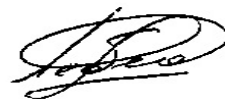


*На правах рукописи*



ЛЕБЕДЕВ Леонид Эдуардович

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РАДИОНУКЛИДОВ ЙОДА В ВЫБРОСАХ ПРИ  
ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ НА АЭС С ВВЭР И ЕЁ РЕАЛИЗАЦИЯ В  
ИНТЕГРАЛЬНОМ КОДЕ

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки,  
включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена на кафедре "Реакторо- и парогенераторостроение" в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" (ФГБОУ ВПО "СПбГПУ").

Научный руководитель

– *Безлепки́н Влади́мир Влади́рович* – доктор техн. наук

Официальные оппоненты:

– *Федорович Евгений Данилович* – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВПО "СПбГПУ", профессор;

– *Афонин Михаил Александрович* – кандидат хим. наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)", доцент.

Ведущая организация – *Научно-исследовательский технологический институт им. А. П. Александрова (НИТИ), г. Сосновый Бор*

Защита диссертации состоится 25 декабря 2012г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29,  
в аудитории 411 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан "23" ноября 2012 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812) 412-9032

E-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь  
диссертационного совета



*К.А. Григорьев*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Анализ радиационных последствий тяжелых аварий, связанных с медленным ростом давления в контейнменте, используется в проектах АЭС с ВВЭР для разработки плана защитных мероприятий для населения и обоснования размеров зон планирования обязательной (экстренной) эвакуации/защитных мероприятий для населения в начальный период радиационной аварии. Размеры зон определяются на основе критериев радиационной безопасности, регламентированных нормативными документами.

Эффективная доза за первые 10 суток аварии формируется, в основном, радионуклидами йода и инертными радиоактивными газами (ИРГ) за счет внешнего облучения от радиоактивного облака и внутреннего облучения при ингаляции. Радиоактивный йод также полностью формирует дозу на критический орган – щитовидную железу.

Анализ поведения радиоактивного йода в условиях тяжелой аварии показал, что йод поступает в контейнмент из системы первого контура преимущественно в виде аэрозолей CsI (~95 %); летучие формы – I, I<sub>2</sub>, HI – составляют не более 5 % от массы всего йода, вышедшего из активной зоны. Содержание органических соединений йода не превышает 0,1 %.

При взаимодействии с водной средой контейнмента (влажный пар, конденсат на поверхностях, аварийный бассейн) аэрозоли CsI растворяются с образованием йодид-иона. Дальнейшее взаимодействие йодид-иона с продуктами радиолиза воды, органическими примесями ведет к образованию летучих форм (молекулярный йод, атомарный йод, метилйодид). Проникая через неплотности защитной оболочки (ЗО), летучие формы радиоактивного йода поступают в окружающую среду. Поэтому важной технической задачей является уменьшение концентраций продуктов деления (ПД), в том числе и йода, в атмосфере контейнмента.

Поведение и транспорт радиоактивного йода в помещениях контейнмента при авариях определяется рядом процессов и механизмов, которые влияют на концентрацию и соотношение различных форм йода в газовой и водной фазах. На ранней фазе начального периода аварийного режима термодинамическое равновесие между формами йода не достигается. Поэтому для определения изменения концентрации и соотношения форм йода во времени и распределения его между фазами по помещениям контейнмента необходимо моделировать все основные протекающие процессы в функции от времени. Эта задача требует создания компьютерной программы, которая может моделиро-

вать все важнейшие кинетические явления. Компьютерные коды позволяют моделировать и предсказывать поведение йода при различных типах аварий и режимов, предоставляют информацию для обоснования стратегии ликвидации последствий аварий и их предотвращения, а также для целей лицензирования новых проектов энергетических реакторов и обоснования их радиационной безопасности.

Для моделирования аварий на АЭС с реактором ВВЭР разрабатывается российский тяжелоаварийный код СОКРАТ. Он содержит код КУПОЛ-М позволяющий рассчитывать теплогидравлические параметры в контейменте. Новая версия кода СОКРАТ/ВЗ содержит модуль оценки накопление ПД в активной зоне реакторной установки, транспорт ПД в первом контуре и выход в атмосферу контеймента. Однако, код КУПОЛ-М не имеет модулей расчета поведения аэрозолей и химии йода. Разработанный модуль в составе кода КУПОЛ-М, дополненный аэрозольной частью, позволяет определять выход радионуклидов за пределы ЗО.

Существующие зарубежные йодные коды (IODE, IMPAIR, LIRIC и др.), реализующие модели прогнозирования поведения и межфазного распределение йода при авариях в контейменте АЭС с PWR, не применимы (без существенных доработок) на реакторах типа ВВЭР. Зарубежные модели и расчетные коды создавались для реакторов типа PWR и BWR, имеющих существенное отличие от отечественных реакторов: различные типы водно-химических режимов (ВХР), конструкционных материалов, защитных покрытий, отсутствие устройств локализации расплава (УЛР) с жертвенным материалом, различные составы растворов систем аварийного охлаждения зоны (САОЗ) и др. Таким образом, состав образующихся аэрозолей и водных сред, а также химических примесей различны.

Оценки выхода йода из ЗО в окружающую среду при тяжелых авариях выполняются в ряде российских организаций, таких как РНЦ "Курчатовский институт", ОАО «НИКИЭТ», ОАО «ГНЦ НИИАР», ОАО «ВТИ», ФБУ «НТЦ ЯРБ», ИБРАЭ РАН, но публикаций по разрабатываемым кодам, результатам расчетов и сравнения с зарубежными аналогами крайне мало.

**Цель работы** заключается в создании модели и расчетного кода для прогнозирования радиационных и экологических последствий аварийных выбросов радиоактивного йода при тяжелой аварии на АЭС с реактором ВВЭР.

Для достижения намеченной цели были поставлены и решены следующие **основные задачи**:

- выполнен анализ существующих зарубежных моделей для оценки летучести йода;
- разработаны алгоритмы оценки концентраций различных летучих форм йода в двухфазных средах в контейнменте;
- выполнены экспериментальные исследования коэффициента распределения йода при различных температурах;
- разработана и апробирована методика расчета концентрации ионов водорода ( $pH$ ) в аварийном приемке;
- выполнены экспериментальные исследования концентраций ионов водорода для растворов соответствующих по составу водным средам в контейнменте;
- на основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика сорбции йода на железооксидном шламе;
- разработана модель сорбции/десорбции летучих форм йода на поверхностях оборудования и строительных конструкциях в условиях, характерных для тяжелых аварий;
- разработан интерфейс для включения йодного модуля в тяжелоаварийный код и выполнены тестовые расчеты.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- создание модели динамики поведения радиоактивного йода при тяжелых авариях на АЭС с реактором ВВЭР;
- в разрабатываемой модели динамики физико-химических форм йода при тяжелой аварии на АЭС учитывается массоперенос химических примесей и влияние их на летучесть йода;
- в описании динамики форм йода в газовой фазе контейнмента впервые учтены процессы радиолиза водяного пара и взаимодействие газообразных компонентов (водород, окислы азота, озон и др.) между собой, подробно описаны процессы взаимодействия молекулярного йода с продуктами радиолиза водяного пара и с компонентами газовой смеси в атмосфере контейнмента;
- разработан и верифицирован йодный модуль, предназначенный для расчета распределения летучих форм йода между аварийным приемком и атмосферой контейнмента при тяжелой аварии.

**Практическая ценность работы** определяется тем, что:

- реализованные методики в виде комплекса программ позволяют подтвердить консервативность инженерных оценок для АЭС с ВВЭР;
- разработанный йодный модуль в составе интегрального тяжелоаварийного кода позволяет получить реалистичные исходные данные по выходу радионуклидов йод в окружающую среду для расчета дозовых нагрузок на персонал и население при тяжелых авариях;
- расчет выброса йода в окружающую среду при авариях с учетом особенностей АЭС с ВВЭР позволяет обосновать эффективность и оптимизировать технические меры по управлению тяжелыми авариями.

**Реализация работы.** Результаты работы использованы при разработке новых технических решений для связывания йода в контейнменте (Ленинградской АЭС-2, Балтийской АЭС), при оценке эффективности удержания йода для Тяньваньской АЭС первой очереди (на 1 и 2 блоках), при обосновании эффективности системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки (СПОТ 30), при обосновании состава жидких радиоактивных отходов (ЖРО), образующихся в результате тяжелой аварии для Тяньваньской АЭС второй очереди (на 3 и 4 блоках).

**Достоверность и обоснованность** результатов работы подтверждается: физической обоснованностью разработанных математических моделей и исходных данных для расчетов; использованием апробированных методик исследований; удовлетворительным согласованием расчетных данных с экспериментальными данными автора и других исследователей.

**Автор защищает:** новую модель реалистической оценки динамики поведения летучих форм йода в двухфазных системах в контейнменте при тяжелых авариях; результаты теоретических и экспериментальных исследований.

**Личный вклад автора** заключается: в постановке задач исследований и разработке алгоритмов их решения; разработке математических моделей; выборе основных методов решения; разработке компьютерного кода, реализующего модели и алгоритмы; внедрение разработанного модуля в интегральный код; проведение верификационных расчетов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на пятой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (Подольск, 2007); заседании руководящей группы МНТЦ по проекту #3345, (Венгрия, 2008); шестой международной научно-технической конференции «Безопас-

ность, эффективность и экономика атомной энергетики» (Москва, 2008); шестой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (Подольск, 2009); научно-техническом совете ФГУП «СПб АЭП» (Санкт-Петербург, 2011); технической экспертизе ПКФ в рамках НИОКР по Ленинградской АЭС (Москва, 2009); V школа-семинар СОКРАТ (Тверь, 2011).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 6 работ, в т. ч. 1 – в изданиях из перечня ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 77 источников, и двух приложений. Она изложена на 150 страницах текста, имеет 24 рисунка и 22 таблицы. Общий объем диссертации – 170 с.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, отмечены научная новизна, практическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

**Глава 1** посвящена анализу существующих методик и кодов для оценки распределения йода.

Публикаций по разработке кодов оценки распределения йода при проектных авариях с учетом особенностей реакторов ВВЭР в открытой печати нет. Существующая методика РБ-020-01 «Методика оценки выбросов соединений йода в атмосферу при авариях на АЭС с реактором ВВЭР» предназначена для анализа проектных аварий и не может быть использована для аварий с плавлением активной зоны.

Для оценки распределения йода применяются результаты, выполненные рабочей группой по изучению поведения йода при авариях на АЭС с PWR и ВВЭР (Committee on the Safety of Nuclear Installation, ECOD, Nuclear Energy Agency), которые показали, что снижение содержания летучих форм йода, в том числе органических, в атмосфере контейнента и в аварийном сбросе может быть гарантировано проектом, если уровень  $pH$  воды приемка в контейненте контролируется и поддерживается в диапазоне 7,0...9,5. В этом случае конверсия I-иона в  $I_2$  минимальна и образование йодорганических соединений сводится к минимуму. Оценка распределения йода в контейненте сводится к надежному обоснованию значения  $pH$  аварийного приемка при развитии аварии с выходом расплава активной зоны (АЗ) за пределы корпуса реактора в соответствии с выбранным сценарием.

Доступных публикаций по описанию зарубежных йодных кодов существует достаточно много, также доступны отчеты по некоторым исследовательским программам (ISP-41, VIP и др.). Однако зарубежные коды являются коммерческим продуктом, и их полное описание отсутствует, также не приводятся ключевые параметры, используемые в моделях.

Существующие коды, такие как IODE (Франция), IMPAIR (Швейцария), INSPECT (Англия), LIRIC (Канада) и др., могут быть использованы как самостоятельные йодные модули, а также в составе генерального тяжелоаварийного кода. Например, код COCOSYS (Германия) включает в себя йодный модуль AIM-3. Этот модуль представляет собой модифицированный йодный модуль IMPAIR с дополнительным модулем химии примесей. Код AIM-3 развивается независимо от кода IMPAIR. Усовершенствование кода осуществляется по результатам таких экспериментов как THAI и VIP. Код IODE входит в состав главного кода ESCADRE. Код INSPECT использован в радионуклид-



ном пакете расчетного кода MELCOR, а йодный код IMPAIR интегрирован с расчетным кодом FIPLOC, что позволяет производить расчеты распределения форм йода между помещениями произвольного расположения и конфигурации.

Все йодные коды могут быть разделены на 2 группы: эмпирические (феноменологические) и механистические. Это деление является условным.

Механистические коды – INSPECT, LIRIC – содержат систему реакций, которая отражает действующие химические процессы: INSPECT – около 150 радиолитических и термальных реакций йода и радиолиза воды (фактически используется 29...60); LIRIC содержит около 200 химических и физических процессов – радиолитических реакций окисления I-иона и восстановления I<sub>2</sub> и IO<sub>3</sub><sup>-</sup>, гидролиза I<sub>2</sub>, образования и разложения органических йодидов, массопереноса O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, I<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>I между фазами и адсорбции-десорбции форм йода на поверхностях. Для всех реакций должны быть известны константы скорости и их температурная зависимость, либо должны быть подобраны для улучшенной сходимости экспериментальных и расчетных данных. Уравнения химических реакций вводятся в численный интеграционный пакет как входные данные и преобразуются в дифференциальные уравнения требуемого формата. Результат решения – концентрация йодов в атмосфере контейнента.

Эмпирические (феноменологические) коды IODE, IMOD и IMPAIR определяют значения констант скорости радиолитических процессов йода из эмпирических уравнений, основанных на корреляции с экспериментальными данными. Модели включают лишь несколько уравнений, представляющих эффект большого числа конкурирующих и последовательных реакций йода. Главным достоинством этого метода перед детальным механистическим моделированием является скорость расчета. Основным недостатком является то, что адекватность модели ограничена базой экспериментальных данных, на которых основывается код. Без проведения интегральных экспериментов с параметрами среды, соответствующими аварийным условиям, такие коды использовать нельзя.

Таким образом, отсутствие кода для надежного обоснования концентраций йодов в атмосфере защитной оболочки с учетом особенностей АЭС с реактором ВВЭР является проблемой. Современные тендерные требования на строительство АЭС за рубежом требуют оценки аварий и радиационной безопасности на основе кодов улучшенной оценки. Разрабатываемый код позволит обосновать применение или отказ от использования различных техниче-

ских решений, влияющих на радиационную безопасность АЭС, а также проводить сквозные расчеты запроектных аварий.

**В главе 2** приведены методики расчета концентраций летучих форм йода в защитной оболочке.

**Химические взаимодействия.** Динамика йода внутри расчетного объема ЗО представлена на рисунке 1.

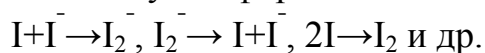


Рисунок 1 – Расчетная схема

Йодид цезия ( $CsI$ ) в виде аэрозолей поступает в приямок, где полностью диссоциирует с образованием йодид-иона ( $I^-$ ). Дальнейшее взаимодействие с продуктами радиолитической воды приводит к образованию элементарного йода. Ключевой реакцией взаимодействия йода с продуктами радиолитической воды является окисление йодид-иона радикалом  $OH\cdot$ :



Последующие диспропорционирование и рекомбинация приводит к образованию летучих форм йода:



Для описания процесса радиолиза воды предлагается использовать набор из 54 реакций, описывающих взаимодействие 9 форм продуктов радиолиза.

При авариях в реактор поступает большое число примесей (продукты деления, конструкционные материалы), которые оказывают влияние на концентрации продуктов радиолиза воды и скорости образования летучих форм йода. В модели предусмотрено 165 реакций для описания таких взаимодействий.

Всем реакциям соответствует система дифференциальных уравнений химической кинетики, содержащая следующие параметры: константы скорости и энергии активации химических реакций, трековые выходы продуктов радиолиза, мощность дозы ионизирующего излучения, температура. Общий вид системы уравнений описывается следующим типом:

$$\frac{d[Y_u]}{dt} = G_u D + \sum_{i,j=1}^M A_{i,j}'' \cdot K_{i,j} [Y_i][Y_j] + \sum_{i=1}^M B_i'' \cdot K_i [Y_i], \quad (1)$$

где  $[Y_u]$  – концентрация соединения;  $G_u$  – трековый радиационный выход частицы  $Y_u$ ;  $D$  – мощность дозы;  $A_{i,j}''$ ,  $B_i''$  – стехиометрические коэффициенты реакций образования (исчезновения) частицы  $Y_u$ ;  $K_i$ ,  $K_{i,j}$  – константы скорости этих реакций (моно- и бимолекулярных).

**pH среды.** Существенное влияние на образование молекулярного йода оказывает концентрация ионов водорода. Основными источниками примесей, влияющих на концентрацию ионов водорода, являются технологические среды (первый контур, САОЗ, баки запаса бора и др.) и аэрозоли, образованные в результате разрушения активной зоны. Для характеристики растворов используют кислотный показатель среды ( $pH$ ), равный отрицательному логарифму концентрации ионов водорода. Для определения этого показателя разработана модель, учитывающая все компоненты, влияющие на  $pH$  и характерные для АЭС с ВВЭР, а также примеси, учет которых необходим согласно международным документам по обоснованию безопасности.

Водная среда контейнента представляет собой смесь слабых кислот (борной, уксусной, муравьиной) и сильных кислот (азотной, соляной, йодоводородной), сильных (KOH, NaOH, CsOH, RbOH и т.п.) и слабых оснований ( $NH_4OH$ ,  $N_2H_5OH$ ). Равновесия в этой смеси являются кислотно-основными. Система, содержащая слабодиссоциирующие кислоты и сильные основания, обладает буферным эффектом, т.е. нивелирует добавки сильных кислот (или оснований), поддерживая  $pH$  в определенных границах.

Основное уравнение для расчета  $pH$  является следствием условия электронеutrальности раствора:

$$[H^+] + [Cs^+] + [Rb^+] + [K^+] + [Na^+] + 2[Ba^{2+}] + 2[Sr^{2+}] + [NH_4^+] + [N_2H_5^+] = \\ = [NO_3^-] + [Cl^-] + [I^-] + [Ac^-] + [HCOO^-] + [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [B(OH)_4^-] + [B_2(OH)_7^-] + \\ + [B_3(OH)_{10}^-] + [B_4O_5(OH)_4^-] + [B_5O_6(OH)_6^-] + [OH^-]. \quad (2)$$

Если обозначить общую концентрацию единичных зарядов щелочных и щелочноземельных металлов с учетом заряда, то:

$$[\text{Катионы}] = [Cs^+] + [Rb^+] + [K^+] + [Na^+] + 2[Ba^{2+}] + 2[Sr^{2+}] \quad (3)$$

Концентрации одновалентных ионов аммиака и гидразина ( $NH_4^+$  и  $N_2H_5^+$ ), одновалентные анионы слабых уксусной и муравьиной кислот, карбонат и бикарбонат-ионы угольной кислоты при известной концентрации  $CO_2$  в воде объединим в одной функции  $[\text{Ионы}]$ , а  $[H^+]$  обозначим за  $x$ , тогда можно записать:

$$[\text{Ионы}] = \frac{x}{x + K_2} C_{NH_3} + \frac{x}{x + K_7} C_{N_2H_4} - \frac{K_5}{K_5 + x} C_{CH_3COOH} - \frac{K_6}{K_6 + x} C_{HCOOH} - \\ - \frac{K_3(x + 2K_4)}{K_3K_4 + K_3x + x^2} C_{CO_2}, \quad (4)$$

где  $K$  – равновесные константы диссоциации соответствующих кислот.

С учетом концентрации единичных зарядов анионов боратов уравнение баланса зарядов можно записать в виде:

$$x + [\text{Катионы}] + [\text{Ионы}] - \frac{B_5(b, x)}{x^3} - [HNO_3] + [HCl] + [HI] - \frac{K_w}{x} = 0, \quad (5)$$

где  $b = [B(OH)_3]$  – концентрация нейтральной формы борной кислоты,

$$B_5(b, x) = K_{11}bx^2 + K_{21}b^2x^2 + K_{31}b^3x^2 + 2K_{42}b^4x + 3K_{53}b^5,$$

$K_{xy}^l = [B_x(OH)_{3x+y}^{y-}][H^+]^y / [B(OH)_3]^x$  константы диссоциации борной кислоты,

$K_w$  – константа диссоциации воды.

Если к уравнению (5) добавить полиномиальное уравнение материального баланса для всех форм борной кислоты:

$$P_5(b, x) = a_0(x)b^5 + a_1(x)b^4 + \dots + a_5(x) = 0, \quad (6)$$

и объединить оба уравнения, то получим неоднородную алгебраическую систему двух уравнений с двумя неизвестными  $x$  и  $b$  высокой степени (восьмой). Численная оценка решений таких систем алгебраических уравнений может быть получена несколькими способами.

Для решения основного уравнения  $pH$  предлагается использовать метод последовательных приближений.

Интервалы возможных концентраций компонентов оценены на основе анализа аварий на АЭС, но возможности расчетной программы шире. Про-

грамма рассчитывает  $pH$  раствора, в котором концентрация одного или нескольких компонентов достигает 1,0 моль/кг, интервал расчета  $pH$  0...14. При ионной силе раствора, более 0,05 моль/кг, учитываются коэффициенты активности ионов в растворе. Для таких растворов производится расчет ионной силы и соответствующего средне-ионного коэффициента активности.

**Сорбция.** При разрушении внутрикорпусных устройств в ЗО поступают конструкционные материалы реакторной установки и жертвенного материала УЛР. Основная водная форма йода – йодид-ион  $I^-$  обладает выраженным свойством сорбироваться на поверхностях гидроокиси железа (шлама) в водном растворе. Максимальная сорбционная концентрация определяется следующим образом:

$$C_{c,max} = \varepsilon \rho_{шл}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  – емкость сорбента, дающая возможность определить максимальное при заданных значениях температуры и  $pH$  количество сорбата, способного быть сорбированным одним граммом гидроокиси.

Решение задачи динамического описания сорбции йодид-иона на водном растворе шлама отличается от сорбции на поверхностях контейнента. Для определения количества сорбированного йода предложено динамическое уравнение

$$\frac{dC_b(t)}{dt} = -a(1 - q(t))C_b(t) + bq(t). \quad (8)$$

где  $q(t)$  – доля площади поверхности частиц сорбента,  $C_b$  – водная концентрации йодид-иона,  $a$  и  $b$  – константы размерностей 1/с и моль/(дм<sup>3</sup>·с) соответственно.

Если принять очевидную связь

$$C_c(t) = C_{c,max}q(t), \quad (9)$$

то кинетические уравнения для концентраций  $C_b(t)$  и  $C_c(t)$  можно записать в виде:

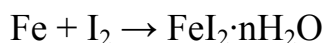
$$\frac{dC_b(t)}{dt} = \alpha [C_c(t) - \chi C_s(t) + \lambda C_c(t)C_s(t)] \quad (10)$$

$$\frac{dC_c(t)}{dt} = \alpha [C_c(t) - \chi C_s(t) + \lambda C_c(t)C_s(t)] \quad (11)$$

Константы  $\chi = K_d \rho_{шл}$  и  $\alpha$  могут быть подобраны из сравнения расчетных и опытных зависимостей. Для расчетов в рамках предложенной йодной модели принято значение  $\lambda = 300$  дм<sup>3</sup>/моль, и это значение подтверждено нами экспериментально.

В водной фазе также рассматривается сорбция на нержавеющей стали и защитных полимерных покрытиях.

Реакция взаимодействия  $I_2$  с поверхностью стали:



Таким образом, химической формой йода, находящегося на поверхности стали в водной фазе, является  $FeI_2$  в гидратированной форме. В воде гидратированный  $FeI_2$  на поверхности частично гидролизуется, что приводит к частичной десорбции йода:



В целом адсорбция  $I_2$  из воды на поверхности стали происходит в соответствии с уравнением:

$$\frac{d[I_2]_B}{dt} = [-k'_{\text{адс}} [I_2]_B + k'_{\text{дес}} [I_2]_{\text{сталь}}] \frac{S_{\text{стали}}}{V_B}, \quad (12)$$

где  $k'_{\text{адс}} = 2,3 \cdot 10^{-9}$  м/с;  $k'_{\text{дес}} = 6 \cdot 10^{-5}$  с $^{-1}$  (25 °С);  $E_a = 80,8$  кДж/моль (для адсорбции).

Оценки показали, что количество адсорбирующегося на стали  $I_2$  будет 0,3 % ч $^{-1}$  от количества  $I_2$  в растворе приямка. Поэтому этот процесс для приблизительных оценок распределения йода в контейнменте несущественен.

В водном растворе полимерные покрытия адсорбируют йод в двух формах:  $I_2$  и  $I^-$ . Процесс адсорбции этих форм подчиняется уравнениям:

$$\frac{d[I_2]_B}{dt} = [-k_{\text{адс}} [I_2]_B + k_{\text{дес}} [I_2]_S] \frac{S_{\text{покр}}}{V_B}, \quad (13)$$

$$\frac{d[I^-]_B}{dt} = [-k_{\text{адс}} [I^-]_B + k_{\text{дес}} [I^-]_S] \frac{S_{\text{покр}}}{V_B}. \quad (14)$$

Скорость адсорбции  $I^-$  значительно ниже, чем  $I_2$  (в 6 и более раз), а скорость десорбции  $I^-$  выше, но эта разница нивелируется с повышением температуры.

Сорбированный  $I_2$  (или  $I^-$ ) в матрице покрытия взаимодействует с органическими радикалами, образующимися при облучении или термическом разложении покрытий, или же реагирует с углеводородными цепями, отщепляя концевые алкильные группы с образованием алкилйодидов. Летучие алкилйодиды быстро десорбируются из покрытия. Преобладающей органической формой является метилйодид ( $CH_3I$ ). Общий выход  $CH_3I$  при десорбции по данным разных авторов (полученных при разных  $pH$ , мощности дозы, концентрациях  $I_2$  и др.) варьирует  $1,5 \cdot 10^{-3} \dots 2$  % от количества адсорбированного йода.

**Реакции в атмосфере защитной оболочки.** Атмосфера контейнента представляет собой сложную физико-химическую систему, в которой протекают процессы химического взаимодействия, конденсации пара и др. В аварийных режимах протекает процесс радиолиза паро-воздушной смеси. Все реакции разделяются два типа: реакции с участием йода и реакции примесей, оказывающих влияние на воздействие на йод.

К первому типу реакций можно отнести:

- термическое восстановление  $I_2$  ( $I_2 + H_2 \leftrightarrow 2 HI$ );
- радиационное восстановление  $I_2$  ( $I_2 + H_2 \rightarrow 2 HI$ );
- радиационное разложение  $HI$  (цепная реакция  $2HI \rightarrow H_2 + I_2$ );
- окисление  $HI$  ( $4HI + O_2 \rightarrow 2I_2 + 2H_2O$ );
- образование  $CH_3I$  ( $CH_3 + I_2 \rightarrow CH_3I + I$  и  $CH_4 + I_2 \rightarrow CH_3I + HI$ );
- радиолитический распад  $CH_3I$  ( $CH_3I \rightarrow CH_3 + I$ );
- термический распад  $CH_3I$  ( $CH_3I \rightarrow CH_3 + I$ );
- окисление  $CH_3I$  ( $CH_3I + O_2 \rightarrow CH_2O + HO$ );
- реакция  $I_2$  с озоном ( $I_2 + O_3 \rightarrow IO_3 + I$ );
- рекомбинация атомарного йода ( $I + I \leftrightarrow I_2$ ).

Ко второму типу относятся реакции:

- окисление азота с образованием окислов азота и нитратов ( $O_3 + N_2 \rightarrow N_2O + O_2$ ,  $NO + O \rightarrow NO_2 + hv$ (гамма-квант) и т.п.);
- радиолитического образования и разложения озона ( $O_2 \leftrightarrow O + O \Rightarrow O_2 + O \leftrightarrow O_3$ );
- взаимодействия с продуктами радиолиза пара ( $H_2O_2 + O_3 \rightarrow H_2O + 2O_2$ ,  $H_2 + OH^\bullet \rightarrow H_2O + H^\bullet$  и т.п.)

Для описания адсорбции-десорбции  $I_2$  на поверхностях полимерных (преимущественно эпоксидных) покрытий используется уравнение:

$$\frac{d[I_2]_{\Gamma}}{dt} = (-k_{ads}[I_2]_{\Gamma} + k_{desI_2}[I_2]_S) \frac{S_S}{V_{\Gamma}}, \quad (15)$$

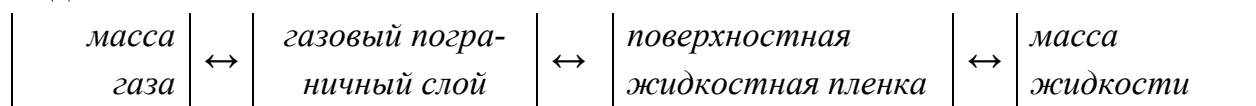
где  $k_{ads}$  – константа скорости адсорбции  $I_2$ , м/с;  $k_{desI_2}$  – константы скорости десорбции  $I_2$ , с<sup>-1</sup>;  $S_S$  – площадь поверхности покрытий в атмосфере контейнента, м<sup>2</sup>;  $V_{\Gamma}$  – свободный объем атмосферы контейнента, м<sup>3</sup>;  $[I_2]_{\Gamma}$ ,  $[I_2]_S$  – концентрация  $I_2$  в газе, (моль/м<sup>3</sup>) и на поверхности (моль/м<sup>2</sup>), соответственно.

Метилйодид ( $CH_3I$ ) эпоксидным покрытием не адсорбируется (установлено экспериментально) и после образования десорбируется с высокой скоро-

стью, поэтому он в покрытии не накапливается, в то время как значительная часть  $I_2$  остается в покрытии.

Значения констант скорости адсорбции и десорбции в разных работах и у разных авторов заметно различаются, что может приводить к искажениям в оценках концентрации летучих форм йода в атмосфере контейнента. Максимальное значение скорости адсорбции ограничивается скоростью массопереноса в газовой фазе – 0,01 м/с. На скорость адсорбции и десорбции влияют температура и облучение. Зависимость в обоих случаях имеет максимумы, так как помимо ускорения массопереноса с ростом температуры происходит выделение связанной воды и растворителей из самого покрытия, а с ростом интегральной дозы усиливается радиолитическое разложение образующегося RI.

**Массоперенос.** Выход летучих форм йода из аварийного приемка в атмосферу ЗО осуществляется путем диффузии в соответствии с двухпленочной моделью.



Массоперенос описывается уравнениями

$$\frac{dC_B}{dt} = k_t \frac{S}{V_B} (H \cdot C_G - C_B); \quad (16)$$

$$\frac{dC_G}{dt} = k_t \frac{S}{V_G} (C_B - H \cdot C_G), \quad (17)$$

где  $C_B$ ,  $C_G$  – концентрация летучей формы йода ( $I_2$ , I, NOI,  $CH_3I$ ) в водной и газовой фазах, моль/дм<sup>3</sup>;  $k_t$  – общая константа переноса, с<sup>-1</sup>;  $S$  – площадь раздела фаз (зеркало), дм<sup>2</sup>;  $V_B$ ,  $V_G$  – объем водной и газовой фазы, дм<sup>3</sup>;  $H$  – коэффициент распределения между фазами данной формы йода.

Коэффициент распределения индивидуального соединения йода принят равным отношению концентраций данного соединения в водной и газовой фазе. В результате корреляционного анализа установлено, что использованные температурные зависимости коэффициента распределения молекулярного йода описывают экспериментальные данные, при доверительной вероятности 0,9 с коэффициентом корреляции 0,999. Относительное среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений при 25 °С составляет 15 %, а в интервале 25...120 °С – в среднем 20 %. Наиболее точно описывает температурную зависимость выражение

$$\log(K(I_2)) = -48,68 - 0,00745 \cdot T + 3185/T + 17,03 \log(T), \quad (18)$$



где  $K(I_2)$  – коэффициент распределения молекулярного йода;  $T$  – температура раствора, °К.

Коэффициенты межфазного распределения метилйодида, получены для его концентраций в растворе  $4 \cdot 10^{-9} \dots 3 \cdot 10^{-6}$  моль/л. Температурная зависимость коэффициента распределения метилйодида может быть описана выражением:

$$\log(K(\text{CH}_3\text{I})) = -3,013 + 1141,8/T, \quad (19)$$

где  $K(\text{CH}_3\text{I})$  – коэффициент распределения метилйодида.

Коэффициент корреляции расчетных и экспериментальных значений коэффициента распределения равен 0,96. Относительное среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных составляет  $\pm 20\%$ . Таким образом, в целом относительная погрешность определения массопереноса летучих форм в газовую фазу составляет  $\pm 20\%$ .

**Глава 3** посвящена разработке кода и внедрения его в интегральный код.

Для описания динамики химических форм необходимо решить систему кинетических уравнений. Основной задачей с точки зрения численных методов является решение задачи Коши (задачи с начальными условиями) для систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Наиболее трудными системами при нахождении численных решений являются нелинейные системы химической кинетики – типичный пример жесткой системы ОДУ.

Жесткой системой называется система, характеризующаяся одновременным наличием для разных компонент решения (или линейных функций от компонент) различных временных масштабов, которые могут отличаться друг от друга на несколько порядков. Это определение зависит, конечно, от временного интервала и рассматриваемого решения.

Для решения системы ОДУ был выбран решатель из свободной математической библиотеки SLATEC, для жестких систем – DDASL. При интеграции было выявлено, что решатель и код КУПОЛ-М имеет программные конфликты. Для правильной совместной работы было модернизировано 26 функция кода DDASL.

Разработанная структура программы представляет собой комплекс из четырех блоков: блок водной химии, блок газовой химии, блок сорбции, блок расчета  $pH$  (рисунок 2).

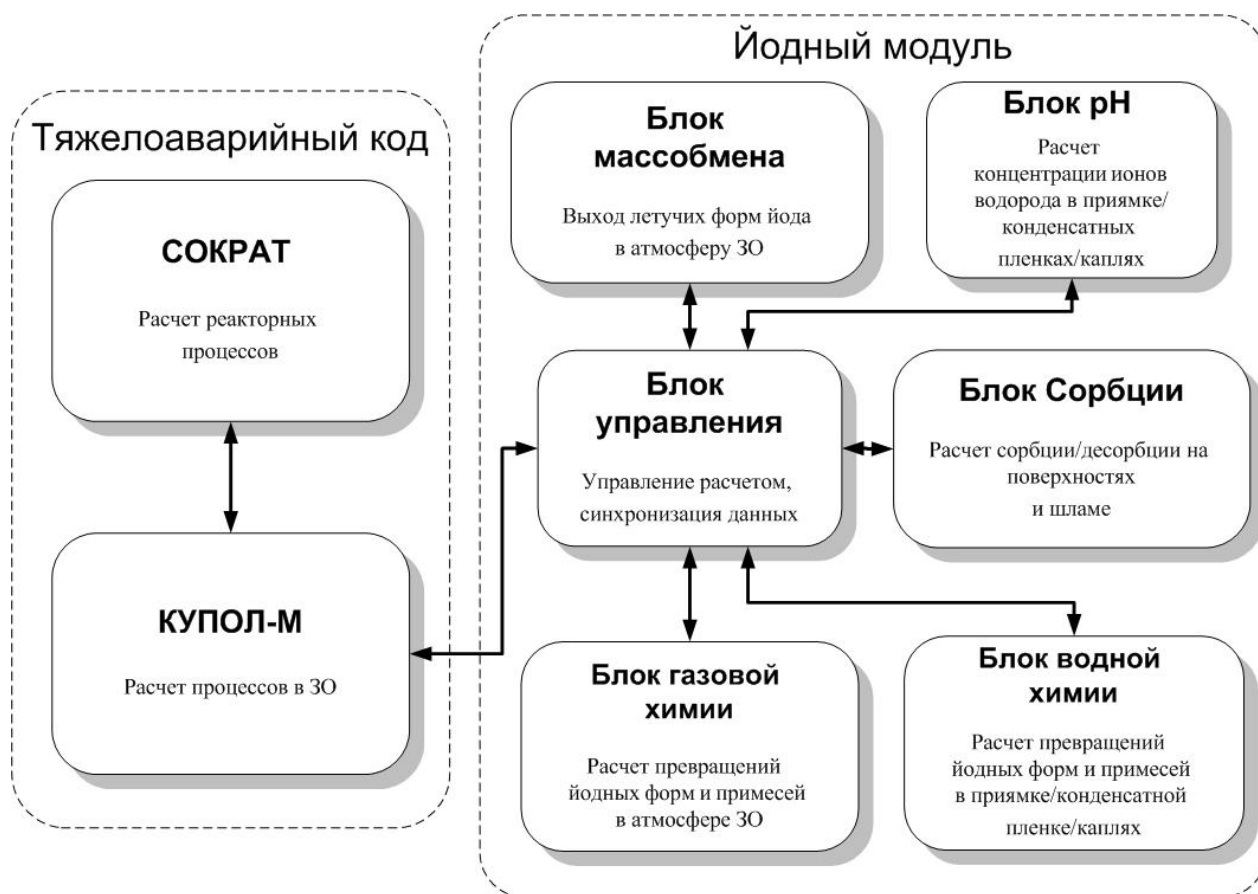


Рисунок 2 – Структура йодного модуля

**Генеральный код.** В качестве генерального кода был выбран теплогидравлический код КУПОЛ-М. Программное средство КУПОЛ-М разработано в ГНЦ РФ ФЭИ. Код предназначен для расчета термодинамических параметров среды в объеме защитных оболочек полного давления для АЭС с ВВЭР с разрывом трубопроводов и течью носителя под ЗО.

Генеральный код позволяет рассчитывать изменение во времени температуры и давления газа в помещениях ЗО, температуры на стенах, временные зависимости концентраций газов (азота, кислорода, пара, водорода, окиси углерода, углекислого газа, гелия и произвольного инертного газа) в помещениях ЗО, интенсивность конденсации пара на поверхностях стен и в объеме помещений ЗО, температуру и массу воды в приемках, массоперенос между помещениями.

Однако для работы йодного модуля необходим большой набор параметров. Поэтому для корректной работы в код были внесены следующие изменения:

- расширен набор газовых компонент ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{I}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{I}$ ,  $\text{I}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NOI}$ ,  $\text{HI}$ ),
- введено отслеживание химического состава среды каждого помещения,

— введена классификация типа покрытия (стальное или полимерное), и другие изменения.

Все данные передаются из генерального кода в управляющий блок йодного модуля. Этот блок осуществляет управление всей работой модуля и обеспечивает интерфейс взаимодействия с генеральным кодом, а также осуществляет внутренний интерфейс между блоками модуля. После вызова процедуры для расчета химии йода управляющий блок выбирает список необходимых моделей (расчетных блоков) на основе критерия запуска. Произведя расчет, передает результат в генеральный код для дальнейшего расчета.

Компьютерный код йодного модуля разработан на языке Fortran 77, являющимся стандартом компьютерного кода для подобных программ. Способы передачи данных между блоками, обмен данными были выбраны с учетом особенностей кода КУПОЛ-М.

Сборка исполняемого файла кода КУПОЛ-М с йодным модулем осуществляется с помощью компилятора, входящего в состав пакета Compaq Visual Fortran 6.

**Глава 4** посвящена экспериментам и тестовым расчетам по оценке pH и концентрациям йода, применению разработанного модуля ПС при проектировании АЭС с ВВЭР-1000.

Эксперименты, моделирующие процессы поведения динамики йода на различных стадиях тяжелой аварии от плавления АЗ до выхода в окружающую среду, являются многофакторными и отсутствуют в публикациях.

Для экспериментального исследования исследуемых параметров выбирают отдельные процессы и явления. Часть параметров заменяют имитаторами, например, радиоактивный аэрозоль заменяют нерадиоактивным с идентичным физико-химическими свойствами. Для изучения влияния радиационных полей, создаваемых при авариях, используется источник Со-60.

В работе представлены результаты экспериментального определения  $pH$  для растворов соответствующих по составу водным средам в контейнменте при нормальных условиях эксплуатации, проектных и запроектных авариях. При выборе состава анализируемых растворов были учтены такие компоненты, как борная кислота, щелочные катионы, аммиак, гидразин, неорганические и органические кислоты. Анализируемые растворы, pH которых составил 3...9 при температурах 25...120°C, охватили весь диапазон возможных водных сред на АЭС. Оценена надежность и точность полученных данных, относительная погрешность определения 3,6 %, отклонение расчетных значений  $pH$  от экспериментальных составляет 0,1...0,5 единиц  $pH$ .

Рассмотрены имеющиеся опубликованные данные расчета динамики  $pH$ . Набор данных ограничен, полнота параметров, описывающих систему, недостаточна для точных расчетов. Произведен расчет динамики  $pH$  для одного из тестов RTF (**R**adioiodine **T**est **F**acility).

Показано, что отклонение расчетных и экспериментальных значений  $pH$  в стационарных условиях составляет 0,1...0,2 и относительное отклонение 2,5 %. Экспериментальное определение  $pH$  в сложных системах составляет 25...35 %. Поэтому полученная сходимость результатов в пределах 4...10 % характеризует откорректированную модель и расчетную программу как достаточно точные для расчета динамики  $pH$  водной среды аварийного бассейна. Результаты тестов динамики  $pH$  в условиях массопереноса в другие помещения с отличающимися параметрами сред не обнаружены.

Для верификации модели сорбции на шламе была выполнена серия экспериментов. Одна часть экспериментов выполнялась при облучении и при высоких температурах (50...120 °С). Запаянные ампулы помещались в облучающую установку и после извлекались для измерения. Другая часть опытов без облучения выполнялась в автоклавной установке. Установка предназначена для исследований межфазного распределения, летучести и сорбции форм йода и параметров среды в режимах реального времени и с отбором проб до и после опыта (эксперименты выполнены в рамках проекта МНТЦ №3345).

В экспериментах без облучения при одинаковых начальных условиях (температура, концентрация йодид-иона в воде) расчет демонстрирует рост коэффициента распределения йода с увеличением  $pH$ . При  $pH$  в диапазоне 4...6 эта тенденция выражена слабо, но становится очевидной при  $pH > 6$ , в эксперименте такая зависимость явно не прослеживается из-за недостатка данных. Добавление в исходный раствор железо-гидроокисного шлама (при заданной температуре и близких  $pH$ ) может вызвать как незначительное увеличение коэффициента распределения йода, так и его падение. Расчет предсказывает в обоих случаях падение коэффициента распределения. Возможно, что при  $pH$  больше 6...7 и температуре выше 60 °С протекает гетерогенное окисление йодид-иона трехвалентным железом, но это предположение требует дополнительных экспериментальных исследований.

При облучении коэффициент распределения йода (при одинаковых  $pH$ , температуре и моменте отбора проб) падает на порядок величины относительно опытов без облучения. Изменение коэффициента распределения с  $pH$  не прослеживается в интервале  $pH$  4,9...6,4 и при температуре, равной 60 °С.

С введением гидроокисного шлама при 95 °С и 120 °С коэффициент распределения возрастает в 2...10 раз.

Экспериментальные и расчетные значения коэффициента распределения йода в исследованном диапазоне  $pH$ , начальных концентраций йодид-иона и температур с учетом достигнутой точности измерений согласуются. Таким образом, была подтверждена адекватность расчетных моделей.

На основе расчетов выполненных экспериментов и расчетов по данным, полученным из имеющихся литературных источников, можно заключить, что предложенная кинетическая модель адекватно описывает гидролиз йода в температурном диапазоне 25...120 °С, и интервале  $pH$  3...10, а также при начальных концентрациях йода  $10^{-1} \dots 10^{-6}$  г/дм<sup>3</sup>.

Тестовые расчеты по модели радиолитического распада йода были выполнены по данным экспериментов ISP-41 (International Standard Problem) Stage1 и Stage2. В этих экспериментах под облучением происходила сорбция на стальных поверхностях, так что соответствующие уравнения модели учтены при расчете.

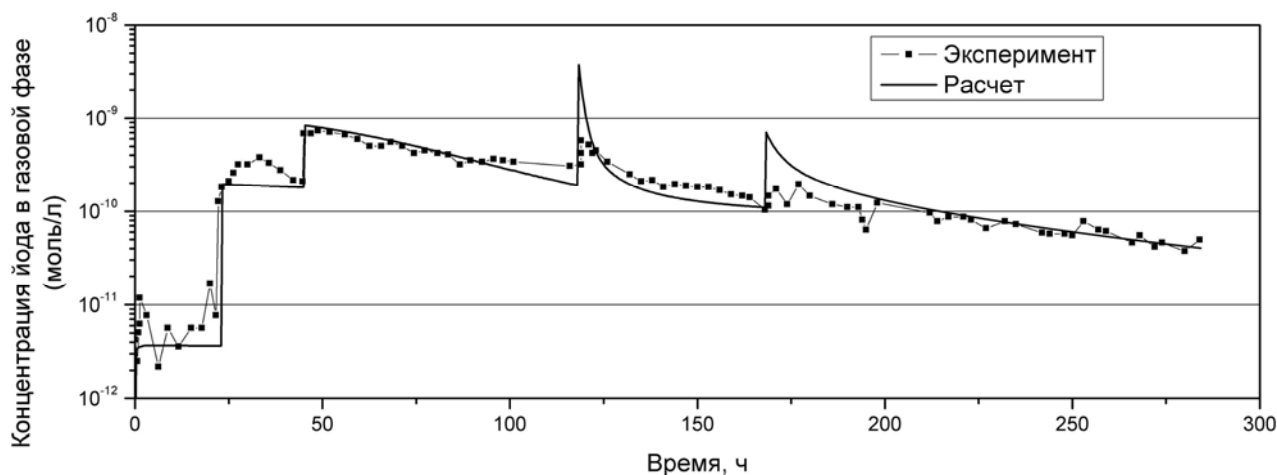


Рисунок 3 – График зависимости концентрации йода от времени облучения в газовой фазе при 25 °С для Stage2

Динамика изменения концентраций летучих форм йода полностью коррелирует с динамикой изменения  $pH$ . Увеличение концентрации летучих форм йода в газовой фазе при уменьшении  $pH$  полностью соответствуют теории и предположениям, используемым при анализе аварий.

Разработанный расчетный модуль использован при разработке системы поддержания  $pH$  в контейнменте с целью ограничения образования летучих форм йода в атмосфере и, как следствие, снижению аварийного выброса в окружающую среду на начальном этапе тяжелой аварии на энергоблоке с ВВЭР-1000 (рисунок 4).

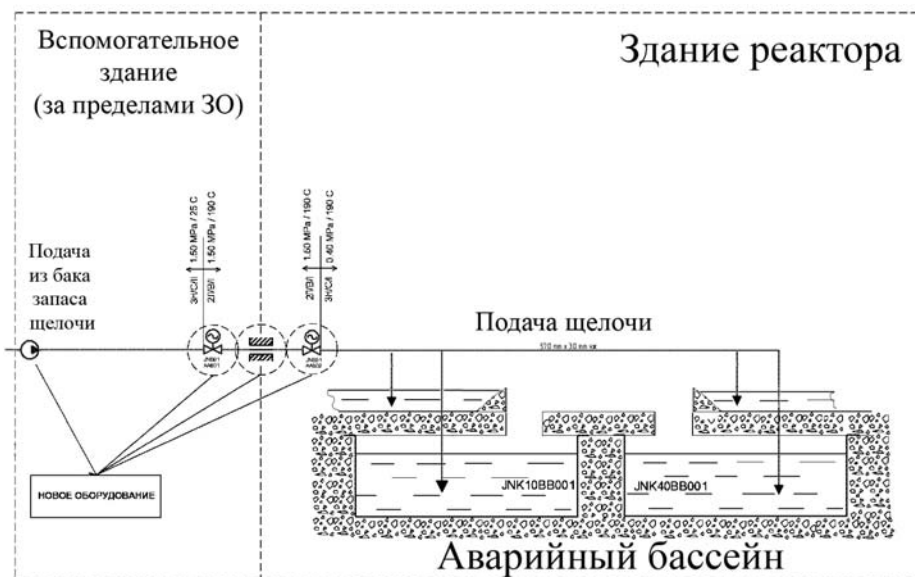


Рисунок 4 – Система аварийного ввода щелочи ЛАЭС-2

«Йодная» проблема решена путем поддержания и контроля  $pH$  в контейнменте выше 8 в течение первых суток за счет пролива 30 % раствора NaOH в аварийный приямок (проект Тяньваньской АЭС) и в баки аварийного запаса борной кислоты (проект АЭС-2006 ЛАЭС-2, БТАЭС). Пролив осуществляется оператором с БПУ/РПУ по показаниям датчиков о начале плавления топлива. На последующих фазах аварии при восстановлении энергоснабжения на энергоблоке, как показали оценки, не ожидается существенного снижения уровня  $pH$ . Уровень  $pH$  по-прежнему контролируется на уровне не менее 8, что обеспечивается за счет пролива 15...30 м<sup>3</sup> щелочного раствора из баков химических реагентов спринклерной системы.

Данное решение обеспечивает поддержание содержания летучих форм йода в контейнменте и аварийном выбросе, связанном с утечками в окружающую среду через неплотности, на низком уровне. Надежно подтверждены приемочные критерии радиационной безопасности для населения при тяжелых запроектных авариях на энергоблоке (таблица 1).

Разработанная модель принята как первая версия программы расчета концентраций йодных форм в газовой и водной фазах, а также расчета коэффициентов распределения йода в двухфазной системе. Эта версия учитывает влияние примесей (аммиака и его продуктов радиолиза, борной кислоты, ионов железа и др.), а также сорбцию/десорбцию йода полимерным покрытием и сорбцию на железистом шламе.

Таблица 1 – Предотвращаемая доза за первые десять суток

Расстояние, км	Внутреннее облучение за счет ингаляции, Гр	
	без использования системы подавления йода	с использованием сис- темы подавления йода
<b>1,0</b>	1,69E+01	<b>4,97E-01</b>
5,0	3,23E+00	9,50E-02
<b>15,0</b>	<b>2,86E-01</b>	8,41E-03

Дальнейшее развитие моделей и разработка расчетных модулей связана с проведением локальных и крупномасштабных экспериментов по распределению йода с учетом особенностей проекта АЭС с ВВЭР (например, тип покрытий, компоновка контейнента, системы локализации, параметры среды в контейненте). Длительность экспериментов должна соответствовать времени отдаленных фаз протекания аварии (более 30 суток).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Установлено, что для описания распределения йода на АЭС с ВВЭР и проведения сквозных расчетов тяжелых аварий с выходом ПД за пределы защитной оболочки, необходимо разработать модель оценки распределения йода между атмосферой и аварийным приемком. Показаны отличия АЭС с ВВЭР от PWR в части водно-химических параметров систем аварийной защиты, использования органосиликатных и эпоксидных покрытий (ОС-51-03, ЭП-525, ЭП-569 и т. д.), применения УЛР, влияющего на состав поступающих в контейнент аэрозолей.

2. Предложена кинетическая модель для расчета концентраций йода в водной и газовой фазах, учитывающая 250 химических реакций в водной фазе и 25 реакций в газовой фазе; впервые для подобных кодов предложена модель сорбции йодид-иона на железоксидном шламе; предложен рациональный алгоритм решения системы дифференциальных уравнений с 5 % точностью в интервале изменения начальной концентраций йода  $10^{-1} \dots 10^{-6}$  г/дм<sup>3</sup>; предложена модель расчета концентраций ионов водорода с учетом NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, NaOH и др.

3. Создан компьютерный расчетный код, который внедрен в теплогидравлический контейнентный код КУПОЛ-М; код КУПОЛ-М дополнен переносом химических примесей между помещениями, в нем увеличено число

учитываемых газовых компонент ( $I_2$ ,  $CH_3I$ ,  $CO_2$ ,  $Cl_2$  и др.). Программный продукт позволяет проводить сквозные расчеты экспериментов и тяжелых аварий на АЭС.

4. Экспериментально установлено, что при наличии в растворе железоксидного шлама в диапазоне температуры 95...120 °С наблюдается увеличение образования летучих форм йода в 2...10 раз. На основе лабораторных экспериментов верифицирована модель расчета кислотного показателя среды для растворов, соответствующих аварийным, при температурах 25...125°С; отклонение расчетных значений  $pH$  от экспериментальных составляет 10%; проведена верификация моделей гидролиза и радиолиза йода с использованием результатов автоклавных экспериментов и экспериментов ISP-41 в диапазоне температуры 25...120 °С,  $pH$  3...10 и гамма-облучения 0,5..5 кГр/ч, сходимость расчетных и экспериментальных данных составила не более порядка.

5. Разработанный расчетный модуль использован при разработке системы поддержания  $pH$  в контейнменте с целью ограничения образования летучих форм йода в атмосфере и, как следствие, снижению аварийного выброса в окружающую среду на начальном этапе тяжелой аварии на энергоблоке с ВВЭР (проекты АЭС с ВВЭР-1000 Тяньваньская АЭС первой и второй очереди, Ленинградская АЭС-2, Балтийская АЭС).

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

#### **Ведущие рецензируемые научные журналы из перечня ВАК**

1. Лебедев Л.Э. Моделирование динамики йода в защитной оболочке при авариях на АЭС с ВВЭР / Л.Э. Лебедев, В.В. Безлепкин, С.Е. Семашко [и др.] // Атомная энергия. 2010. № 109. С. 46–51.

#### **Статьи в трудах, материалах международных и всероссийских конференций, в сборниках научных трудов**

2. Лебедев Л.Э. Распределение радиоактивного йода при тяжелой аварии на АЭС / Л.Э. Лебедев // Десятая международная молодежная научная конференция «Полярное сияние 2007. Ядерное будущее: безопасность, экономика и право»: Сборник тезисов докладов, СПб, 29 января–3 февраля 2007 г.– М.: МИФИ, 2007.– С. 196–198.
3. Ампелогова Н.И. Моделирование динамики физико-химических форм радиоактивного йода в защитной оболочке / Н.И. Ампелогова, А.С. Фролов, Л.Э. Лебедев [и др.] // Пятая международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР – 2007»: Сборник тезисов докладов, Подольск, 29 мая–1 июня 2007 г.– Подольск: Изд-во ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2007.– С. 33.
4. Ампелогова Н.И. Разработка современного кода по реалистической оценке кинетики радиоактивного йода в условиях тяжелой аварии на реакторах типа ВВЭР / Н.И. Ампелогова, А.С. Фролов, Л.Э. Лебедев [и др.] // Шестая Международная научно-техническая конференция концерна «Росэнергоатом» «Безопас-



ность, эффективность и экономика атомной энергетики»: Сб. тезисов докладов, Москва, 21 – 23 мая 2008 г.– М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2008.– С. 201–202.

5. Гаврилов А.С. Воздействия АЭС на население и окружающую среду (на примере сооружаемой Балтийской АЭС) / Гаврилов А.С., Карасева М.А., Лебедев Л.Э., Фролов А.С., Харченко Е.В. // Международная научная конференция «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании». Москва, Россия, 17 – 19.10.2012. Сборник трудов «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании». Научное издание. М., 2012
6. Безлепкин В.В. Разработка программного комплекса по оценке поведения продуктов деления в контейменте при авариях на АЭС с ВВЭР / В.В. Безлепкин, С.Е. Семашко, И.М. Ивков, М.А. Затевахин, И.А. Потапов, А.С. Фролов, Л.Э.Лебедев //Шестая Международная научно-техническая конференция концерна «Росэнергоатом» «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР – 2009»: Сборник тезисов докладов, Подольск, 26–29 мая 2009 г.– Подольск: Изд-во ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2009.– С. 156.

[Электронные носители]

1. Ампелогова Н.И. Моделирование динамики физико-химических форм радиоактивного йода в защитной оболочке / Н.И. Ампелогова, А.С. Фролов, Л.Э. Лебедев [и др.] // 5-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР – 2007»,  
ULR=<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/f64.pdf>
2. Безлепкин В.В. Разработка программного комплекса по оценке поведения продуктов деления в контейменте при авариях на АЭС с ВВЭР / В.В.Безлепкин, С.Е.Семашко, И.М.Ивков, М.А.Затевахин, И.А.Потапов, А.С.Фролов, Л.Э.Лебедев // 6-я МНТК концерна «Росэнергоатом» «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР – 2009»: CD-DISK, Подольск, 26–29 мая 2009 г.– Подольск: Изд-во ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2009.– 13 с.