ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2025, № 9, с. 75–83

АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВ ГАЗОВЫХ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ БЫСТРОГО РЕАКТОРА В МОДУЛЕ AEROSOL/LM ИНТЕГРАЛЬНОГО КОДА ЕВКЛИД/V2[1]

© 2025 г. Д. С. Синицын[a, *], М. В. Воривончик[a], Д. А. Назаров[a], Н. А. Мосунова[a], А. А. Сорокин[a, **]

[a] Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Большая Тульская ул., д. 52, Москва, 115191 Россия

**e-mail: synitcyn@ibrae.ac.ru*

***e-mail: sorokin@ibrae.ac.ru*

Поступила в редакцию 29.01.2025 г.
После доработки 02.04.2025 г.
Принята к публикации 24.04.2025 г.

Одно из требований при обосновании безопасности проектируемых и строящихся реакторных установок со свинцовым теплоносителем – оценка последствий возможного выхода продуктов деления из ядерного топлива в теплоноситель во время аварии с разгерметизацией части твэлов. Следовательно, актуальной является разработка модели и расчетного модуля на ее основе для моделирования взаимодействия растворенных в расплаве свинца летучих продуктов деления (изотопов йода, цезия и других радионуклидов) с пузырьками газообразных продуктов деления (изотопы ксенона и криптона). Учет этого процесса весьма важен при обосновании безопасности реакторных установок со свинцовым теплоносителем, так как взаимодействие растворенных в расплаве свинца летучих продуктов деления с пузырьками газообразных продуктов деления влияет на содержание в расплаве свинца растворенных радионуклидов и на выход радионуклидов в газовую полость над расплавом свинца. Последующая миграция радионуклидов в газовом контуре реакторных установок приводит к перераспределению активности радионуклидов в нем и способствует выходу активности вследствие нарушения герметичности его элементов в помещения реакторных установок и систему вентиляции. Кроме того, пузырьки газообразных продуктов деления в расплаве свинца взаимодействуют с растворенными в расплаве изотопами водорода (протий и тритий) и способствуют их выходу в газовый контур реакторных установок. В данной работе представлены результаты разработки модели и соответствующего программного блока и его внедрения в модуль AEROSOL/LM в составе интегрального кода ЕВКЛИД/V2 для расчета поведения пузырьков инертных радиоактивных газов, включая взаимодействие пузырьков с растворенными в расплаве свинца радионуклидами и выход пузырьков в газовую полость реактора. В целях проверки правильности программной реализации моделей в коде представлены данные по верификации разработанного модуля на результатах решения тестовых задач.

Ключевые слова: быстрый реактор, свинцовый теплоноситель, радионуклиды инертных газов, летучие продукты деления, пузырьки газов, всплытие пузырьков, газовая полость, перенос продуктов деления

DOI: 10.56304/S0040363625600089

Перенос радионуклидов в I контуре реактора на быстрых нейтронах (далее – быстрый реактор) со свинцовым теплоносителем зависит главным образом от скорости теплоносителя, фазового состояния радионуклидов в расплаве свинца (растворенная примесь в расплаве, газовая примесь в составе пузырьков, твердые частицы) и реализуемых в теплоносителе физико-химических процессов поведения радионуклидов. Растворенные в жидкометаллическом теплоносителе радионуклиды могут как представлять собой примесь атомов, так и находиться в составе различных молекулярных соединений. Газовые пузырьки в расплаве свинца могут состоять из технических инертных газов (гелий, аргон, водород, азот),

[1] Исследование выполнено в рамках второго этапа государственного контракта № Н.4о.241.19.24.1035 от 04.04.2024 на выполнение научно-исследовательских работ “Развитие интегрированной системы кодов нового поколения для разработки, обоснования безопасности, оптимизации и проведения виртуальных испытаний технологий и установок ПЭК. Этап 2024–2026 гг.”.

инертных радиоактивных газов (криптон и ксенон) и различных летучих продуктов деления. Также возможно появление пузырьков, состоящих преимущественно из паров воды, образующихся вследствие частичной разгерметизации трубок парогенератора и попадания пароводяной смеси в высокотемпературный расплав свинца [1, 2].

Программный модуль миграции радионуклидов AEROSOL/LM верифицирован и валидирован для задач, связанных с численным моделированием поведения продуктов деления в I контуре быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем (натрий, свинец, свинец–висмут). Модуль имеет общую с теплогидравлическим кодом HYDRA-IBRAE/LM схему нодализации, а также может работать совместно с модулем БЕРКУТ-У в составе интегрального кода ЕВКЛИД/V2 [3, 4]. Важно отметить, что моделирование распределения массы радионуклидов в элементах реакторных установок позволяет вычислять возможную поглощенную дозу излучения в помещениях электростанции, а также оценивать интенсивность источника выделения активности в окружающую среду при аварийной разгерметизации твэлов.

Определяющими в части радиационной активности в помещениях реакторной установки являются вышедшие из твэлов радионуклиды, которые обладают высокой миграционной способностью в жидкофазном теплоносителе. Основные радионуклиды в данном случае – это инертные радиоактивные газы (изотопы ксенона и криптона) и летучие радионуклиды (тритий, изотопы йода и цезия).

Появление радионуклидов в газовой полости над расплавом свинца вызвано главным образом дегазацией растворенных в расплаве продуктов деления и выходом пузырьков с радионуклидами в их составе к поверхности раздела сред. Дальнейшее поведение продуктов деления определяется переносом газопаровой смеси и аэрозолей продуктов деления в газовом контуре вместе с потоком защитного газа, включая осаждение на поверхность трубопроводов контура, образование радиоактивных отложений и выход радионуклидов в помещения реакторной установки (вследствие нарушения герметичности) и систему вентиляции.

Таким образом, пузырьки газообразных и летучих продуктов деления в жидком теплоносителе являются дополнительным к дегазации механизмом выхода растворенных в расплаве радионуклидов в газовую полость над расплавом. Этот механизм обусловлен растворением радионуклидов из расплава свинца в объеме газовых пузырьков с последующим всплытием их к поверхности раздела расплава и газовой полости реактора.

Важно отметить, что пузырьки изначально могут различаться между собой по газовому составу, например пузырьки технического газа при барботаже расплава свинца и пузырьки газообразных продуктов деления при разгерметизации твэлов. Кроме того, вследствие растворения в объеме пузырьков летучих продуктов деления из расплава свинца газовый состав в них также может меняться. Следовательно, пузырьки в расплаве свинца практически всегда будут многокомпонентными. При этом скорость всплытия пузырьков будет определяться доминирующим по массе газом, содержащимся в них. Однако радиационная активность пузырька будет зависеть от концентрации и постоянной распада всех радионуклидов, масса которых может и не влиять на перенос и скорость всплытия пузырька.

Следовательно, модель поведения пузырьков продуктов деления в расплаве свинца должна учитывать образование и изменение со временем многокомпонентных по составу пузырьков. Целью данной публикации является представление результатов разработки такой модели в модуле AEROSOL/LM и ее внедрения в состав интегрального кода ЕВКЛИД/V2.

ОБЗОР ЭКПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальных данных о поведении радионуклидов в свинцовом теплоносителе не так уж и много, в особенности по термодинамике растворения радионуклидов в расплаве свинца и скорости их выхода в защитный газ в зависимости от температуры расплава. Также мало экспериментальных данных о составе и термодинамике растворения молекулярных соединений, состоящих из смеси различных радионуклидов и атомов свинца. Одним из наиболее известных является проект MEGAPIE со свинцово-висмутовым (PbBi) теплоносителем, облучаемым протонами при энергии 575 МэВ [5]. Результаты исследований в рамках этого проекта показали, что основными летучими радионуклидами из свинцово-висмутового теплоносителя являются изотопы Po, Bi, Pb, Hg, Xe, I, Cs, Cd, Kr, Rb, Br в атомарном состоянии и в составе соединений со свинцом.

В работе [6] анализируются результаты теоретических и экспериментальных исследований возможности образования различных соединений йода и их поведения в свинцовом теплоносителе при температурах, близких к температуре в быстром реакторе [7]. Согласно результатам экспериментальных исследований [8], в системе йод – свинец основным молекулярным соединением, содержащим йод, является PbI_2. Однако при высоких температурах расплава (больше 1200°C) образуются также PbI и I_2. В работе [7] отмечается, что после

разгерметизации какого-либо твэла изотопы йода могут поступать в свинцовый теплоноситель сразу в виде соединения с изотопами цезия. Анализ результатов экспериментальных исследований, выполненных в Институте реакторных материалов, показал, что при делении тяжелых ядер выход цезия больше, чем йода [9]. Поэтому дополнительно к PbI_2 в объеме газовых пузырьков и газовой полости над расплавом свинца возможно появление также и CsI. При этом при барботаже свинца в рабочей емкости экспериментального устройства газовой смесью аргона с водородом происходил интенсивный выход йода из свинца вследствие растворения PbI_2 в объеме пузырьков аргона и последующего всплытия пузырьков к поверхности раздела с газовой полостью.

За рубежом исследования по дегазации различных радионуклидов в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе проводили главным образом для свинцово-висмутовой эвтектики. Обобщение полученных результатов представлено, например, в работах [10, 11]. Приведенные результаты подтверждают, что изотопы газообразных продуктов деления (Xe, Kr) и активированного аргона полностью выходят в газовую полость над расплавом. Для задержки изотопов йода в теплоносителе определяющее значение имеет образование слаболетучих соединений с компонентами теплоносителя, главным из которых является PbI_2.

РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В работе [12] приведен инженерный метод расчета, позволяющий вычислить активность реперных радионуклидов в элементах I контура опытной реакторной установки БРЕСТ-ОД-300. Однако в данной модели не учитываются неоднородность распределения концентрации радионуклидов по длине контура циркуляции, а также многокомпонентный состав радионуклидов в объеме пузырьков и наличие летучих продуктов деления одновременно как в растворенном виде в расплаве свинца, так и в составе пузырьков. Кроме того, отсутствует возможность с помощью представленного расчетного метода моделировать изменение активности радионуклидов в контуре с теплоносителем и в газовой полости реактора совместно с изменениями теплогидравлических параметров теплоносителя.

В [13] приведены модели кода TRAIL (Transport of RAdionuclides In Liquid metal systems) разработки Агентства по атомной энергетике Японии (JAEA – Japan Atomic Energy Agency) применительно к проблеме миграции продуктов активации в системе охлаждения ускорителя на основе свинцово-висмутового теплоносителя. Образование продуктов активации происходит при взаимодействии теплоносителя и примесей с пучком протонов с последующим переносом их по контуру циркуляции. Гидравлический режим теплоносителя в контуре циркуляции непосредственно в данном коде не моделируется, а определяется входными параметрами модели. Выход продуктов активации из теплоносителя моделируется в приближении идеального раствора с заданными коэффициентами относительной летучести. При этом в моделях данного кода не учитываются образование пузырьков газообразных продуктов деления и переход растворенных в теплоносителе радионуклидов в объем таких пузырьков.

Из последних опубликованных работ можно отметить публикации [14, 15], в которых представлены трехмерные модели и результаты CFD-расчетов (CFD – Computational Fluid Dynamics) динамического поведения пузырьков водяного пара в расплаве эвтектики свинец–висмут применительно к компоновке реакторных установок на быстрых нейтронах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Однако в этих моделях не рассматриваются физико-химическое взаимодействие пузырьков с теплоносителем и поведение радионуклидов в теплоносителе.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

Уравнения моделей поведения продуктов деления, находящихся в растворенном состоянии и в пузырьках, в модуле AEROSOL/LM основаны на законе сохранения массы радионуклидов в объеме каждой пространственной ячейки из связанной сети ячеек, аппроксимирующей каналы и камеры контуров реакторной установки со свинцовым теплоносителем и защитным газом. В базовом варианте модели пузырьки предполагаются сферическими, монодисперсными и состоящими из смеси инертных газов и летучих продуктов деления, которые растворяются в объеме пузырьков. Соответственно диаметр пузырьков определяется экспериментальной корреляцией для пузырьков среднего диаметра в зависимости от параметров свинцового теплоносителя [12, 16]. Данная модель соответствует предположению о равновесии между процессами коагуляции и фрагментации полидисперсных пузырьков [17].

В объеме каждой расчетной ячейки циркуляционного контура теплоносителя предполагается однородное распределение концентрации пузырьков и растворенных в расплаве примесей. Пузырьки переносятся между ячейками циркуляционного контура со скоростью теплоносителя. В приближении модели в сосредоточенных параметрах учитывается всплытие пузырьков для ячеек, в которых есть поверхность раздела с газовой полостью, взаимодействие пузырьков со стенка-

ми контура не учитывается. Состав газовой смеси в объеме пузырьков предполагается многокомпонентным и определяется как разными источниками появления пузырьков (технический газ при барботаже, газообразные продукты деления из негерметичных твэлов), так и дегазацией различных радионуклидов, растворенных в расплаве свинца, внутрь объема пузырьков. Масса радионуклидов в объеме пузырьков для каждой расчетной ячейки зависит также от переноса пузырьков вместе с теплоносителем между ячейками и скорости всплытия пузырьков для ячеек с поверхностью раздела с газовой полостью. Химическое взаимодействие и фазовые переходы примесей в объеме пузырьков не учитываются.

Таким образом, состояние и состав газовой смеси пузырьков в объеме каждой расчетной ячейки определяются следующими параметрами:

$d = d_{\max}$ – диаметр пузырька, м;

$S_b = \pi d^2$ – площадь поверхности пузырька, м^2 (b – от англ. bubble);

$V_b = \pi d^3/6$ – объем пузырька, м^3;

ρ_g – плотность газа в пузырьке, кг/м^3 (g – от англ. gas);

$m_b = \rho_g V_b$ – масса пузырька, кг;

M_{Ar}^{bub}, M_{Xe}^{bub}, M_{Kr}^{bub} – общая масса аргона (гелия), изотопов ксенона, изотопов криптона в пузырьках, кг (bub – от англ. bubbles);

M_{FP}^{bub} – набор масс моделируемых продуктов деления (FP – от англ. fission products) в пузырьках, кг.

Давление газа в пузырьках p_g рассчитывается по соотношению

$$p_g = p_{\mathrm{Pb}} + 4\sigma_{\mathrm{Pb}}/d,$$

где p_{Pb} – давление в расплаве свинца, Па; σ_{Pb} – энергия поверхностного натяжения жидкого свинца при температуре расплава (коэффициент поверхностного натяжения), Н/м.

Среднюю молярную массу газа в пузырьках MM_g вычисляют с использованием массовых долей $x_i = M_i^{bub} \big/ M_g^{bub}$ и молярных масс MM_i компонентов газа

$$M_g^{bub} = M_{\mathrm{Ar}}^{bub} + M_{\mathrm{Xe}}^{bub} + M_{\mathrm{Kr}}^{bub} + \sum_{\{FP\}} M_{FP}^{bub} = \sum_i M_i^{bub};$$

$$\frac{1}{MM_g} = \sum_i \frac{x_i}{MM_i},$$

где M_g^{bub} – суммарная масса газа в объеме пузырьков в данной расчетной ячейке, кг.

Соответственно плотность газовой смеси в объеме пузырьков равна

$$\rho_g = \frac{p_g MM_g}{RT},$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К).

Концентрация пузырьков N_{bub} в теплоносителе рассчитывается по соотношению

$$N_{bub} = \frac{M_g^{bub}}{m_b V_c},$$

где V_c – объем расчетной ячейки в расплаве свинца, м^3 (c – от англ. cell).

Таким образом, основными моделируемыми переменными, для определения которых в модели используются дифференциальные уравнения, являются массы всех компонентов пузырьковой фазы: $M_{\mathrm{Ar}}^{bud}(t)$, $M_{\mathrm{Xe}}^{bub}(t)$, $M_{\mathrm{Kr}}^{bub}(t)$, $M_{FP,i}^{bub}(t)$ (здесь t – время; индекс i соответствует компонентам летучих продуктов деления в пузырьках).

СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Появление пузырьков ксенона и криптона, слаборастворимых в расплаве свинца, в свинцовом теплоносителе, а также растворимых в расплаве свинца продуктов деления связано с их выходом из негерметичных твэлов. Соответственно в модели рассматриваются источники нерастворимого газа (Ar, Xe, Kr), образующего пузырьки в расплаве свинца, G_i^{bub}, кг/с, и источники для каждого из рассматриваемых продуктов деления, растворимых в расплаве свинца и поступающих в объем i-й расчетной ячейки, $G_{FP,i}$, кг/с, где множество $\{FP\} = FP_1, FP_2, \ldots$ – конечный набор рассматриваемых компонентов продуктов деления.

В модели предполагается, что диаметр образующихся пузырьков сразу имеет некоторое равновесное значение при данной температуре и скорости теплоносителя в соответствии с корреляцией экспериментальных данных.

Перенос пузырьков вместе с теплоносителем моделируется при скорости теплоносителя, при этом не учитывается эффект скольжения фаз. Изменение массы компонентов в пузырьковой фазе в рассматриваемой расчетной ячейке, а также растворенных в расплаве свинца примесей зависит от притока пузырьков вместе с теплоносителем из ячеек ниже по потоку и стока пузырьков из данной ячейки в ячейки выше по потоку. Соответственно в модели переноса пузырьков вводятся характерное время пребывания теплоносителя τ_i, с, в расчетной ячейке i, определяемое расходом теплоносителя через ячейку и объемом ячейки, и

распределение потока теплоносителя $f_{j\to i}$ из ячейки j по всем связям с ячейками i, где $\sum_i f_{j\to i} = 1$. Значения параметров τ_i и $f_{j\to i}$ вычисляются на каждом расчетном шаге по времени по данным для потока теплоносителя из теплогидравлического модуля.

Для модели в сосредоточенных параметрах всплытие вверх пузырьков моделируется как сток их массы из рассматриваемой расчетной ячейки при некоторой характерной скорости U_{up}, м/с, зависящей от диаметра пузырьков, плотности газа в них и свойств теплоносителя. В модели предполагается, что для слоя расплава высотой H, м, до поверхности раздела с газовой полостью характерная скорость стока массы пузырьков составляет $2U_{up}/H$. Соответственно моделируется изменение массы компонентов из состава газовой смеси в объеме пузырьков для расчетной ячейки в газовой полости над расплавом свинца M_X^g, где X обозначены, например, компоненты Ar, Xe, Kr, $FP_1, FP_2, \ldots$ Для расчетных объемов в теплоносителе, которые не содержат поверхность раздела с газовой полостью, полагается $U_{up} = 0$ и однородное распределение пузырьков и растворенных примесей в расчетной ячейке.

Взаимодействие между пузырьками и растворенными в расплаве свинца примесями различных продуктов деления моделируется в приближении коэффициента массообмена через поверхность пузырьков k_{FP}^m, м/с (m – от англ. mass exchange). При этом равновесное значение массы компонента в объеме пузырьков $M_{FP,i}^{bub-eq}$ для i-й расчетной ячейки (eq – от англ. equilibrium) определяется в приближении закона Рауля [равновесная масса компонента в газовой фазе над раствором пропорциональна массовой доле компонента в расплаве $x_{FP,i} = M_{FP,i}/M_{\mathrm{Pb},i}$ (здесь $M_{FP,i}$, $M_{\mathrm{Pb},i}$ – масса продуктов деления и теплоносителя, кг) и равновесной плотности компонента в газе над расплавом при температуре расплава $\rho_{FP,i}^{bub-sat}(T)$ (sat – от англ. saturated)]:

$$M_{FP,i}^{bub-eq} = \rho_{FP,i}^{bub-sat} V_{bub,i} x_{FP,i},$$

где $V_{bub,i}$ – объем пузырьков в i-й расчетной ячейке, м^3.

В базовом варианте модели для коэффициента массообмена используется приближение $k_{FP}^m = 2D_{FP}^{\mathrm{Pb}}/d$ (здесь D_{FP}^{Pb} – коэффициент диффузии примеси продукта деления в расплаве свинца, м^2/с). Вследствие отсутствия достоверных экспериментальных данных для вычисления D_{FP}^{Pb} используется формула Стокса с учетом температуры и вязкости расплава. В общем случае коэффициент массообмена вычисляется с помощью числа Шервуда $\mathrm{Sh} = k_{FP}^m d/D_{FP}^{\mathrm{Pb}}$, для которого в модели используется формула Ранца – Маршалла с зависимостью от чисел Рейнольдса и Шмидта для потока теплоносителя и диаметра пузырьков.

Далее рассматривается система уравнений для расчета взаимодействия между растворенными в расплаве свинца летучими продуктами деления и пузырьками газообразных продуктов деления (Xe, Kr) и инертного газа (например, Ar). Индексы j и i соответствуют номерам расчетной ячейки в нодализационной схеме каналов реакторной установки. Также в уравнениях для летучих продуктов деления для удобства их представления рассматривается только один компонент, так как учет нескольких компонентов происходит простым дублированием соответствующих уравнений с индексом FP.

Инертный технический газ в объеме пузырьков:

$$\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{Ar},i}^{bub}}{\mathrm{d}t} = G_{\mathrm{Ar},i}^{bub} + \sum_{j,j\to i} f_{j\to i}\frac{M_{\mathrm{Ar},j}^{bub}}{\tau_j} - \frac{M_{\mathrm{Ar},i}^{bub}}{\tau_i} - \frac{2U_{up,i}}{H_i} M_{\mathrm{Ar},i}^{bub}.$$

Инертные газовые продукты деления в объеме пузырьков:

$$\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{Xe},i}^{bub}}{\mathrm{d}t} = G_{\mathrm{Xe},i}^{bub} + \sum_{j,j\to i} f_{j\to i}\frac{M_{\mathrm{Xe},j}^{bub}}{\tau_j} - \frac{M_{\mathrm{Xe},i}^{bub}}{\tau_i} - \frac{2U_{up,i}}{H_i} M_{\mathrm{Xe},i}^{bub};$$

$$\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{Kr},i}^{bub}}{\mathrm{d}t} = G_{\mathrm{Kr},i}^{bub} + \sum_{j,j\to i} f_{j\to i}\frac{M_{\mathrm{Kr},j}^{bub}}{\tau_j} - \frac{M_{\mathrm{Kr},i}^{bub}}{\tau_i} - \frac{2U_{up,i}}{H_i} M_{\mathrm{Kr},i}^{bub}.$$

Продукты деления в объеме пузырьков:

$$\frac{\mathrm{d}M_{FP,i}^{bub}}{\mathrm{d}t} = \sum_{j,j\to i} f_{j\to i}\frac{M_{FP,j}^{bub}}{\tau_j} - \frac{M_{FP,i}^{bub}}{\tau_i} - \frac{2U_{up,i}}{H_i} M_{FP,i}^{bub} + k_{FP,i}^m \frac{S_{bub,i}}{V_{bub,i}}\left(M_{FP,i}^{bub-eq} - M_{FP,i}^{bub}\right),$$

где $S_{bub,i}$, $V_{bub,i}$ – площадь поверхности, м^2, и объем, м^3, всех пузырьков в расчетной ячейке.

Продукты деления, растворенные в свинцовом теплоносителе:

$$\frac{\mathrm{d}M_{FP,i}}{\mathrm{d}t} = G_{FP,i} + \sum_{j,j\to i} f_{j\to i}\frac{M_{FP,j}}{\tau_j} - \frac{M_{FP,i}}{\tau_i} - k_{FP,i}^m \frac{S_{bub,i}}{V_{bub,i}}\left(M_{FP,i}^{bub-eq} - M_{FP,i}^{bub}\right).$$

Газ над свинцовым теплоносителем:

$\frac{\mathrm{d}M^{g}_{\mathrm{Ar},i}}{\mathrm{d}t} = \frac{2U_{up,i}}{H_i} M^{bub}_{\mathrm{Ar},i}$ + перенос по газовому контуру;

$\frac{\mathrm{d}M^{g}_{\mathrm{Xe},i}}{\mathrm{d}t} = \frac{2U_{up,i}}{H_i} M^{bub}_{\mathrm{Xe},i}$ + перенос по газовому контуру;

$\frac{\mathrm{d}M^{g}_{\mathrm{Kr},i}}{\mathrm{d}t} = \frac{2U_{up,i}}{H_i} M^{bub}_{\mathrm{Kr},i}$ + перенос по газовому контуру;

$\frac{\mathrm{d}M^{g}_{FP,i}}{\mathrm{d}t} = \frac{2U_{up,i}}{H_i} M^{bub}_{FP,i}$ + перенос и физико-химические процессы в газовом контуре.

МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ГАЗОВОМ КОНТУРЕ

Для расчета поведения полидисперсных многокомпонентных аэрозолей продуктов деления в газовом контуре используется метод фракций, в котором непрерывный спектр массы полидисперсных частиц аппроксимируется набором отдельных мод (дельта-функций). Выбор в качестве переменной именно массы частиц, а не диаметра вызван необходимостью в общем случае моделировать многокомпонентные радиоактивные частицы из нескольких радионуклидов в виде атомов или в составе молекулярных соединений [18–21].

Одной из основных отличительных особенностей расчетной модели модуля переноса радионуклидов в интегральном коде ЕВКЛИД/V2 является возможность моделирования динамики различных компонентов в контурах реакторной установки с учетом их индивидуальных свойств, т.е. без объединения радионуклидов в небольшое число групп с некоторыми одинаковыми свойствами для всех компонентов в группе (как принято в большинстве расчетных кодов). Это позволяет моделировать поведение каждого значимого с точки зрения радиационной безопасности радионуклида. В свою очередь, это дает возможность наиболее точно рассчитывать накопление активности на поверхностях элементов контура, в теплоносителе и защитном газе в режиме нормальной работы реактора и, следовательно, достоверно определять состав радионуклидов и дозу радиации при возможных авариях с протечкой теплоносителя или при появлении неплотности в газовой системе контура.

В аэрозольном модуле поведения продуктов деления в газовом контуре рассматриваются следующие процессы:

нуклеация аэрозолей из паровой фазы (одновременно для всех возможных паров в зависимости от локальных параметров среды и индивидуальных термодинамических свойств паров);

испарение расплава с последующим образованием аэрозолей из паров расплава в газе;

выход продуктов деления из расплава жидкометаллического теплоносителя в газ вследствие дегазации;

коагуляция многокомпонентных частиц аэрозоля с учетом изменения как массы, так и состава результирующих частиц (различные механизмы);

конденсация паров продуктов деления на поверхность частиц аэрозоля и стенки каналов и помещений;

осаждение аэрозольных частиц на поверхности (различные механизмы);

перенос аэрозолей по каналам неизотермического газового контура вместе с потоком технического газа.

Главной отличительной особенностью модели поведения аэрозолей продуктов деления в газовом контуре в модуле AEROSOL/LM является учет многокомпонентного состава и полидисперсности радиоактивных аэрозолей, включая моделирование многокомпонентного состава отложений на поверхностях контура.

ПРИМЕР РЕЗУЛЬТАТОВ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛИ

Валидация и кросс-верификация модели поведения многокомпонентных пузырьков в расплаве свинца на уровне только какого-то одного явления затруднены из-за отсутствия достоверных экспериментальных данных, которые соответствовали бы именно этому явлению с конкретными газовыми продуктами деления. Поэтому их проведение возможно лишь на результатах более широких интегральных экспериментов. Итоги валидации и кросс-верификации модели будут рассмотрены в следующей публикации авторов.

Для проверки правильности реализации в программном коде модели взаимодействия пузырьков газообразных продуктов деления с растворенными в расплаве свинца летучими продуктами деления с последующим всплытием пузырьков и выходом продуктов деления в газовую полость над расплавом был проведен соответствующий тестовый расчет.

Рассматривали вертикальную трубу диаметром 1 м, заполненную расплавом свинца высотой слоя 3 м и слоем аргона над расплавом высотой 1 м. Температура двухфазной среды в трубе составляла 812 K (539°C), давление – 0.1 МПа. В расплав свинца в течении 10 с подавали Xe и Kr расходом 10^{-4} кг/с (пузырьковая фаза) и Cs расходом 10^{-5} кг/с (растворяемая в свинце примесь). Для упрощения анализа результатов расчета диаметр

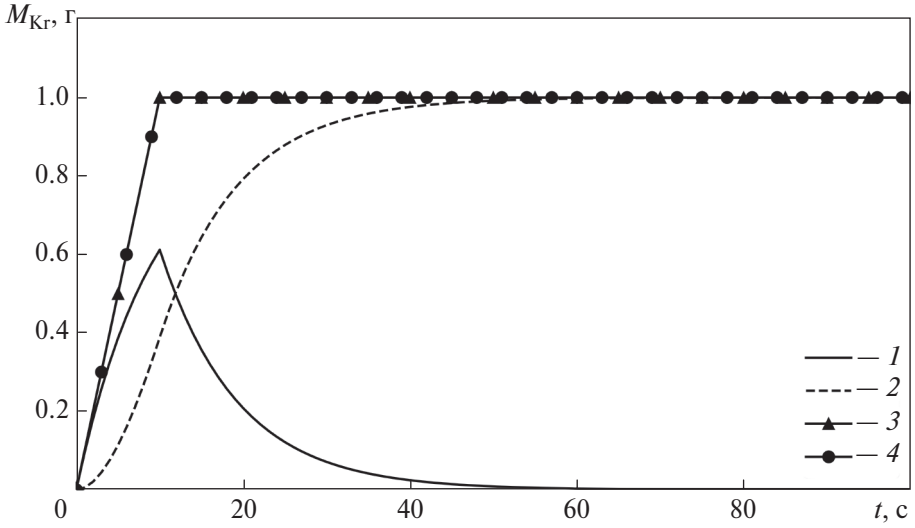


Рис. 1. Зависимость массы криптона M_{Kr} в пузырьках (*1*), газовой полости (*2*), газовой полости и пузырьках (*3*) и вышедшего из источника (*4*) от времени t

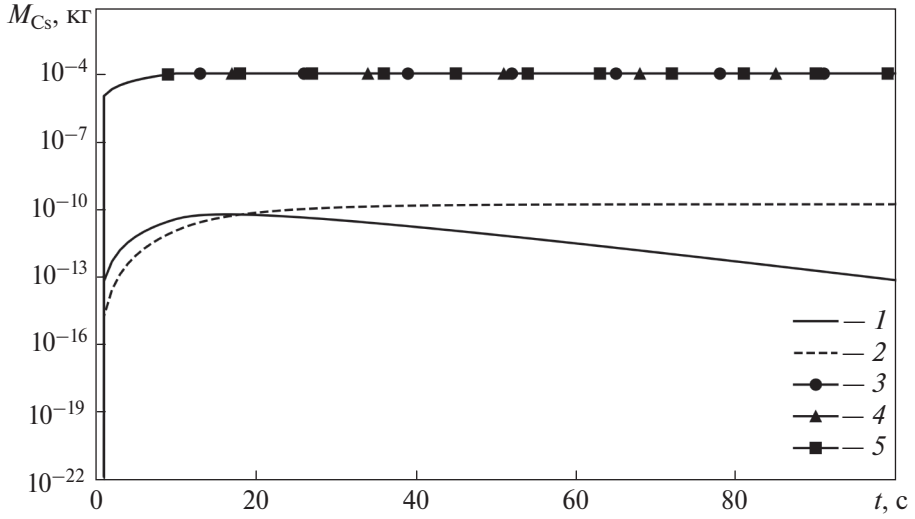


Рис. 2. Зависимость массы цезия M_{Cs} в пузырьках (*1*), газовой полости (*2*), растворенного в теплоносителе (*3*), растворенного в теплоносителе, пузырьках и газовой полости (*4*) и вышедшего из источника (*5*), от времени t

пузырьков принимали равным 0.001 м. Цель расчета – проверить выполнение закона сохранения массы газов в системе и определить динамику изменения массы цезия в расплаве, пузырьках и полости газа над расплавом с учетом конечного времени действия источника газов и всплытия пузырьков к поверхности раздела.

Результаты расчета изменения массы криптона в элементах системы приведены на рис. 1. Погрешность расчета суммарной массы криптона составила менее 0.005%. Аналогичные данные получены и для распределения массы ксенона в элементах системы.

На рис. 2 представлены результаты расчета массы цезия во времени в элементах системы. Из рисунка следует, что растворенный в расплаве цезий не успевает полностью перейти в пузырьки, так как они быстро всплывают. Соответственно выход летучего цезия в газовую полость над расплавом вместе с пузырьками прекращается после исчерпания пузырьков ксенона и криптона в расплаве.

Важно отметить, что появление в расплаве свинца пузырьков водяного пара способствует их взаимодействию с газовыми пузырьками. Это явление относится к специфическому типу аварий с разгерметизацией трубок парогенератора. Дан-

ная работа посвящена модели, которая может использоваться для изучения аварий, связанных с выходом продуктов деления из-под оболочки твэлов в теплоноситель. Появление водяного пара в газовых пузырьках в расплаве свинца инициирует в той или иной степени окисление паров свинца в пузырьках с образованием водорода и паров оксида свинца и, соответственно, приводит к необходимости учитывать в модели дополнительно несколько новых явлений. Рассмотрение данного механизма требует заметного усложнения модели поведения паров и газов в пузырьках. Авторы планируют доработать модель в текущем году.

ВЫВОДЫ

1. Для разработанной модели взаимодействия растворенных в расплаве свинца летучих продуктов деления с пузырьками инертного газа и газовых продуктов деления реализованы основные механизмы поведения радионуклидов в свинцовом теплоносителе, включая образование пузырьков ксенона и криптона, перенос пузырьков вместе с теплоносителем, всплытие и выход радионуклидов вместе с пузырьками в газовый объем.

2. При моделировании поведения газовых пузырьков в жидкометаллическом теплоносителе необходимо учитывать наличие в теплоносителе нескольких источников пузырьков разного состава, включая последующее образование в теплоносителе многокомпонентных пузырьков, изменение их состава вследствие поглощения растворенных в теплоносителе радионуклидов и взаимодействия пузырьков между собой.

3. Полученные результаты верификации показали, что интегральный код ЕВКЛИД/V2 с модулем поведения продуктов деления в свинцовом теплоносителе и газовом контуре может эффективно использоваться для моделирования миграции радионуклидов в технологических системах реакторных установок со свинцовым теплоносителем и описания образования и поведения пузырьков газовых продуктов деления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Проект** “Прорыв” – технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики / Е.О. Адамов, Р.М. Алексахин, Л.А. Большов, А.В. Дедуль, В.В. Орлов, В.А. Першуков, В.И. Рачков, Д.А. Толстоухов, В.М. Троянов // Изв. РАН. Энергетика. 2015. № 1. С. 5–13.
2. **Обоснование** радиационной безопасности БРЕСТ-ОД-300 / Н.Е. Дубенков, А.В. Проухин, А.А. Бажанов, В.П. Васюхно, В.В. Лемехов, А.В. Моисеев, Г.А. Хачересов, А.А. Киселев, С.Н. Красноперов // Атомная энергия. 2021. Т. 130. Вып. 4. С. 223–228.
3. **Физические** модели для расчета разрушений твэла и активной зоны реактора с жидкометаллическим теплоносителем, реализованные в коде ЕВКЛИД/V2 / А.А. Бутов, В.С. Жданов, И.А. Климонов, И.Г. Кудашов, А.Э. Кутлиметов, Н.А. Мосунова, А.А. Сорокин, В.Ф. Стрижов, С.А. Фролов, Э.В. Усов, В.И. Чухно // Теплоэнергетика. 2019. № 5. С. 5–15. https://doi.org/10.1134/S0040363619050023
4. **Аттестационный** паспорт. Динамический интегральный универсальный расчетный код для анализа и обоснования безопасности АЭС с реакторными установками на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями. Версия 2.19 (ЕВКЛИД/V2.19). М.: Росатом, 2024.
5. **Neuhausen J., Schumann D.** Vapour phase concentrations of volatile nuclear reaction products in the MEGAPIE cover gas // J. Nucl. Mater. 2011. V. 415. Is. 3. P. 361–366. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.04.049
6. **Дубенков Н.Е., Васюхно В.П., Хачересов Г.А.** Возможные соединения йода в свинцовом теплоносителе реактора БРЕСТ-ОД-300 // Ядерная и радиационная безопасность. 2021. № 1 (99). С. 5–13.
7. **Технические** решения и этапы разработки реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 / Ю.Г. Драгунов, В.В. Лемехов, С.С. Смирнов, Н.Г. Чернецов // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 1. С. 58–64.
8. **Synthesis** and characterization of PbI_2 polycrystals / X.H. Zhu, Bing-Jie Zhao, S.F. Zhu, Y.R Jin // Crystal Res. Technol. 2006. V. 41. Is. 3. P. 239–242. https://doi.org/10.1002/crat.200510567
9. **Экспериментальные** исследования скоростей выхода продуктов деления из свинца в газ при условиях эксплуатации РУ БРЕСТ-ОД-300 / Н.Е. Дубенков, М.С. Моркин, В.В. Лемехов Г.А. Хачересов, В.П. Васюхно, А.В. Барыбин // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: сб. тезисов докл. V Междунар. науч.-техн. конф. Москва, 2–5 октября 2018 г. М.: НИКИЭТ, 2018. С. 238–239.
10. **Retention** of radionuclides in heavy liquid metal coolants for mechanistic source term analysis / I. Trivedi, J. Sienicki, M. Bucknor, K. Ivanov // Proc. of the Intern. Conf. on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering. Jeju, South Korea, 16–20 Apr. 2017.
11. **Development** and validation of analysis code for spallation products behavior in LBE coolant system of ADS comparing with the distribution data in MEGAPIE spallation target / S. Miyahara, Y. Arita, K. Nakano, F. Maekawa, T. Sasa, H. Obayashi, H. Takei // Nucl. Eng. Des. 2023. V. 403. P. 112147.
12. **Драгунова А.В., Моркин М.С., Перевезенцев В.В.** Особенности методов контроля герметичности оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2021. № 3. С. 84–96.
13. **Preliminary** development and validation of ACENA code for heavy liquid metal-gas two phase flow simulation / Y. Chen, D. Zhan, Y. Liang, S. Wang, Q. Yu, C. Wang, W. Tian, S. Qiu, G. Su // Ann. Nucl. Energy. 2021. V. 161. Is. 1. P. 108452. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108452

14. **Numerical** simulation and model development of drag coefficient of bubbles in gas-liquid metal two-phase flow / L. Liu, H. Luo, J. Yuan, R. Bao, D. Li, X. Tian // Int. J. Multiphase Flow. 2024. V. 178. P. 104890. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.104890
15. **Numerical** simulation of bubble migration characteristics and distribution probability under lead-cooled fast reactor during SGTR accident / H. Luo, L. Liu, J. Yuan, R. Bao, D. Li, X. Tian, H. Gu // Ann. Nucl. Energy. 2025. V. 213. P. 111173.
16. **Верещагина Т.Н., Лемехов В.В., Моркин М.С.** Гидравлика газлифтного зонда со свинцовым теплоносителем // Сб. тезисов докл. науч.-техн. конф. “Теплофизика реакторов нового поколения (Теплофизика-2020)”. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 23–25 сент. 2020 г.
17. **Федотовский В.С., Верещагина Т.Н., Орлов Ю.И.** Модель коагуляции пузырьков, вводимых струйным инжектором в поток тяжелого жидкометаллического теплоносителя // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2007. № 1. С. 92–102.
18. **Сорокин А.А.** Моделирование коагуляции аэрозолей продуктов деления // Атомная энергия. 2015. Т. 118. Вып. 4. С. 228–232.
19. **Сорокин А.А.** Моделирование динамики аэрозолей продуктов деления в первом контуре // Атомная энергия. 2015. Т. 118. Вып. 3. С. 162–167.
20. **Сорокин А.А., Назаров Д.А.** Тестирование аэрозольного модуля для расчета образования отложений на поверхности первого контура ВВЭР // Атомная энергия. 2017. Т. 123. Вып. 4. С. 230–233.
21. **Моделирование** поведения аэрозолей продуктов деления в защитной оболочке / Д.А. Назаров, Д.С. Синицын, Н.А. Мосунова, А.А. Сорокин // Теплоэнергетика. 2022. № 9. С. 57–65. https://doi.org/10.56304/S0040363622090028

Simulating the Behavior of Gaseous Fission Product Bubbles in the Fast Reactor Lead Coolant in the AEROSOL/LM Module of the EUCLID/V2 Integrated Computer Code

D. S. Sinitsyn[a], *, M. V. Vorivonchik[a], D. A. Nazarov[a], N. A. Mosunova[a], and A. A. Sorokin[a], **

[a] *Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences (IBRAE RAS), Moscow, 115191 Russia*

**e-mail: synitcyn@ibrae.ac.ru*

***e-mail: sorokin@ibrae.ac.ru*

Abstract—One of the requirements that have to be met is substantiating the safety of newly designed and constructed lead cooled reactors is to evaluate the consequences from possible escape of fission products from nuclear fuel into the coolant during an accident in which part of fuel pins lose their leak tightness. Hence, it is of relevance to develop a model and a computation module based on this model for simulating the interaction of volatile fission products dissolved in the lead melt (iodine and cesium isotopes, and other radionuclides) with the bubbles of gaseous fission products (xenon and krypton isotopes). The consideration of this process is very important in substantiating the safety of lead cooled reactors, because the interaction of volatile fission products dissolved in the lead melt with the bubbles of gaseous fission products has an effect on the content of dissolved radionuclides in the lead melt and on the release of radionuclides into the gas space above the lead melt. The subsequent migration of radionuclides in the reactor gas circuit results in that the activity of radionuclides becomes redistributed in the circuit. It also facilitates the release of activity, as a consequence of loss of leak tightness of the circuit components, into the reactor rooms and the ventilation system. In addition, the bubbles of gaseous fission products in the lead melt interact with the hydrogen isotopes dissolved in the melt (protium and tritium) and facilitate their escape into the reactor gas circuit. The article presents the results from the development of the model and corresponding software unit, and its incorporation into the AEROSOL/LM module, which is part of the EUCLID/V2 integrated code, for calculating the behavior of inert radioactive gas bubbles, including the interaction of bubbles with the radionuclides dissolved in lead melt and the release of bubbles into the reactor gas space. To check how correctly the models are implemented in the code by means of software, the article presents data on the verification of the developed module based on the results of solving test problems.

Keywords: fast reactor, lead coolant, inert gas radionuclides, volatile fission products, gas bubbles, bubble floating-up, gas space, fission product transport