но и в виде обломков ТВЭЛОВ, формируя таким образом структуру типа «дебрис». Моделирование выхода ПД из такой структуры также является важной задачей, влияющей на величину источника радиоактивных ПД в окружающую среду;
3. Моделирование переноса и осаждения ПД в первом контуре. Поскольку, как упоминалось выше, ННЭ и ПА должны моделироваться в консервативном приближении, при обосновании радиационной безопасности АЭС обычно принимается, что ПД в первом контуре не задерживаются и моментально поступают в ЗО. Однако, данная ситуация меняется при моделировании ЗПА, и особенно ТА, когда необходимо учитывать возможное осаждение аэрозолей и конденсацию паров ПД на поверхностях первого контура. Осевшие на стенки контура продукты деления выделяют тепло, которое может повлиять на прочность отдельных его участков, например трубочки парогенератора. В связи с этим необходимо знать активность осевших в контуре продуктов деления. Также реалистическое моделирование процессов переноса ПД в первом контуре важно при анализе радиационной безопасности при аварии типа «течь из первого контура во второй», поскольку в этом случае имеет место байпас контейнента, и возможен большой выброс;
4. Моделирование переноса ПД в ЗО. Для корректного моделирования данной проблемы ключевыми являются следующие процессы:

перенос ПД между помещениями ЗО, осаждение ПД на поверхностях ЗО, выведение ПД за счет работы спринклерной системы, химическое взаимодействие ряда ПД с компонентами атмосферы и поверхностей ЗО, рост и изменение свойств аэрозолей, содержащих ПД;

5. Моделирование переноса ПД в окружающей среде и оценка величины дозовой нагрузки на население и персонал АЭС. Попавшие в окружающую среду ПД переносятся с потоками атмосферы, осаждаясь на поверхность земли и застройку.

Существуют программные средства, позволяющие моделировать поведение продуктов деления в условиях тяжелых аварий. Однако они имеют ряд недостатков и ограничений (например, в части моделирования УЛР тигельного типа), неаттестованы и, как следствие, не могут быть использованы при обосновании безопасности АЭС с ВВЭР. Кроме того, ряд ограничений имеют и существующие модели, описывающие поведение ПД в условиях ЗПА, включая ЗПА с плавлением топлива. Модели выхода ПД из топлива при ТА не применимы для МОХ топлива и для выхода ПД в воздушной среде, что может быть актуально для аварии в бассейне выдержки. Модели выхода ПД из расплава не описывают процесс комплексно, начиная от поступления дебриса на днище корпуса реактора и заканчивая удержанием расплава в УЛР или взаимодействием расплава с бетоном. Отсутствует модель выхода ПД из структуры типа «дебрис», имеющей место на днище корпуса реактора после обрушения топлива. Для корректного описания поведения продуктов деления в защитной оболочке важно учитывать взаимное влияние изменения параметров среды в ЗО за счет остаточного тепловыделения ПД и скорости выведения ПД из атмосферы ЗО. Для этого необходимо обладать информацией об активности продуктов деления в атмосфере, на поверхностях и в водной среде защитной оболочки и обеспечить взаимосвязанный расчет с помощью кода, описывающего теплогидравлические параметры ЗО, и кода, описывающего поведение ПД в ЗО. Ранее такая задача решена не была. На величину активности ПД в атмосфере и водной среде ЗО может существенно влиять работа спринклерной системы, связывающей аэрозоли и соединения йода каплями водного раствора. При этом, модели выведения аэрозолей и соединений йода из атмосферы защитной оболочки в условиях работающей спринклерной системы консервативны и не учитывают вклад отдельных физических процессов в эффективность выведения. Таким образом разработка моделей и их реализация в виде программного комплекса, обеспечивающего

взаимосвязанный расчет процессов, связанных с поведением продуктов деления в условиях ЗПА с плавлением топлива, является важной и необходимой, с практической точки зрения, задачей.

**Целью работы** являлась разработка моделей поведения продуктов деления в условиях запроектных аварий на АЭС с ВВЭР, включая тяжелые аварии, реализация данных моделей в виде комплекса программных средств, валидация и аттестация разработанных программных средств. В рамках данной цели решались следующие задачи:

- Разработка моделей для расчета выхода ПД из топлива в условиях тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР;
- Разработка моделей для расчета выхода ПД из расплава в корпусе реактора, включая структуру типа «дебрис», и из УЛР;
- Разработка моделей для расчета выхода ПД при взаимодействии расплава с бетоном;
- Разработка моделей для описания поведения паров и частиц ПД при их переносе в первом контуре в условиях тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР;
- Разработка моделей поведения продуктов деления в защитной оболочке в условиях ЗПА без плавления и ТА на АЭС с ВВЭР, в том числе в условиях работающей спринклерной системы;
- Реализация моделей в виде комплекса программных средств, обеспечивающего взаимосвязанный расчет процессов, связанных с поведением продуктов деления в условиях ЗПА с плавлением топлива. Валидация моделей и программных средств на имеющихся данных. Аттестация программных средств.

**Научная новизна.** Впервые разработан и практически реализован комплексный подход к описанию поведения радиоактивных продуктов деления в условиях запроектных аварий, включая аварии с плавлением топлива. Этот подход позволил обеспечить реалистическое моделирование поведения продуктов деления с использованием физических моделей, соответствующих современному уровню знания. В частности:

Разработаны модели выхода ПД из топлива, учитывающие не только влияние температуры топлива, но и особенности поведения различных групп элементов продуктов деления в зависимости от окислительно-восстановительных свойств теплоносителя в зазоре. Выполнена валидация моделей на большинстве существующих экспериментов по выходу ПД из

топлива. Впервые получена и валидирована модель выхода ПД из МОХ топлива. Впервые получена и валидирована модель выхода ПД из топлива в воздушной среде.

Впервые разработаны модели, позволяющие комплексно решать задачу выхода ПД из структуры типа «дебрис» и из расплава при испарении продуктов деления с поверхности расплава на днище корпуса реактора, при перемещении ПД из корпуса реактора в УЛР, при удержании расплава в УЛР и при взаимодействии расплава с бетоном. Все модели валидированы на существующих экспериментах по выходу ПД из расплава, включая эксперименты по взаимодействию расплава с прототипным для ВВЭР серпентинитовым/силикатным бетоном.

Разработаны модели, описывающие поведение ПД в первом контуре РУ и в защитной оболочке. Выполнена валидация моделей на существующих экспериментальных данных. Улучшена и валидирована модель, описывающая поведение аэрозолей продуктов деления в полидисперсном приближении. Улучшена и валидирована модель улавливания аэрозолей и соединений йода каплями спринклерной системы.

Разработанные модели реализованы в виде программного комплекса, позволяющего выполнять сквозной, взаимосвязанный расчет процессов, влияющих на поведение продуктов деления в условиях запроектной аварии на АЭС с ВВЭР. Выполнена валидация программного комплекса на большом количестве экспериментальных данных. Все программные средства, входящие в комплекс, снабжены модулем анализа неопределенности и чувствительности к неопределенности исходных данных. Основные входящие в комплекс программные средства аттестованы в Ростехнадзоре.

**Практическая и теоретическая значимость работы.** Результаты настоящей работы применяются при обосновании радиационной безопасности практически всех действующих и проектируемых АЭС с ВВЭР как в России, так и за рубежом. Программное средство МАВР-ТА применялось для анализа поведения ПД в расчетах по обоснованию безопасности более 30 блоков 12 АЭС с ВВЭР, сооружаемых в России и за рубежом, в частности:

- При обосновании безопасности АЭС Руппур, АЭС Куданкулам, Нововоронежской АЭС-2, Белорусской АЭС, Балаковской АЭС, Курской АЭС-2, АЭС Аккую;
- В расчетах по обоснованию УЛР Курской АЭС-2, УЛР АЭС Руппур;

- При расчетном обосновании руководств по управлению тяжелой запроектной аварией (РУЗА(Т)) Ленинградской АЭС-2, Нововоронежской АЭС-2, Белорусской АЭС, Калининской АЭС, Ростовской АЭС, Балаковской АЭС, АЭС Аккую, Курской АЭС-2, АЭС Руппур;
- При подготовке исходных данных для вероятностного анализа безопасности второго уровня (ВАБ-2) АЭС Ханхикиви-1, АЭС Пакш-2, Нововоронежской АЭС-2.

Теоретическую значимость имеют разработанные модели и методики расчета выхода ПД из топлива, расплава, переноса ПД в первом контуре и защитной оболочке.

**Автор выносит на защиту:**

- Модели расчета величины выхода продуктов деления из топлива, дебриса и расплава топлива в условиях тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР;
- Модель переноса и осаждения продуктов деления в первом контуре в условиях тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР;
- Модель переноса и осаждения продуктов деления в защитной оболочке в условиях проектных, запроектных аварий без плавления топлива и тяжелых аварий на АЭС с ВВЭР, в том числе в условиях работающей спринклерной системы;
- Аттестованную программу для ЭВМ МАВР-ТА (Аттестационный паспорт программного средства № 535 от 5 ноября 2021 г.), позволяющую моделировать выход продуктов деления из топлива и расплава, перенос продуктов деления в первом контуре и защитной оболочке и выброс продуктов деления в окружающую среду для условий тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР;
- Аттестованную программу для ЭВМ ИРКА (Аттестационный паспорт программного средства № 572 от 5 декабря 2022 г.), позволяющую моделировать перенос продуктов деления в защитной оболочке и выброс продуктов деления в окружающую среду для условий запроектной аварии без плавления топлива на АЭС с ВВЭР;
- Программу для ЭВМ МАП-ТА (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614004 от 19 февраля 2024), позволяющую моделировать процесс переноса продуктов деления в окружающей среде с оценкой дозовой нагрузки на население;



- Результаты валидации моделей и программных средств на большом количестве экспериментальных данных, как по отдельным явлениям, так и полученных из интегрального эксперимента.

#### **Личный вклад автора.**

В диссертации представлены теоретические и практические результаты, полученные лично соискателем или в соавторстве под его непосредственным руководством, в том числе разработка всех описанных в диссертации моделей для выхода ПД из топлива, включая МОХ топливо, в условиях тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР; моделей для выхода ПД из расплава в корпусе реактора и в УЛР; моделей для выхода ПД при взаимодействии расплава с бетоном; моделей для описания поведения ПД при их переносе в первом контуре в условиях тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР; моделей для описания поведения продуктов деления в защитной оболочке в условиях ЗПА без плавления и ЗПА с плавлением топлива на АЭС с ВВЭР; создание, валидация и аттестация программных средств; проведение расчетных исследований.

**Достоверность результатов и их апробация.** Достоверность используемых в работе методов подтверждается результатами валидации полученных моделей и программных средств на аналитических тестах и экспериментальных данных. Все полученные в ходе валидации результаты сопровождаются анализом чувствительности и неопределенности. Коды МАВР-ТА и ИРКА аттестованы в Ростехнадзоре. Основные положения и результаты работы были представлены на следующих конференциях и семинарах:

- Конференции молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике», НИКИЭТ, Москва: 2014, 2015, 2023 годы;
- 9-я и 10-я международные научно-технические конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ Гидропресс, Подольск: 2017, 2019 годы;
- XI Российская научно-техническая конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», ИБРАЭ РАН, г. Москва: 2021 год;
- Международная конференция по тематическим вопросам ядерной безопасности «Повышение безопасности эволюционных и инновационных конструкций реакторов», МАГАТЭ, Вена, 2022 год;
- Международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам, ОКБ Гидропресс, Подольск: 2023 год;

- Всероссийская научная конференция «XIII семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике», НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, 2023;
- XVI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров», ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, 2023;
- Научно-техническая конференция «Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика – 2024)», ГНЦ-РФ ФЭИ, 16–19 апреля 2024 года, г. Обнинск, Россия.

**Публикации.** Основные результаты проделанной автором работы представлены в 11 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК. По результатам работы получено 10 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ. Кроме того, ряд результатов отражен в материалах конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка использованных обозначений, списка литературы. Объем работы составляет 257 страниц. Список литературы содержит 207 наименований. Диссертация содержит 151 рисунок и 82 таблицы.

**В первой главе** диссертации приводится анализ современного состояния науки в области моделирования поведения ПД в условиях ЗПА, включая ЗПА с плавлением топлива. В первой части обзора приводится хронология трех реальных аварий с плавлением топлива: аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США, 1979 год), аварии на Чернобыльской АЭС (СССР, 1986 год), аварии на АЭС «Фукусима-Дайити» (Япония, 2011 год). Далее описана феноменология процессов, имеющих место при ЗПА, включая ЗПА с плавлением топлива. Особое внимание уделяется феноменологии процессов, связанных с выходом и переносом радиоактивных продуктов деления, как имеющих наибольшее значение с точки зрения радиационных последствий аварии.

Вторая часть обзора посвящена программным средствам, предназначенным для моделирования поведения продуктов деления в условиях ЗПА или имеющим в своем составе модели, описывающие поведение ПД при ЗПА. Рассмотрены как отечественные (СОКРАТ-В1/В2, СОКРАТ/В3, RELWWER, LEAK, ДОЗА-М, НОСТРАДАМУС, SULTAN), так и зарубежные (ASTEC, МААР5, АС2, RELAP/SCDAPSIM, MELCOR) программные средства. Указаны их возможности и ограничения.

**Во второй главе** диссертации приводится описание моделей, описывающих выход ПД из топлива, включая МОХ топливо, в условиях

тяжелой аварии. Указаны приближения, использовавшиеся при создании модели. Приведены результаты валидации модели на экспериментах VI, VERCORS, MCE, VEGA, VERDON, ФЭИ.

При моделировании выхода ПД в ходе тяжелой аварии выделяется четыре семейства ПД:

- Радиоактивные благородные газы (Xe и Kr);
- Летучие элементы и их соединения (Cs, I, Te и Sb);
- Элементы пониженной летучести (Ba, Sr, Ru, Mo, Ce, Eu, La);
- Нелетучие элементы (Nb, Zr, Nd, Pm, Pr, Y, Tc, Np, U, Rh, Cm).

Также отдельно рассматриваются элементы конструкционных материалов: Fe, Ni, Cr, Ag, In, Cd.

Для описания выхода радиоактивных благородных газов и летучих ПД в коде МАВР-ГА используются преобразованные выражения корреляции Booth:

$$F_i = 6 \sqrt{\frac{\tau_i}{\pi}} - 3\tau_i, \text{ при } \tau_i < \frac{1}{\pi^2}$$

$$F_i = 1 - \frac{6}{\pi^2} \exp(-\pi^2 \tau_i), \text{ при } \tau_i > \frac{1}{\pi^2}$$

$$\tau_i = \sum_{j=0}^i D'_i(\Delta t_j) \Delta t_j,$$

где

$F_i$  – доля выхода элемента  $i$ ;

$\tau_i$  – безразмерный комплекс;

$D'_i(t) = D_i/a^2, 1/c$ ;

$D_i$  – коэффициент диффузии компонента  $i$  в топливной матрице,  $m^2/c$ ;

$a$  – радиус эквивалентной сферы для зерна топлива, м;

$\Delta t$  – шаг по времени, с.

В представленной в работе модели коэффициент диффузии раскладывается на сумму коэффициентов внутренней диффузии  $D_i^{in}(T)$  и коэффициента диффузии вакансий  $D_i^{vac}(x, T)$ . Влияние вида топлива учитывается через выражение для коэффициента внутренней диффузии, а также, при наличии экспериментальных данных, через изменение параметров скорости возникновения вакансий и концентрации вакансий в кристаллической решетке.

При описании выхода ПД пониженной летучести и нелетучих элементов ПД из топлива при высоких температурах считается, что основным процессом, определяющим выход, является их испарение с поверхности топлива в

основной объем газа. Выход  $i$ -го элемента ПД с поверхности топлива или расплава может быть описан при помощи уравнения:

$$\frac{dm_i}{dt} = \beta_i S M_i (\rho_i^S - \rho_i^\infty),$$

где

$\rho_i^S$  – мольная плотность компонента  $i$  в газе на поверхности конденсированной фазы, моль/м<sup>3</sup>;

$\rho_i^\infty$  – мольная плотность компонента  $i$  в объеме газа на большом расстоянии от твэла, моль/м<sup>3</sup>;

$\beta_i$  – коэффициент переноса массы компонента  $i$ , м/с;

$M_i$  – молярная масса элемента  $i$ , кг/моль;

$S$  – площадь поверхности, с которой возможен выход ПД, м<sup>2</sup>;

$m_i$  – масса вышедшего из топлива  $i$ -го элемента ПД, кг.

После проведения ряда преобразований получается итоговое уравнение модели, описывающее испарение компонента  $i$  с поверхности топлива:

$$\frac{1}{m_i} \frac{dm_i}{dt} = \gamma_i A_i \frac{D_i}{RT} F_i(p_{O_2}, T(t)),$$

где

$$A_i = Sh_i \cdot 101325 \frac{s}{2r(m_{UO_2}/M_{UO_2})}$$

$D_i$  – коэффициент диффузии компонента  $i$  в газовой среде, м<sup>2</sup>/с;

$m_i$  – масса компонента  $i$ , кг;

$r$  – радиус топлива, м;

$\gamma_i$  – коэффициент активности компонента  $i$ , значение которого уточняется в ходе валидационных расчетов;

$Sh_i$  – число Шервуда;

$F_i(p_{O_2}, T(t))$  – функция, определяющая химическую форму выходящего элемента, атм.

Уравнение решается явным методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности с автоматическим выбором шага. Равновесное давление кислорода на поверхности вблизи поверхности топлива  $p_{O_2}$  определяется окислительными свойствами несущей среды и во многом зависит от ее состава. В работе представлены модели определения равновесного давления кислорода для чистого водяного пара, смеси водяной пар-водород и смеси водяного пара и водорода с воздухом.

Для валидации моделей выхода ПД из топлива рассматривался широкий

набор доступных экспериментов. Далее приводятся основные результаты валидации моделей выхода ПД из топлива на экспериментальных данных, включая эксперименты с MOX топливом.

Исследованию выхода ПД из  $UO_2$  топлива посвящено значительное количество экспериментальных программ. В их числе серии экспериментов VI, VERCORS, MCE. Целью экспериментов серии VI (ORNL) было получение данных по кинетике выхода и интегральному выходу продуктов деления в условиях тяжелой аварии на легководном реакторе (LWR) в диапазоне температур от 2000 К до 2700 К. Более детально, в сравнении с экспериментами серии VI, выход радионуклидов в высокотемпературных условиях исследовался в сериях экспериментов VR, HT и RT программы VERCORS в период с 1989 по 2002 годы. Важной особенностью данных экспериментов было дооблучение образцов до реакторных условий непосредственно перед тестом с целью воспроизводства короткоживущих ПД. Серия экспериментов MCE1 стала частью канадской экспериментальной программы, связанной с исследованием тяжелых аварий. Основной целью серии было получение данных о кинетике выхода продуктов деления из  $UO_2$  в условиях инертной и окислительной атмосферы, включая воздушную атмосферу, при высоких температурах. На рисунке 1 представлены результаты валидации модели выхода ПД из  $UO_2$  топлива для Mo на эксперименте VR-5, в котором в качестве несущей среды использовался чистый водяной пар, и для элемента Ru на эксперименте MCE1-4, в котором в качестве несущей среды использовался воздух. Синими линиями обозначено изменение температуры топлива в ходе эксперимента.

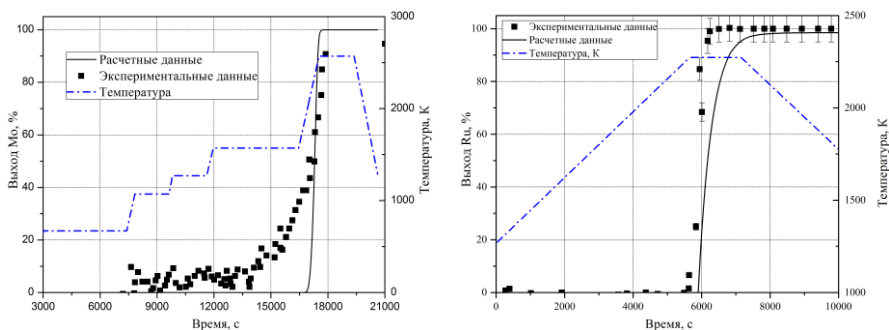


Рис. 1 Сравнение расчетных и экспериментальных данных: выход Mo,

*эксперимент VR-5 (слева) и выход Ru, эксперимент MCE1-4 (справа)*

В соответствии с имеющимися представлениями о поведении продуктов деления, полученными на основе экспериментальных данных, в условиях окислительной среды молибден должен выходить из топлива практически полностью, что продемонстрировано на левом графике. Разработанная модель качественно описывает это явление, за исключением более позднего начала выхода молибдена в сравнении с экспериментом. Это расхождение объясняется тем, что часть молибдена выходит на ранней стадии в виде соединения с цезием, которое не учитывается в модели. Нагрев топлива в воздушной среде сопровождается ускоренным выходом рутения, что продемонстрировано на правом графике. Здесь модель также хорошо описывает явление.

Выход ПД из MOX топлива исследовался в отдельных экспериментах серий VEGA и VERDON. Эксперименты серии VEGA проводились в Научно-исследовательском институте по атомной энергии Японии (JAERI) с 1999 по 2004 годы. Целью экспериментов серии VEGA было получение данных по выходу радионуклидов из облученного топлива (включая MOX топливо) при температурах топлива вплоть до 3150 К и давлении газа-носителя вплоть до 1 МПа. Эксперименты серии VERDON проводились в Исследовательском центре ядерной энергетики Кадараш с 2011 по 2014 годы. Целью экспериментов являлось получение данных по выходу радионуклидов, включая нелетучие ПД, из облученного топлива (включая MOX топливо) при температурах топлива вплоть до 3000 К. На рисунке 2 представлены результаты валидации модели выхода ПД из MOX топлива для летучего элемента Cs на экспериментах VEGA-3 (UO<sub>2</sub> топливо) и VEGA-M1 (MOX топливо).

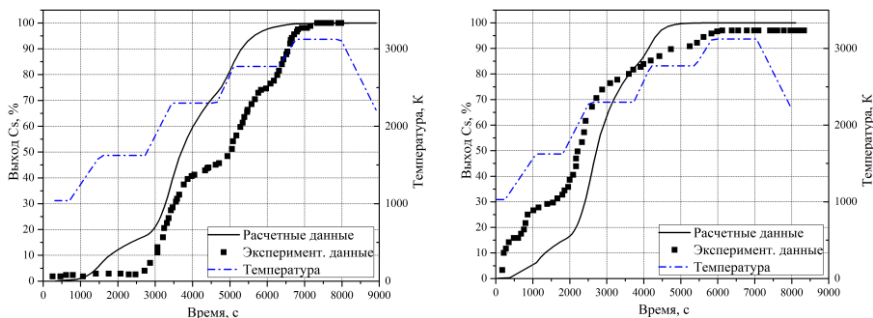


Рис. 2 Сравнение расчетных и экспериментальных данных: выход Cs, эксперименты VEGA-3 (слева) и VEGA-M1 (справа)

Из полученных результатов можно отметить, что выход продуктов деления из MOX топлива происходит с большей скоростью и начинается при более низких температурах. Аналогичный эффект наблюдается и в экспериментах с MOX топливом серии VERDON. Разработанная модель описывает это явление.

По результатам валидации моделей выхода ПД из топлива на экспериментальных данных максимальная погрешность величины выхода ПД не превышает 30% для летучих ПД, 40-60% для ПД пониженной летучести, в зависимости от элемента.

**В третьей главе** диссертации приводится описание моделей, описывающих выход ПД из расплава и при взаимодействии расплава с бетоном. Указаны приближения, использовавшиеся при создании модели. Приведены результаты валидации модели на экспериментах EVAN-FP, ACE, MASCA.

При моделировании выхода ПД из расплава рассматриваются следующие элементы:

- часть летучих элементов (Te и Sb и их соединения);
- элементы пониженной летучести (Ba, Sr, Ru, Mo, Ce, Eu, La);
- нелетучие элементы (Nb, Zr, Nd, Pm, Pr, Y, Tc, Np, U, Rh, Cm).

Также рассматриваются элементы конструкционных материалов: Fe, Ni, Cr, Ag, In, Cd.

Испарение ПД с поверхности расплава описывается уравнением, аналогичным уравнению для испарения ПД с поверхности топлива:

$$\frac{dm_i}{dt} = \beta_i S M_i (\rho_i^s - \rho_i^\infty)$$

При моделировании выхода ПД при взаимодействии расплава с бетоном помимо испарения с поверхности расплава рассматривается также задача испарения ПД из расплава в газовую среду проходящих через него пузырьков. При этом площадь поверхности контакта газовой среды, а следовательно, и выход ПД при взаимодействии расплава с бетоном определяется количеством, составом и скоростью всплытия пузырьков образующегося газа. Данные величины находятся с помощью модели, в которой скорости всплытия пузырьков рассчитываются для трех режимов, определяемых из геометрии пузырька и его размера. Режим № 1 применяется для расчета скорости всплытия небольших сферических пузырьков, режим № 2 – для эллипсоидальных пузырьков. Основным режим № 3 используется для пузырьков в форме сферического сегмента достаточно большого размера. В данной модели скорость всплытия пузырька задается как минимальная из скоростей для каждого из трех режимов. Выражение для скорости всплытия пузырька  $U_{bubble}$  в режиме № 1 получается с использованием классической теории гидродинамического анализа:

$$U_{bubble} = \frac{g \cdot d_b^2 \cdot \rho_{melt}}{12 \cdot \mu_{melt}},$$

где

$g$  – ускорение силы тяжести,  $g = 9.81$  м/с<sup>2</sup>;

$d_b$  – диаметр пузырьков, м;

$\rho_{melt}$  – плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_{melt}$  – вязкость расплава, Па·с.

Скорость подъема пузыря в режиме № 2 задается выражением:

$$U_{bubble} = \left[ \frac{2.14 \cdot \sigma_{melt}}{\rho_{melt} \cdot d_b} + 0.505 \cdot g \cdot d_b \right]^{1/2},$$

где

$\sigma_{melt}$  – поверхностное натяжение расплава, Н/м;

$d_b$  – эквивалентный диаметр пузырьков, м.

Уравнения для скорости подъема пузырька в режиме № 3 определяется на основании формулы Дэвиса – Тейлора:

$$U_{bubble} = \sqrt{g \cdot r_b},$$

где  $r_b$  – радиус эквивалентного сферического пузырька с таким же объемом, что и объем пузырька в форме сферического сегмента, м.



Ниже приводятся основные результаты валидации моделей выхода ПД из расплава, в том числе при взаимодействии расплава с бетоном, на экспериментальных данных.

Для валидации модели испарения ПД с поверхности расплава рассматривался эксперимент EVAN-FP, посвященный исследованию закономерностей выхода элементов ПД из расплава. Эксперименты проводились на установке РАСПЛАВ-3. Эксперименты проводились при температурах расплава, лежащих в диапазоне от 2800 К до 3000 К, смесь нагревалась методом индукционного разогрева в холодном тигле. Исходная смесь была приготовлена из порошков  $UO_2$ ,  $ZrO_2$  и Zr с дальнейшим добавлением малых примесей нерадиоактивных имитаторов ПД: оксидов SrO, BaO,  $CeO_2$ ,  $La_2O_3$  и металлов Mo и Ru. В таблице 1 представлены результаты валидации модели испарения ПД с поверхности расплава на эксперименте EVAN-FP.

*Таблица 1 – Сравнение экспериментального и расчетного выхода ПД для эксперимента EVAN-FP*

Элемент	Выход ПД, %	
	Эксперимент	Расчет
Mo	13.42	14.08
Ru	0.46	1.53
Ba	14.17	14.46
Sr	53.80	51.25
La	1.20	1.98
Ce	1.76	2.02
U	4.55	2.74

Можно отметить, что абсолютные значения выхода основных продуктов деления из расплава соответствуют экспериментальным данным, с учетом большой неопределенности параметров эксперимента.

Для валидации модели выхода ПД при взаимодействии расплава с бетоном рассматривались эксперименты проекта ACE, состоявшего из

четырёх этапов (этап А, В, С и D). Общей целью данных этапов стало изучение основных явлений, имеющих место при тяжелых авариях на легководном реакторе. При валидации модели использовались результаты этапа С, посвященного изучению выхода продуктов деления низкой летучести. Экспериментальная установка представляла собой печь, составленную из восьми водоохлаждаемых медных панелей, формирующих четыре стенки, окружающие бетонную плиту основания и кориум. В таблице 2 представлены результаты валидации модели выхода ПД при взаимодействии расплава с бетоном на эксперименте ACE L4, в котором исследовался выход ПД для серпентенинового/силикатного бетона, прототипного для АЭС с ВВЭР.

*Таблица 2 – Сравнение экспериментального и расчетного выхода ПД для эксперимента ACE L4*

Элемент	Выход ПД, %	
	Эксперимент	Расчет
Ba	$3.3 \cdot 10^{-1}$	$5.51 \cdot 10^{-1}$
Ce	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$6.23 \cdot 10^{-4}$
La	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$1.79 \cdot 10^{-3}$
Mo	$1.3 \cdot 10^{-1}$	$3.29 \cdot 10^{-4}$
Sr	$3.5 \cdot 10^{-1}$	$7.00 \cdot 10^{-1}$
Te	$5.9 \cdot 10^1$	$3.87 \cdot 10^1$
U	$5.8 \cdot 10^{-3}$	$2.76 \cdot 10^{-2}$

Можно отметить, что полученные расчетные значения неплохо описывают экспериментальные данные. Отличие обуславливается большой погрешностью экспериментальных измерений, как в части определения величины выхода ПД, так и в части параметров расплава и характеристик взаимодействия расплав-бетон, служащих исходными данными для расчета.

По результатам валидации моделей выхода ПД из расплава на экспериментальных данных максимальная погрешность величины выхода ПД не превышает 40%.

**В четвертой главе** диссертации приводится описание моделей,

описывающих перенос ПД в первом контуре. Приведены результаты валидации модели на экспериментах FALCON, MARVIKEN.

Поведение соединений ПД в первом контуре описывается системой дифференциальных уравнений относительно массы каждого из веществ для каждого из участков контура (в несущей среде и на поверхности контура). Описываемая модель позволяет количественно оценить массу радиоактивных ПД в атмосфере и на поверхностях участков первого контура, а также количество продуктов деления, вышедших из первого контура в защитную оболочку или в окружающую среду (в случае байпаса ЗО). При моделировании переноса ПД в первом контуре принимается, что в ходе тяжелой аварии продукты деления могут находиться в газовой и аэрозольной форме. Ниже приводятся уравнения для ПД в форме аэрозоля. Решение поставленной задачи состоит в решении системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dN_{i,j}^{atm}}{dt} &= -(\lambda^{half} + \lambda_{i,j}^{dep} + \lambda_i^{cond} + \lambda_i^{out})N_{i,j}^{atm} + \lambda_{i-1,j}^{out}N_{i-1,j}^{atm} \\ &\quad + N_{i,j}^{sour-atm} + AgglSource_{i,j} - SinkSource_{i,j} \\ \frac{dN_{i,j}^{sur}}{dt} &= -\lambda^{half}N_{i,j}^{sur} + (\lambda_{i,j}^{dep} + \lambda_i^{cond})N_{i,j}^{atm} \\ \frac{dN_{i,j}^{out}}{dt} &= \lambda_i^{out}N_{i,j}^{out}, \end{aligned}$$

где

- $N_{i,j}^{atm}$  – масса аэрозолей размерной группы  $j$  в участке контура  $i$ , кг;
- $N_{i,j}^{sur}$  – масса аэрозолей размерной группы  $j$  на поверхностях участка контура  $i$ , кг;
- $N_{i,j}^{out}$  – масса аэрозолей размерной группы  $j$ , покинувших участок контура  $i$ , кг;
- $N_{i,j}^{sour-atm}$  – массовый расход аэрозолей размерной группы  $j$ , подаваемых в участок контура  $i$ , кг/с;
- $\lambda_{i,j}^{dep}$  – коэффициент осаждения аэрозолей размерной группы  $j$  в участке контура  $i$ , 1/с;
- $\lambda_i^{cond}$  – коэффициент конденсации паров на поверхности в участке контура  $i$ , 1/с;
- $\lambda_i^{out}$  – коэффициент выхода аэрозолей из участка контура  $i$ , 1/с;

$AgglSource_{i,j}$  – источник в размерную группу  $j$  в участке контура  $i$  за счет агломерации, кг/с;

$SinkSource_{i,j}$  – отток из размерной группы  $j$  в участке контура  $i$  за счет агломерации, кг/с.

Для расчета коэффициентов осаждения аэрозолей применяются модели диффузиофореза, седиментации, термофореза, Броуновской диффузии, а также выражения для турбулентной диффузии:

$$\lambda_{i,j}^{dep} = \frac{A_i^{down}}{V_i} \beta_{sed} + \frac{A_i}{V_i} (\beta_{therm} + \beta_{BrDiff} + \beta_{TurbDiff} + \beta_{TurbImp}),$$

где

$V_i$  – объем участка контура  $i$ , м<sup>3</sup>;

$A_i$  – площадь поверхности осаждения в участке контура  $i$ , м<sup>2</sup>;

$A_i^{down}$  – площадь обращенной вверх поверхности осаждения в участке контура  $i$ , м<sup>2</sup>;

$\beta_{sed}$  – скорость осаждения аэрозолей за счет седиментации, м/с;

$\beta_{therm}$  – скорость осаждения аэрозолей за счет термофореза, м/с;

$\beta_{BrDiff}$  – скорость осаждения аэрозолей за счет Броуновской диффузии, м/с;

$\beta_{TurbDiff}$  – скорость осаждения аэрозолей за счет турбулентной диффузии, м/с;

$\beta_{TurbImp}$  – скорость осаждения аэрозолей за счет турбулентной импакции, м/с.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями решается для каждого размера аэрозолей с помощью неявного метода Эйлера с автоматическим выбором шага. При численном решении уравнений шаг автоматически уменьшается до тех пор, пока не будет достигнута точность, задаваемая пользователем, или предельный минимальный шаг.

Ниже приводятся основные результаты валидации моделей переноса ПД в первом контуре на экспериментальных данных.

Для валидации модели переноса и осаждения аэрозолей ПД в прямолинейном участке первого контура РУ рассматривались эксперименты серии FALCON. Эксперименты FAL-ISP-1 и FAL-ISP-2 являются одними из основных экспериментов, выполненных в рамках международной стандартной проблемы ISP-34. Эти эксперименты проводились на установке FALCON (Дорсет, Великобритания). Целью исследования являлось изучение

поведения ПД в первом контуре РУ на начальных этапах ТА, включая перенос аэрозолей ПД и их осаждение. К основным элементам экспериментальной установки FALCON относятся: кварцевая емкость с топливными образцами, где происходит их нагрев; в верхней части этой емкости расположен вход в термоградиентную трубку, моделирующую участок первого контура; конец термоградиентной трубки соединен со стальным баком. На рисунке 3 представлены результаты валидации модели переноса ПД в первом контуре РУ на экспериментах FALCON FAL-ISP-1 и FAL-ISP-2.

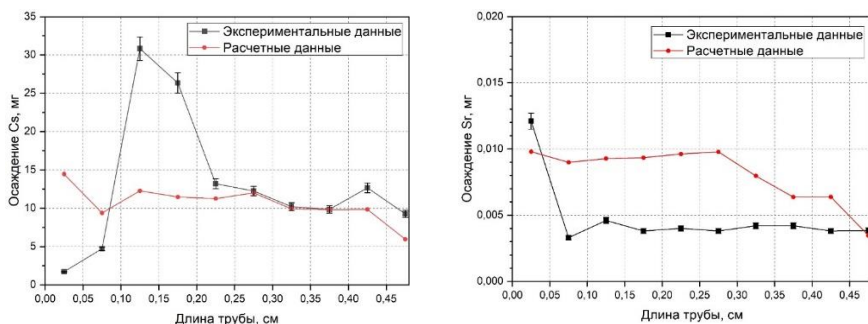


Рис. 3 Сравнение расчетных и экспериментальных данных: масса Cs, эксперимент FALCON FAL-ISP-1 (слева) и масса Sr, эксперимент FALCON FAL-ISP-2 (справа)

Можно отметить, что расчетные результаты качественно, а на отдельных участках и количественно, совпадают с экспериментальными данными. Серьезное расхождение наблюдается в результатах по осаждению цезия на начальном участке трубы, что может объясняться некорректными исходными данными по параметрам среды первого контура на этом участке, полученными из эксперимента, а также повышенным осаждением цезия в составе соединения, которое не учитывается в модели.

По результатам валидации моделей переноса ПД в первом контуре на экспериментальных данных максимальная погрешность величины выхода ПД из первого контура в защитную оболочку не превышает 5 %.

**В пятой главе** диссертации приводится описание моделей, описывающих перенос ПД в защитной оболочке. Приведены результаты валидации модели на экспериментах VANAM M3, TOSQAN, CSE, Spray

Research Japan, экспериментах по выведению йодистого метила с помощью раствора гидразина, приведены результаты кросс-верификации с программой для ЭВМ LEAK3.

При моделировании переноса ПД в защитной оболочке принимается, что в ходе тяжелой аварии продукты деления могут находиться в объеме ЗО в газовой и в жидкой среде, а также на различных поверхностях защитной оболочки. Также принимается во внимание, что газообразные и летучие продукты деления в процессе аварии могут переходить из одной среды в другую в результате работы систем локализации, осаждения на поверхностях и десорбции с них.

Поведение соединений ПД в объеме ЗО описывается системой дифференциальных уравнений относительно активности или массы каждого из изотопов для каждого из помещений (в воздушном и водном объеме, на поверхностях стен и оборудования) и их утечки в окружающую среду. Описываемая модель позволяет оценить количество радиоактивных ПД в помещениях контайнмента, в воде и на поверхностях стен и оборудования, а также количество продуктов деления, вышедших в окружающую среду в процессе аварии.

$$\begin{aligned} \frac{dN_{i,m}^{atm}}{dt} &= -(\lambda^{half} + \lambda_{i,m}^{dep} + \lambda_{i,m}^{wat} + \sum_{k=1}^{n_{leak}} \lambda_{i,k}^{leak}) N_{i,m}^{atm} + \lambda^{des} N_{i,m}^{sur} + \\ &+ \sum_{j=1}^{n_{room}} g_{i,j} N_{j,m}^{atm} - \sum_{j=1}^{n_{room}} g_{i,j} N_{i,m}^{atm} + AgglSource_{i,m} - \\ &- SinkSource_{i,m} + N_{i,m}^{sour-atm} \\ \frac{dN_{i,m}^{sur}}{dt} &= -\lambda^{half} N_{i,m}^{sur} + \lambda_{i,m}^{dep} N_{i,m}^{atm} - \lambda^{des} N_{i,m}^{sur} \\ \frac{dN_{i,m}^{wat}}{dt} &= -\lambda^{half} N_{i,m}^{wat} + \lambda_{i,m}^{wat} N_{i,m}^{atm} + N_{i,m}^{sour-wat} \\ \frac{dN_{i,m}^{leak}}{dt} &= \sum_i^{n_{room}} \sum_{k=1}^{n_{leak}} (1 - Eff_{i,k}^{leak}) \cdot \lambda_{i,k}^{leak} N_{i,m}^{atm}, \end{aligned}$$

где

$N_{i,m}^{atm}$  – масса аэрозолей размерной группы  $m$  изотопа ПД в атмосфере помещения  $i$ , кг;

$N_{i,m}^{wat}$  – масса аэрозолей размерной группы  $m$  изотопа ПД в объеме воды в помещении  $i$ , кг;

$N_{i,m}^{sur}$  – масса аэрозолей размерной группы  $m$  изотопа ПД на поверхностях помещения  $i$ , кг;

$N_{i,m}^{sour-atm}$  – источник аэрозолей размерной группы  $m$  изотопа ПД в атмосферу помещения  $i$ , кг/с;

$AgglSource_{i,m}$  – источник в размерную группу  $m$  в участке контура  $i$  за счет агломерации, кг/с;

$SinkSource_{i,m}$  – отток из размерной группы  $m$  в участке контура  $i$  за счет агломерации, кг/с;

$N_{i,m}^{sour-wat}$  – источник аэрозолей размерной группы  $m$  изотопа ПД в водную среду помещения  $i$ , кг/с;

$\lambda_{i,m}^{dep}$  – коэффициент осаждения аэрозолей размерной группы  $m$  в помещении  $i$ , 1/с;

$\lambda^{des}$  – коэффициент десорбции аэрозолей, 1/с;

$\lambda_{i,m}^{wat}$  – коэффициент перехода аэрозолей размерной группы  $m$  ПД в водную среду, 1/с;

$N_m^{leak}$  – масса изотопа аэрозолей размерной группы  $m$  ПД, вышедших в окружающую среду к моменту времени  $t$ , кг;

$Eff_{i,k}^{leak}$  – эффективность улавливания аэрозолей на фильтрах течи номер  $k$  из помещения  $i$  в окружающую среду. В случае отсутствия фильтров равняется нулю.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями решается для каждого размера аэрозолей с помощью неявного метода Эйлера с автоматическим выбором шага. При численном решении уравнений шаг автоматически уменьшается до тех пор, пока не будет достигнута точность, задаваемая пользователем, или предельный минимальный шаг.

Для расчета коэффициентов осаждения аэрозолей применяются модели седиментации, термофореза и Броуновской диффузии.

$$\lambda_i^{dep} = \frac{A_i}{V_i} (\beta_{sed} + \beta_{therm} + \beta_{BrDiff}),$$

где

$A_i$  – площадь поверхностей в помещении  $i$  ЗО, м<sup>2</sup>;

$V_i$  – объем помещения  $i$  системы локализации аварии, м<sup>3</sup>;

$\beta_{sed}$  – скорость осаждения аэрозолей за счет седиментации, м/с;

$\beta_{therm}$  – скорость осаждения аэрозолей за счет термофореза, м/с;

$\beta_{BrDiff}$  – скорость осаждения аэрозолей за счет Броуновской диффузии, м/с.

Для моделирования процесса выведения аэрозолей из атмосферы ЗО за счет улавливания каплями спринклерной системы используется выражение:

$$\lambda_{sprinkl} = \frac{3 Q_{sprinkl} \cdot h}{2 D_{drop} \cdot V} \cdot \varepsilon,$$

где

$Q_{sprinkl}$  – расход теплоносителя через форсунки спринклерной системы, м<sup>3</sup>/с;

$h$  – высота падения капли, м;

$D_{drop}$  – диаметр капли, м;

$V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;

$\varepsilon$  – суммарная эффективность улавливания аэрозольных частиц.

Суммарная эффективность улавливания аэрозольных частиц определяется эффективностями отдельных механизмов и выглядит следующим образом:

$$\varepsilon_{sprinkl} = 1 - (1 - \varepsilon_{inert})(1 - \varepsilon_{inter})(1 - \varepsilon_{BrDiff})(1 - \varepsilon_{diff}),$$

где

$\varepsilon_{inert}$  – эффективность улавливания за счет инерционного взаимодействия частицы с каплей;

$\varepsilon_{inter}$  – эффективность улавливания за счет перехвата частицы каплей;

$\varepsilon_{BrDiff}$  – эффективность улавливания за счет Броуновской диффузии;

$\varepsilon_{diff}$  – эффективность улавливания за счет диффузиофореза.

Ниже приводятся основные результаты валидации моделей переноса ПД в защитной оболочке на экспериментальных данных.

Для валидации моделей переноса и осаждения аэрозолей в помещениях защитной оболочки рассматривался эксперимент VANAM M3, проводившийся на экспериментальной установке ВМС (GRS, Германия) в рамках ISP-37 и посвященный исследованию тепло-гидравлических параметров парогазовой среды и поведения аэрозолей в помещениях контайнмента при моделировании тяжелой аварии с плавлением топлива. Экспериментальная установка ВМС является моделью контайнмента АЭС типа PWR и предназначена для экспериментального моделирования широкого спектра аварий, связанных с истечением теплоносителя из реактора и распространением легких газов и аэрозолей в помещениях контайнмента. На рисунке 4 представлены результаты валидации модели переноса ПД в первом



контуры РУ на эксперименте VANAM M3 для двух помещений.

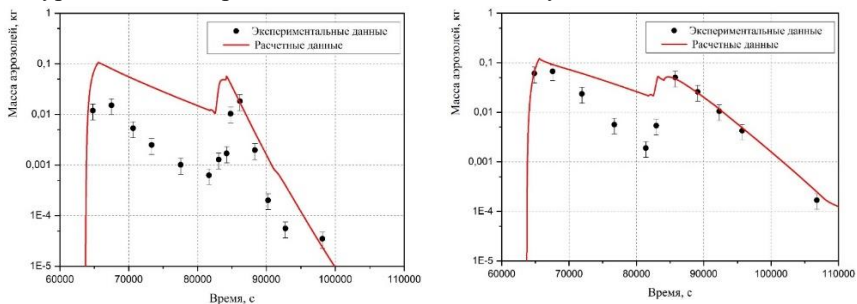
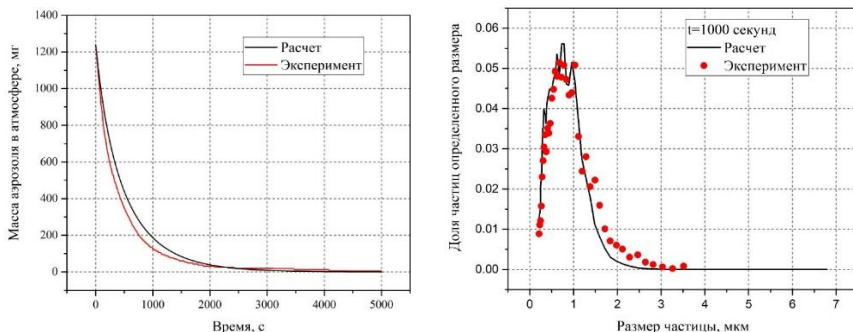


Рис. 4 Сравнение расчетных и экспериментальных данных, эксперимент VANAM M3: помещение R8 (слева) и помещение R9.3 (справа)

В результате анализа результатов моделирования для эксперимента VANAM-M3 необходимо отметить следующее: расчетная оценка осаждения аэрозолей после первого этапа подачи аэрозолей (фаза 1) является заниженной, что отражается в высоком, относительно экспериментальных данных, содержании аэрозолей в атмосфере большинства рассматриваемых помещений. Такой результат может быть обусловлен неточным учетом изменения размера аэрозольных частиц. Вместе с тем, сравнение расчетных и экспериментальных данных, соответствующих второму этапу подачи аэрозолей (фаза 4) и дальнейшему снижению их концентрации, показало хорошую сходимость.

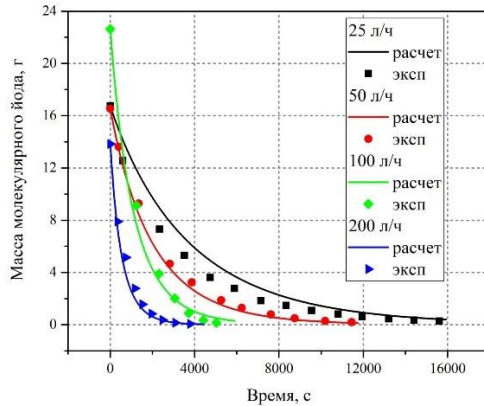
Для валидации модели улавливания аэрозолей каплями спринклерной системы рассматривался эксперимент серии TOSQAN. TOSQAN - это экспериментальная программа, осуществляемая Институтом ядерной и радиационной безопасности Франции (IRSN) для проведения термогидравлических исследований защитной оболочки. Основным рабочим объемом экспериментальной установки является закрытый цилиндрический объем, в который подаются пар и аэрозольные частицы. В верхней части экспериментальной установки находятся спринклеры и система подачи аэрозолей. В качестве аэрозолей использовались частицы карбида кремния (SiC) с плотностью  $3.2 \text{ г/см}^3$ . На рисунке 5 представлены результаты валидации модели улавливания аэрозолей каплями спринклерной системы на эксперименте TOSQAN.



*Рис. 5 Сравнение расчетных и экспериментальных данных, эксперимент TOSQAN: масса аэрозоля в атмосфере установки (слева) и распределение аэрозоля по размерам в  $t=1000$  секунд (справа)*

Из анализа результатов моделирования для эксперимента TOSQAN можно отметить, что расчетная оценка скорости выведения аэрозолей каплями спринклерной системы является консервативно завышенной, что отражается в низком, относительно расчетных данных, содержании аэрозолей в атмосфере. Это может быть связано с влиянием дополнительных механизмов выведения, неучтенных в модели. Вместе с тем, сравнение расчетных и экспериментальных данных в целом показало хорошую качественную и количественную сходимость.

Для валидации модели улавливания йода каплями спринклерной системы рассматривался эксперимент серии Spray Research Japan. В работе Spray Research Japan проводилось исследование влияния спринклерной системы на вымывание йода в маломасштабной экспериментальной установке. В работе исследуется влияние разбрызгиваемой спринклерами жидкости, как обычной воды, так и химически реагирующих растворов, на вымывание йода. На рисунке 6 представлены результаты валидации модели улавливания йода каплями спринклерной системы на эксперименте Spray Research Japan.



*Рис. 6 Сравнение расчетных и экспериментальных данных по массе молекулярного йода в атмосфере установки, эксперимент Spray Research Japan*

При анализе результатов моделирования для эксперимента Spray Research Japan можно отметить, что расчетная оценка выведения молекулярного йода каплями спринклерной системы при расходах раствора спринклерной системы порядка 25 л/ч является завышенной, что отражается в высоком, относительно экспериментальных данных, содержании молекулярного йода в атмосфере. Для более высоких значений расхода сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает хорошую количественную и качественную сходимость.

По результатам валидации моделей переноса ПД в защитной оболочке на экспериментальных данных максимальная погрешность величины выброса ПД в окружающую среду не превышает 5 %.

**В шестой главе** диссертации приводится описание программного комплекса для анализа радиационных последствий запроектных аварий на АЭС с ВВЭР, реализованного на базе представленных моделей. Приведены результаты валидации моделей и программного комплекса на интегральных экспериментах серии РНЕВУС-ФР. Приводится информация о методологии и результатах анализа неопределенности и чувствительности к неопределенности исходных данных, выполненного с помощью программных средств комплекса.

В настоящий момент комплекс включает в себя 3 кода: МАВР-ТА, ИРКА и МАП-ТА. Коды написаны на языке программирования С++. При своей работе занимают приблизительно 100 МБ оперативной памяти компьютера, рекомендуемая частота процессора: не ниже 3.2 ГГц. Выходные файлы, записываемые занимают на дисковом накопителе компьютера от 1 до 800 МБ. Время расчета зависит от кода и характера решаемой задачи и составляет от нескольких секунд до нескольких суток.

Код МАВР-ТА – базовый код комплекса. Предназначен для решения задач, связанных с поведением продуктов деления на всех стадиях тяжелой аварии. Аттестован в Ростехнадзоре (Аттестационный паспорт программного средства № 535 от 5 ноября 2021 г.). Программное средство МАВР-ТА позволяет решать следующие задачи:

1. Расчет выхода продуктов деления из топлива тепловыделяющих сборок (ТВС) в реакторе и бассейне выдержки;
2. Расчет параметров фрагментации расплава кориума при его перемещении из корпуса реактора и расчет выхода ПД с поверхности перемещающегося кориума;
3. Расчет выхода продуктов деления с поверхности расплава при его удержании в корпусе реактора или УЛР;
4. Расчет выхода продуктов деления при взаимодействии расплава с бетоном;
5. Расчет выхода ПД из первого контура в защитную оболочку (или в окружающую среду, в случае байпасирования оболочки);
6. Расчет содержания ПД в атмосфере ЗО;
7. Расчет содержания ПД на поверхностях ЗО;
8. Расчет выброса ПД в окружающую среду из объема ЗО;
9. Анализ неопределенности и чувствительности к неопределенности исходных данных для получаемых результатов.

В составе ПС МАВР-ТА реализованы следующие модели:

1. Модель расчета показателя стехиометрии топлива на основе данных об окислительном потенциале атмосферы;
2. Модель расчета выхода продуктов деления из топлива ТВС;
3. Модель расчета выхода продуктов деления из расплава при его удержании в корпусе реактора или УЛР, при перемещении расплава из корпуса реактора в УЛР, при взаимодействии расплава с бетоном;
4. Модель осаждения и конденсации аэрозолей ПД на стенках первого

- контура;
5. Модель объемной конденсации паров ПД на аэрозолях в первом контуре;
  6. Модель коагуляции аэрозолей при их переносе в первом контуре;
  7. Модель повторного взвешивания аэрозолей в поток несущего газа в первом контуре;
  8. Модель расчета переноса аэрозолей ПД между помещениями ЗО;
  9. Модель расчета выведения аэрозолей ПД из атмосферы за счет осаждения на поверхностях ЗО и на поверхности водной среды ЗО;
  10. Модель коагуляции аэрозолей ПД.
- Блок схема программного средства МАВР-ТА представлена на рисунке 7.



*Рисунок 7 – Блок-схема программного средства МАВР-ТА*

Код ИРКА предназначен для решения задачи определения выброса ПД в окружающую среду при запроектной аварии без плавления топлива. Аттестован в Ростехнадзоре (Аттестационный паспорт программного средства № 572 от 5 декабря 2022 г.). Программа для ЭВМ ИРКА позволяет решать следующие задачи:

1. Расчет переноса аэрозолей ПД между помещениями ЗО, в случае использования расчетной модели с несколькими помещениями;

2. Расчет выведения аэрозолей ПД из атмосферы за счет осаждения на поверхностях ЗО и поверхности воды на полах помещений ЗО;
3. Моделирование агломерации аэрозолей ПД;
4. Расчет выведения аэрозолей ПД за счет улавливания каплями воды при работе спринклерной системы;
5. Расчет выведения йода за счет улавливания каплями воды при работе спринклерной системы;
6. Расчет выброса ПД в окружающую среду, с учетом возможности работы системы фильтрации;
7. Анализ неопределенности и чувствительности к неопределенности исходных данных для получаемых результатов.

В составе программы реализованы следующие модели:

1. Модель расчета переноса аэрозолей ПД между помещениями ЗО;
2. Модель расчета выведения аэрозолей ПД из атмосферы за счет осаждения на поверхностях ЗО и на поверхности водной среды ЗО;
3. Модель коагуляции аэрозолей ПД.

Код МАП-ТА предназначен для решения задачи моделирования переноса радиоактивных ПД в окружающей среде и позволяет решать следующие задачи:

1. Расчет высоты подъема факела;
2. Расчет концентрации ПД в приземном слое атмосферы;
3. Расчет объемной концентрации ПД;
4. Расчет дозовой нагрузки за население за счет внешнего облучения;
5. Расчет дозовой нагрузки за население за счет внутреннего облучения;
6. Расчет дозовой нагрузки за население за счет пищевых цепочек.

В составе ПС МАП-ТА реализованы следующие модели:

1. Модель подъема факела;
2. Модель горизонтальной и вертикальной дисперсии;
3. Модель переноса ПД в окружающей среде на базе Гауссова подхода.

На рисунке 8 представлена блок-схема работы комплекса при решении задач моделирования поведения ПД в условиях ЗПА с плавлением топлива.

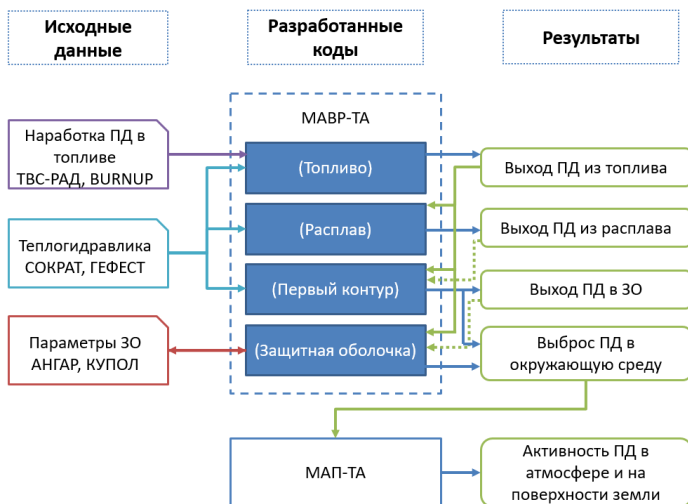


Рисунок 8 – Схема моделирования поведения РД при ТА

Исходные данные по начальной активности РД в топливе, теплогидравлическим параметрам аварии и параметрам расплава передаются в соответствующие модули программного средства МАВР-ТА. При этом между модулями осуществляется сквозная передача информации в ходе расчета, что позволяет моделировать весь спектр возможных аварийных ситуаций. Так, например, при обрушении ТВС на днище корпуса реактора, активность содержащихся в ТВС РД учитывает величину выхода РД из топлива до обрушения. В случае поступления в расплав твердых обломков топлива и формирования структуры типа «дебрис», помимо модуля, связанного с выходом РД из расплава, задействуется модуль, описывающий выход РД из твердого топлива. В зависимости от типа аварии РД из топлива могут поступать как в первый контур, так и непосредственно в защитную оболочку. При моделировании процессов переноса первого контура помимо величины выхода РД из контура описывается осаждение РД на поверхностях трубопроводов, включая трубчатку парогенератора, что позволяет определить величину остаточного тепловыделения на поверхностях первого контура за счет РД. Информация о тепловыделении является важной при оценке работоспособности отдельных элементов первого контура, например при оценке целостности трубчатки парогенератора в условиях ЗПА. При аварии с

течью первого контура во второй источник выброса задается напрямую в окружающую среду, минуя защитную оболочку. Если при этом имеется течь в ЗО, возможно задание второго источника, в модуле ЗО. При решении задачи моделирования поведения продуктов деления в защитной оболочке разработан и протестирован механизм обратной связи с кодом АНГАР, разработанным в АО «Атомэнергопроект», который наиболее широко используется для моделирования поведения среды в ЗО в условиях ЗПА, включая ЗПА с плавлением топлива. Разработанный механизм позволяет учитывать взаимосвязанное изменение параметров среды в ЗО за счет остаточного тепловыделения ПД и скорости выведения ПД из атмосферы ЗО. Связка комплекса с кодом АНГАР была протестирована в рамках валидации модели поведения ПД в ЗО на эксперименте VANAM-M3. Результаты расчета изменения во времени теплогидравлических параметров парогазовой среды в установке, полученные с помощью кода АНГАР, передавались в коды МАВР-ТА и ИРКА. К таким параметрам относятся: давление, температура, состав парогазовой среды в каждом из рассматриваемых помещений, температура поверхностей стенда и конденсата в прямках некоторых помещений, скорость конденсации в виде массового расхода потока конденсата на поверхности стенда в каждом из помещений, объемный расход среды через связи между помещениями ЗО.

Была выполнена валидация программного комплекса на результатах интегральных экспериментов серии PHEBUS-FP. Общей целью серии интегральных экспериментов Phebus-FP является изучение основных явлений, связанных с выходом радиоактивных продуктов деления и имеющих место при тяжелых авариях на LWR реакторе. Установка Phebus представляет собой копию реактора PWR мощностью 900 МВт в масштабе 1:5000 и состоит из: активной зоны (21 ТВЭЛ, высотой 1 метр), горячей и холодной нитки главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ), парогенератора и защитной оболочки. На рисунке 9 приводятся результаты валидации моделей и программного комплекса на задаче выхода ПД из топлива.



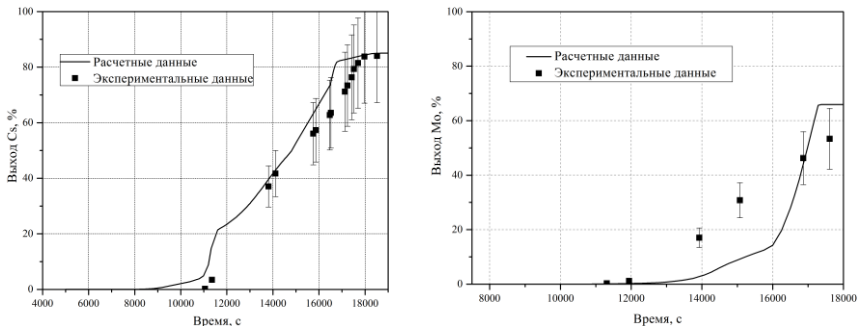


Рис. 9 Сравнение расчетных и экспериментальных данных по выходу ПД из топлива: выход Cs, эксперимент FPT-1 (слева) и выход Mo, эксперимент FPT-3 (справа)

Из анализа результатов можно сделать вывод, что разработанный комплекс программных средств успешно решает задачу моделирования процессов выхода продуктов деления из топлива. Более ранний экспериментальный выход молибдена из топлива на правом графике объясняется тем, что часть молибдена выходит на ранней стадии в связанном состоянии с цезием. Данное соединение не учитывается в моделях комплекса.

На рисунке 10 приводятся результаты валидации моделей и программного комплекса на задаче переноса ПД в защитной оболочке.

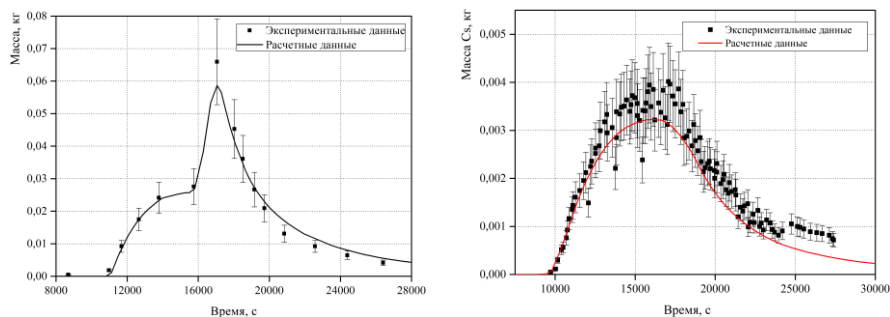
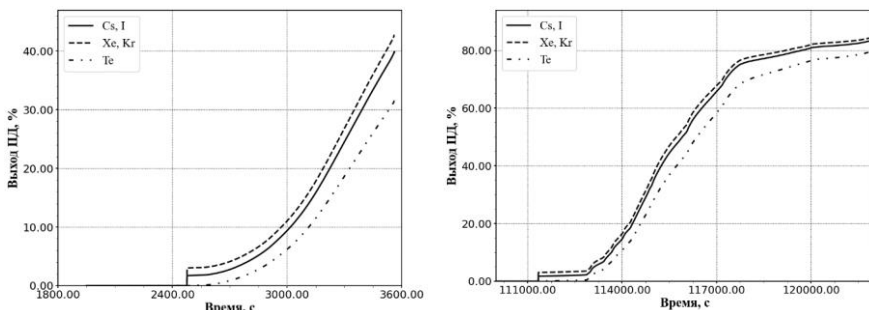


Рис. 10 Сравнение расчетных и экспериментальных данных по содержанию ПД в атмосфере ЗО: суммарная масса аэрозолей, эксперимент FPT-1 (слева) и масса Cs, эксперимент FPT-2 (справа)

Из анализа результатов можно сделать вывод, что разработанный

комплекс успешно решает задачу моделирования процессов переноса продуктов деления в защитной оболочке на примере интегральных экспериментов RHEBUS-FP. Можно отметить, что качественная и количественная сходимость результатов продемонстрирована как для суммарной массы аэрозолей в атмосфере ЗО, так и для изменения массы отдельных элементов ПД.

**В седьмой главе** диссертации приводятся результаты анализа радиационных последствий запроектной аварии «Двусторонний гильотинный разрыв ГЦТ с одновременным полным обесточиванием» для двух типов РУ: ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Представлены результаты по выходу ПД из топлива и расплава, по переносу ПД в ЗО и выбросу в окружающую среду. Приведены результаты анализа неопределенности и чувствительности к неопределенности исходных данных. На рисунке 11 приводятся результаты по выходу летучих ПД из топлива при аварии на АЭС с РУ ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.



*Рис. 11 Выход летучих ПД из топлива для ВВЭР-1000 (слева) и ВВЭР-1200 (справа)*

Начиная с момента времени 0.4 ч для ВВЭР-1000 и 30.9 ч для ВВЭР-1200, происходит разгерметизация оболочек твэлов, одновременно с этим выходят накопившиеся под оболочкой ПД. Такая разница во времени обусловлена наличием у РУ с ВВЭР-1200 гидрокмостей второй ступени, обеспечивающих залив реактора водой в течение, как минимум, 24 часов. В то время как для ВВЭР-1000 последующий нагрев топлива и рост выхода ПД начинаются практически сразу после разгерметизации оболочек твэлов, для ВВЭР-1200

вплоть до момента времени 31.4 ч, выход ПД незначителен вследствие низкой температуры топлива. В случае ВВЭР-1000 процесс выхода ПД из топлива скоротечен и уже к моменту времени 1 ч после начала аварии происходит обрушение активной зоны, обломки топлива, перемешанные с расплавом, поступают на днище корпуса реактора. Дальнейший выход ПД происходит уже из дебриса на днище корпуса, обломки топлива продолжают плавиться и это приводит к полному выходу газообразных и летучих продуктов деления. В случае АЭС с ВВЭР-1200 нагрев топлива проходит медленнее, что сказывается на скорости выхода ПД. При достижении момента времени примерно 32.6 ч выход ПД замедляется в связи с начавшимся обрушением нагретшегося топлива. Процессы здесь аналогичны тем, что имеют место при аварии на АЭС с ВВЭР-1000. Дальнейший выход ПД происходит при плавлении дебриса, итоговая величина выхода составляет 100 %, что согласуется с экспериментальными данными.

В перечень варьируемых параметров при анализе неопределенности для задачи выхода ПД из топлива входили геометрические характеристики топливного образца, его температура, начальное отклонение от стехиометрии, состав атмосферы в зазоре в условиях ТА. В качестве результата для анализа неопределенности рассматривается выход из топлива для нескольких изотопов. На рисунке 12 приводятся данные по сходимости результатов для выхода Кг-85 из топлива в зависимости от количества расчетов и результаты анализа неопределенности для выхода Кг-85 из топлива для РУ с ВВЭР-1000.

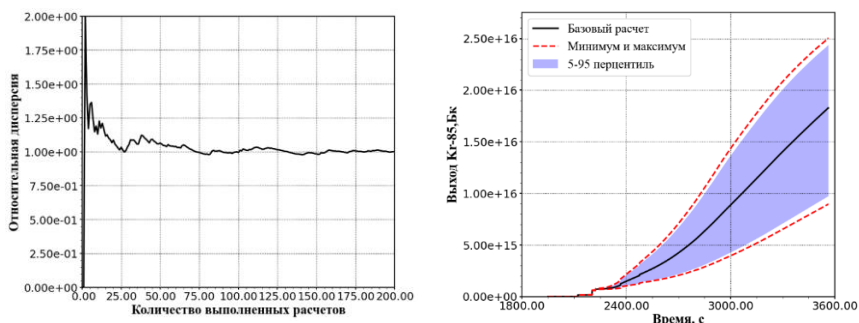
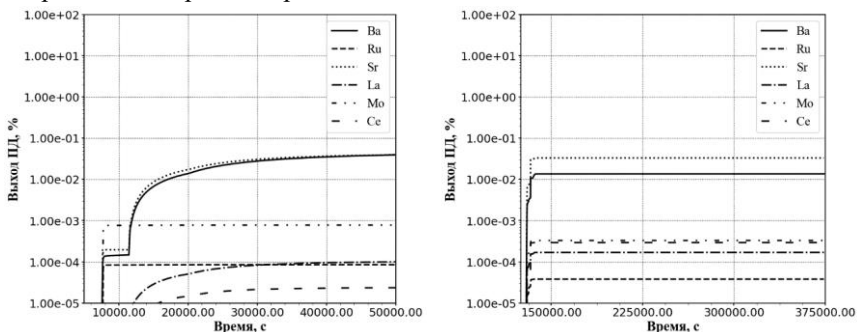


Рис. 12 Сходимость результатов по выходу Кг-85 из топлива в зависимости от количества расчетов (слева) и результаты анализа неопределенности для выхода Кг-85 из топлива (справа) для тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР-1000

Из анализа результатов можно сделать вывод, что сходимость достигается при количестве расчетов, примерно равном 75, а базовый расчет на протяжении всего времени моделирования лежит примерно в середине диапазона результатов, обусловленного неопределенностью исходных данных и моделей.

На рисунке 13 приводятся результаты по выходу ПД за счет отходящих газов при взаимодействии расплава с бетоном для РУ с ВВЭР-1000 и за счет испарения с поверхности расплава в УЛР для РУ с ВВЭР-1200.

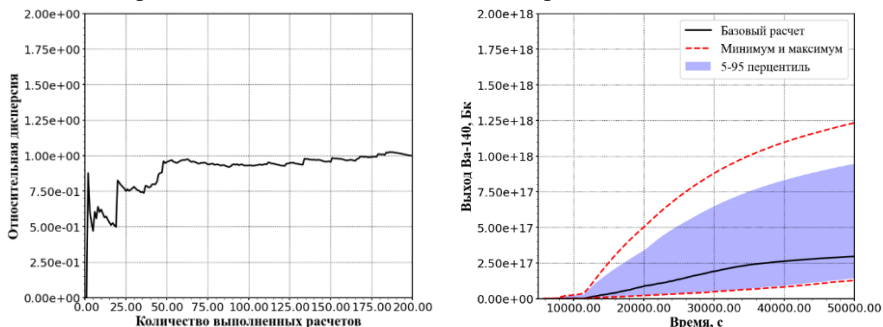


*Рис. 13 Выход ПД за счет отходящих газов при взаимодействии расплава с бетоном для ВВЭР-1000 (слева) и Выход ПД за счет испарения с поверхности расплава при его удержании в УЛР ВВЭР-1200 (справа)*

Повышенный, в сравнении с испарением с поверхности расплава, выход ПД за счет отходящих газов обусловлен двумя факторами: активным процессом газообразования в ходе взаимодействия расплава с бетоном и заливом поверхности расплава в УЛР водой. Проходящие через слой расплава пузырьки газа захватывают продукты деления и выносят их в пограничный слой у поверхности расплава, где они подхватываются потоком среды и уносятся от поверхности. В то время, как слой воды над поверхностью расплава у УЛР выступает в роли фильтра, практически полностью удерживающего ПД.

В перечень варьируемых параметров при анализе неопределенности для задачи выхода ПД из расплава входили радиус и температура поверхности расплава, скорость среды над поверхностью расплава, давление и температура среды над поверхностью расплава. В качестве результата для анализа неопределенности рассматривается выход из расплава для нескольких изотопов. На рисунке 14 приводятся данные по сходимости результатов для

выхода Ва-140 из расплава в зависимости от количества расчетов и результаты анализа неопределенности для выхода Ва-140 из расплава для РУ с ВВЭР-1000.



*Рис. 14 Сходимость результатов по выходу Ва-140 из расплава в зависимости от количества расчетов (слева) и результаты анализа неопределенности для выхода Ва-140 из расплава (справа) для тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР-1000*

Анализ полученных результатов показал, что сходимость достигается при количестве расчетов, примерно равном 130, что превышает оценку количества расчетов по формуле Вилкса, согласно которой двустороннему доверительному интервалу с оптимальной доверительной вероятностью 95 % соответствует количество расчетов (число выборок), равное 93. При этом кривая базового расчета лежит ближе к нижней границе диапазона расчетов, обусловленного неопределенностью исходных данных и моделей. Это связано с погрешностью модели выхода бария из расплава, которая была получена в ходе валидации на результатах экспериментов. При этом, учитывая крайне ограниченное количество экспериментов, посвященных выходу ПД из расплава, можно ожидать, что в случае появления новых экспериментальных данных величина погрешности изменится.

На рисунке 15 приводятся результаты по активности ПД в атмосфере 30 для РУ с ВВЭР-1000 и РУ с ВВЭР-1200.

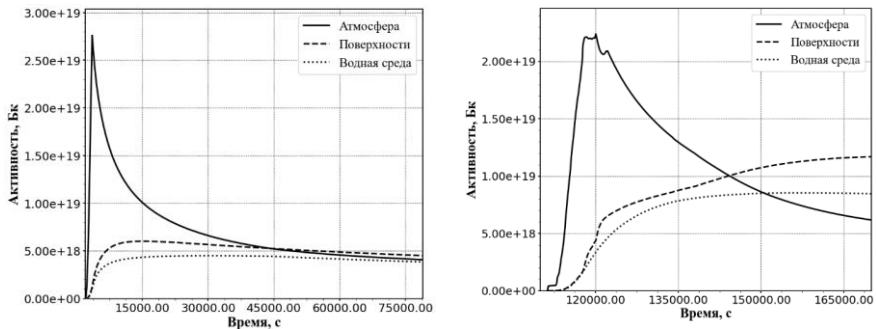
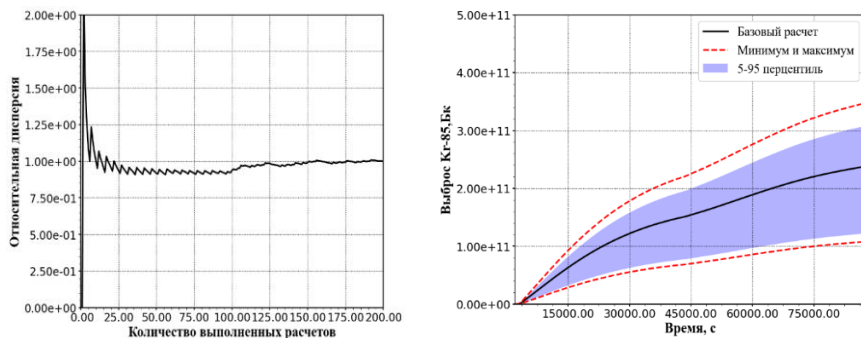


Рис. 15 Суммарная активность в помещениях ЗО для ВВЭР-1000 (слева) и ВВЭР-1200 (справа)

Для аварии на АЭС с ВВЭР-1000 наблюдается следующая хронология явлений: быстрый рост активности ПД в атмосфере ЗО в начальный момент, обусловленный их выходом из топлива и дебриса на днище корпуса реактора, сменяется снижением активности за счет естественных процессов выведения ПД: гравитации, диффузиофореза. При этом растет количество ПД, осевших на поверхностях ЗО и попавших в водную среду на полах помещений ЗО. В случае аварии на АЭС с ВВЭР-1200 более плавный рост активности ПД в атмосфере ЗО сменяется снижением активности, но в этом случае скорость снижения активности заметно меняется со временем, что обусловлено продолжающимися процессами поступления изотопов ПД в объем ЗО за счет их выхода из дебриса и УЛР. Может даже наблюдаться повторный рост активности, как в случае стронция. При аварии на АЭС с ВВЭР-1200 радиоактивные ПД осаждаются преимущественно в водную среду. Это связано с тем, что основным процессом выведения аэрозолей является их гравитационное осаждение на полах ЗО, при этом в условиях ТА на АЭС с ВВЭР-1200 значительная часть полов покрыта водой.

В перечень варьируемых параметров при анализе неопределенности для задачи переноса ПД в защитной оболочке входили свойства и геометрические характеристики аэрозолей, температура и давление среды в защитной оболочке. В качестве результата для анализа неопределенности рассматривается выброс в окружающую среду для нескольких изотопов. На рисунке 16 приводятся данные по сходимости результатов для выброса Кг-85 в окружающую среду в зависимости от количества расчетов и результаты анализа неопределенности для выброса Кг-85 в окружающую среду для РУ с

## ВВЭР-1000.



*Рис. 16 Сходимость результатов для выброса Kr-85 в окружающую среду в зависимости от количества расчетов (слева) и результаты анализа неопределенности для выброса Kr-85 в окружающую среду (справа) при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР-1000*

Анализ результатов показывает, что сходимость достигается при количестве расчетов, примерно равном 100, что, как и в случае выхода ПД из расплава, превышает оценку по формуле Вилкса. Базовый расчет на протяжении всего времени моделирования лежит примерно в середине диапазона результатов, обусловленного неопределенностью исходных данных и моделей.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе проделанной работы разработан и практически реализован комплексный подход к описанию поведения радиоактивных продуктов деления в условиях запроектных аварий, включая аварии с плавлением топлива. Этот подход позволил обеспечить реалистическое моделирование поведения продуктов деления с использованием физических моделей, соответствующих современному уровню знания. В частности:

1) Разработаны модели выхода ПД из топлива, учитывающие не только влияние температуры топлива, но и особенности поведения различных групп элементов продуктов деления и окислительно-восстановительные свойства теплоносителя в зазоре. Выполнена валидация моделей на большинстве существующих экспериментов по выходу ПД из топлива. Впервые получена и валидирована модель выхода ПД из МОХ топлива. Впервые получена и валидирована модель выхода ПД из топлива в воздушной среде. Модели валидированы на большинстве существующих экспериментов по выходу ПД из топлива;

2) Впервые разработаны модели, позволяющие комплексно решать задачу выхода ПД из структуры типа «дебрис» и из расплава при испарении продуктов деления с поверхности расплава на днище корпуса реактора, при перемещении ПД из корпуса реактора в УЛР, при удержании расплава в УЛР и при взаимодействии расплава с бетоном. Все модели валидированы на существующих экспериментах по выходу ПД из расплава, включая эксперименты по взаимодействию расплава с прототипным для ВВЭР бетоном;

3) Разработаны модели, описывающие поведение ПД в первом контуре РУ и в защитной оболочке. Выполнена валидация моделей на существующих экспериментальных данных. Впервые получена и валидирована модель, описывающая поведение аэрозолей продуктов деления в полидисперсном приближении. Впервые получена и валидирована модель улавливания аэрозолей и соединений йода каплями спринклерной системы;

4) Разработанные модели реализованы в виде программного комплекса, позволяющего выполнять сквозной, взаимосвязанный расчет процессов, влияющих на поведение продуктов деления в условиях запроектной аварии на АЭС с ВВЭР. Выполнена валидация программного комплекса на большом количестве экспериментальных данных. Все программные средства, входящие в комплекс, снабжены модулем анализа неопределенности и чувствительности к не-



определенности исходных данных. Основные входящие в комплекс программные средства аттестованы в Ростехнадзоре.

Выводы:

Решение поставленных задач позволило получить программный комплекс, позволяющий обосновывать радиационную безопасность АЭС в условиях запроектных аварий, включая аварии с плавлением топлива. Разработанные модели расширяют возможность применения программных средств на задачи обоснования радиационной безопасности АЭС, обоснования работоспособности отдельных систем безопасности АЭС, учета влияния работы систем безопасности, таких как спринклерная система, на величину выброса радиоактивных продуктов деления в окружающую среду, расчетного обоснования противоаварийной документации для АЭС с ВВЭР.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:**

*Публикации в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций*

1. *Шмельков Ю.Б., Звонарев Ю.А., Петров Л.В., Шутов Н.В.* Разработка и верификация кода МАВР-ТА для моделирования выхода продуктов деления и их переноса под защитной оболочкой при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2018. Выпуск 5. С. 92-104.
2. *Петров Л.В., Шмельков Ю.Б., Корцеништейн Н.М.* Влияние объемной конденсации паров цезия на перенос аэрозолей в I контуре реакторной установки при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2020. № 9. С. 55-60. (L.V. Petrov, Yu.B. Shmelkov, N.M. Kortsenshteyn The Impact of Cesium Vapor Bulk Condensation on the Transport of Aerosols in the Reactor Plant's Primary Circuit during a Severe Accident at a Nuclear Power Plant with VVER // Thermal Engineering. 2020. V. 67. 634)
3. *Shmelkov Yu.B., Zvonarev Yu.A., Shutov N.V., Petrov L.V.* Development and validation of the MAVR-TA code for analyzing the release and transport of fission products during a severe accident at a VVER NPP. Part 2 – Modelling of the fission products transport in the primary circuit and inside the containment // Nuclear Engineering and Design. 2021. V. 382. 111377.
4. *Shmelkov Yu.B., Zvonarev Yu.A., Shutov N.V., Petrov L.V.* Development and validation of the MAVR-TA code for analyzing the release and transport of fission products during a severe accident at a VVER NPP. Part 1 – Modelling of the release of fission products from the fuel // Nuclear Engineering and Design. 2021. V. 385. 111407.

5. *Савекин С.С., Шмельков Ю.Б.* Моделирование выведения аэрозолей из атмосферы защитной оболочки АЭС с помощью спринклерной системы // Теплоэнергетика. 2022. № 2. С. 16-22. (S.S. Savekin, Yu.B. Shmel'kov Simulation of Aerosol Removal from the Atmosphere of an NPP Containment using a Sprinkler System // Thermal Engineering. 2022. V. 69. 87)
6. *Shmelkov Yu.B, Shutov N.V., Zvonarev Yu.A. Petrov L.V.* Development and validation of the MAVR-TA code for analyzing the release and transport of fission products during a severe accident at a VVER NPP. Part 3 – Modelling of the release of fission products from the melt // Nuclear Engineering and Design. 2023. V. 415. 112694.
7. *Шмельков Ю.Б., Самуйлов Е.В.* Расчет коэффициентов переноса химически реагирующих систем // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20. – С. 523-530.
8. *Melnikov Ivan, Shmelkov Gleb, Golubev Maksim, Velikanov Aleksandr, Shmelkov Yury, and Savekin Sergey* Approaches to radiative heat transfer simulation in a cavity above melt // E3S Web of Conferences. 2023. V. 459. 07011
9. *Савекин С.С., Шмельков Ю.Б.* Анализ влияния распределения аэрозольных частиц по размерам на поведение продуктов деления при моделировании аварии на АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2024. № 8.
10. *Шмельков Ю.Б.* Моделирование поведения радиоактивных продуктов деления при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР с учетом неопределенности исходных данных // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2024. № 2.
11. *Савекин С.С., Шмельков Ю.Б.* Моделирование выведения радиоактивных аэрозолей из атмосферы защитной оболочки каплями спринклерной системы с помощью кода мавр-та // Атомная энергия. 2024. № 1-2.

12. Савекин С.С., Шмельков Ю.Б. Разработка и валидация модели эффективной плотности аэрозолей при тяжелых авариях на АЭС // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2024. № 3. (в редакции)
13. Шмельков Ю.Б., Звонарев Ю.А., Семченков Ю.М. Разработка комплекса кодов для анализа радиационной безопасности при тяжелых авариях на АЭС с ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2024. № 2. (в редакции)

*По результатам работы получено 10 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ:*

14. Шмельков Ю.Б., Звонарев Ю.А., Цаун С.В., Загряжкин В.Н. МАВР-ТА. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616418 от 14.07.2015
15. Шмельков Ю.Б., Шутов Н.В., Петров Л.В. ИРКА. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665783 от 04.12.2019
16. Шмельков Ю.Б., Шутов Н.В., Петров Л.В. Программа для расчета процессов переноса продуктов деления в объеме защитной оболочки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611935 от 12.02.2020
17. Шмельков Ю.Б., Шутов Н.В., Петров Л.В. Программа для расчета процессов осаждения продуктов деления на поверхностях защитной оболочки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616355 от 16.06.2020
18. Шмельков Ю.Б., Шутов Н.В., Петров Л.В., Савекин С.С. Программа для расчета скорости коагуляции аэрозолей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021610830 от 19.01.2021

19. *Шмельков Ю.Б., Шутов Н.В., Петров Л.В., Савекин С.С.* Программа для расчета эффективности улавливания аэрозолей каплями спринклерной системы. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616661 от 26.04.2021
20. *Шмельков Ю.Б., Шутов Н.В., Петров Л.В., Савекин С.С.* Программа для расчета эффективности форетического захвата аэрозолей каплями спринклерной системы. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616610 от 23.04.2021
21. *Шмельков Ю.Б., Шутов Н.В., Петров Л.В., Савекин С.С.* Программа для расчета эффективности улавливания соединений йода каплями спринклерной системы. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021618478 от 27.05.2021
22. *Шмельков Ю.Б., Шутов Н.В., Петров Л.В., Савекин С.С.* Программа расчета скорости роста гигроскопичных аэрозолей за счет поглощения водяного пара. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610092 от 10.01.2022
23. *Яковлева О.В., Шмельков Ю.Б.* МАП-ТА. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614004 от 19.02.2024

Результаты, полученные при выполнении работы, доложены и обсуждены на всероссийских и международных научных конференциях по тематическим проблемам безопасности АЭС, проблемам обоснования радиационной безопасности АЭС и опубликованы в сборниках тезисов докладов.