

7. **Cyclotron** based production of Tc-99m. — In: IAEA Radioisotopes and Radiopharmaceuticals. Rep. № 2. IAEA: Vienna, 2017, p. 8.
8. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Статистическая физика. Ч. I. М.: Физматлит, 2002.
9. **Schiott H.** Approximations and interpolation rules for ranges and range straggling. — Rad. Eff., 1970, v. 6, p. 107—113.
10. **Ziegler J., Ziegler D., Biersack J.** The stopping and range of ions in matter. — Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 2010, v. 268, № 11—12, p. 1818—1823.
11. **Брауэр Г.** Руководство по неорганическому синтезу. Т. 5. М.: Мир, 1985.

Поступила в Редакцию 28.12.17

УДК 621.039.58

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И ПЕРЕНОСА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В 1-М КОНТУРЕ БЫСТРОГО РЕАКТОРА С ПОМОЩЬЮ МОДУЛЯ AEROSOL-LM/NA

*Филиппов М.Ф., Колобаева П.В., Мосунова Н.А. (ИБРАЭ РАН, г. Москва),
Сорокин А.А. (ОИВТ РАН, г. Москва)*

Одной из актуальных проблем обоснования радиационной безопасности быстрых реакторов с натриевым теплоносителем является разработка новых методов моделирования поведения радионуклидов в технологических средах 1-го контура и программных средств на их основе. Одним из таких программных средств является модуль AEROSOL-LM/Na, предназначенный для моделирования переноса и поведения продуктов деления, продуктов коррозии и продуктов активации в натриевом теплоносителе и защитном газе быстрого реактора на всех режимах работы. В основе модуля лежат модели переноса примесей в жидкой и газовой фазе

теплоносителя, осаждения на поверхность и повторного смыва растворенных в натрии продуктов деления и активированных продуктов коррозии, межфазного массопереноса, поведения паров и аэрозолей в парогазовой среде. Во всех моделях предполагается, что радионуклиды являются примесью, не влияющей на теплогидравлические процессы в натриевом теплоносителе. В качестве базовых рассматриваются модели, применяемые ранее в модулях АЛЬФА-М [1] и TRANS_FP [2]. Основными преимуществами разрабатываемого модуля являются более широкая область применения и более совершенные модели динамики аэрозолей (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Сравнение моделей модуля AEROSOL-LM/Na с прототипами

Параметр	АЛЬФА-М [1]	TRANS-FP [2]	AEROSOL-LM
Режим работы установки	Нормальный	Нормальный, переходный и аварийный	
Примеси	Летучие продукты деления и коррозии	Летучие и нелетучие продукты деления и коррозии	Летучие и нелетучие продукты коррозии, деления и активации
Перенос в защитном газе и натрии	Канальное приближение		
Осаждение примесей в натрии	Нет	Корреляция для скорости осаждения	
Выход продуктов деления из натрия в защитный газ	Летучие радиоактивные благородные газы	Летучие и нелетучие продукты деления	
Конденсация паров продуктов деления	Нет	Равновесная модель	Неравновесная модель
Нуклеация паров продуктов деления	»	»	»
Осаждение аэрозолей	»	Однокомпонентные частицы	Многокомпонентные частицы
Состав отложений	»	Только масса	Многокомпонентный состав и масса
Коагуляция аэрозолей	»	Однокомпонентные частицы	Многокомпонентные частицы

Модели осаждения растворенных в натрии примесей. В модуле AEROSOL-LM/Na реализованы модели осаждения и повторного смыва примесей, растворенных в натрии. Осаждение рассматривается как совокупность диффузионного переноса растворенных примесей к стенке и физической адсорбции примесей на стенке. Система одномерных нестационарных уравнений для моделирования изменения удельной объемной и поверхностной концентрации примесей рассматривается в канальном приближении:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i^f}{\partial \tau} &= \frac{1}{V_i^f} \left(\sum_{j=1}^{N_b} u_j^f C_j^f A_j^f - C_i^f \sum_{k=1}^{N_{\text{вых}}} u_k^f A_k^f \right) + \\ &+ \frac{S_{\text{деп},i}^f}{V_i^f} \left(\frac{\beta_{\text{д},i}^f k_{\text{дес},i}^{\text{эф}}}{\beta_{\text{д},i}^f + k_{\text{адс},i}^{\text{эф}}} C_{p,i}^f - \frac{\beta_{\text{д},i}^f k_{\text{адс},i}^{\text{эф}}}{\beta_{\text{д},i}^f + k_{\text{адс},i}^{\text{эф}}} C_i^f \right) + Q_{C,i}^f; \\ \frac{\partial C_{p,i}^f}{\partial \tau} &= \frac{\beta_{\text{д},i}^f k_{\text{адс},i}^{\text{эф}}}{\beta_{\text{д},i}^f + k_{\text{адс},i}^{\text{эф}}} C_i^f - \frac{\beta_{\text{д},i}^f k_{\text{дес},i}^{\text{эф}}}{\beta_{\text{д},i}^f + k_{\text{адс},i}^{\text{эф}}} C_{p,i}^f, \end{aligned}$$

где C_i^f — объемная концентрация примеси, растворенной в натрии, кг/м³; V_i^f — объем i -ячейки, м³; $N_b, N_{\text{вых}}$ — число входов и выходов потока теплоносителя из ячейки соответственно; A_j^f — площадь проходного сечения для j -ячейки, м²; u_j^f — скорость теплоносителя, м/с; $S_{\text{деп},i}^f$ — площадь поверхности осаждения в ячейке, м²; $\beta_{\text{д},i}^f$ — скорость диффузионного переноса примеси к поверхности осаждения, м/с; $k_{\text{адс},i}^{\text{эф}}$ — скорость адсорбции примеси, м/с; $k_{\text{дес},i}^{\text{эф}}$ — коэффициент десорбции, с⁻¹; $Q_{C,i}^f$ — объемный источник примеси в ячейке, кг/(с·м³); τ — время; i, j, k — индексы пространственных ячеек нодализационной схемы каналов реакторной установки; $C_{p,i}^f$ — поверхностная концентрация примеси, осажденной на поверхность в ячейке, кг/м².

Для определения скорости адсорбции и коэффициента десорбции в модуле используются две опции: инженерная модель, в которой скорость адсорбции постоянна, коэффициент десорбции зависит только от температуры, и кинетическое приближение на основе модели адсорбции Ленгмюра [3].

Модель межфазного массопереноса. В модуле реализована модель испарения из жидкого

натрия растворенных в нем продуктов деления и активации, в рамках которой межфазный массоперенос растворимых продуктов деления рассматривается как результат диффузионного переноса радионуклидов к межфазной поверхности и испарения или конденсации паров на межфазной поверхности. При этом используется допущение о диффузионном характере кинетики процесса, т.е. вблизи поверхности раздела пары продуктов деления находятся в равновесии с растворенным количеством компонента в натрии. С учетом этого допущения система уравнений для изменения объемной концентрации примеси в натрии и парогазовой среде имеет вид (без учета осаждения, конденсации, нуклеации)

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i^f}{\partial \tau} \Big|_{\text{межф}} &= \frac{S_{\text{iph},i}^g}{V_i^f} \beta_{\text{iph},i}^{\text{эф}} \left(C_i^g - \frac{\rho_{\text{Na},i}^g}{\rho_{\text{Na},i}^f} C_i^f \alpha_i \right); \\ \frac{\partial C_i^g}{\partial \tau} \Big|_{\text{межф}} &= - \frac{S_{\text{iph},i}^g}{V_i^g} \beta_{\text{iph},i}^{\text{эф}} \left(C_i^g - \frac{\rho_{\text{Na},i}^g}{\rho_{\text{Na},i}^f} C_i^f \alpha_i \right), \end{aligned}$$

где $S_{\text{iph},i}^g$ — площадь межфазной поверхности в ячейке; $\beta_{\text{iph},i}^{\text{эф}}$ — эффективная скорость межфазного массопереноса; C_i^g — объемная концентрация паров примеси в газовой фазе i -й ячейки; $\rho_{\text{Na},i}^g/\rho_{\text{Na},i}^f$ — отношение плотности паров натрия и жидкого натрия в ячейке; α — коэффициент относительной летучести примеси, вычисляемый по эмпирическим корреляциям и зависящий от температуры и типа примеси.

Эффективная скорость массопереноса является функцией скоростей диффузионного переноса к межфазной поверхности примесей из натрия и паров из газовой фазы вида

$$\beta_{\text{iph},i}^{\text{эф}} = \frac{\beta_{\text{iph},i}^g \beta_{\text{iph},i}^f}{\beta_{\text{iph},i}^g + \beta_{\text{iph},i}^f \rho_{\text{Na},i}^g / \rho_{\text{Na},i}^f \alpha_i},$$

где $\beta_{\text{iph},i}^g, \beta_{\text{iph},i}^f$ — скорость диффузионного переноса паров примеси к межфазной поверхности в газовой фазе и растворенной примеси в жидком натрии соответственно. При интенсивном турбулентном перемешивании, например, в верхней камере смешения быстрого реактора $\beta_{\text{iph},i}^f \gg \beta_{\text{iph},i}^g, \beta_{\text{iph},i}^{\text{эф}} = \beta_{\text{iph},i}^g$ [4].

Для расчета скорости диффузионного переноса паров примеси $\beta_{\text{iph},i}^g$ используется подход, в

котором учитывается влияние скорости движения газа на интенсивность межфазного массопереноса продуктов деления по формулам

$$\beta_{iph,i}^g = \begin{cases} \beta_{g,t}, & \text{Re} > 10^4; \\ \beta_{g,ec}, & \text{Re} < 10^4, \quad T_f > T_g; \\ \beta_{g,l}, & \text{Re} < 10^4, \end{cases}$$

где $\beta_{g,t}$, $\beta_{g,l}$, $\beta_{g,ec}$ — скорость массоотдачи при турбулентном, ламинарном обтекании парогазовой средой поверхности расплава и естественной конвекции соответственно; T_f , T_g — температура жидкого натрия и парогазовой среды соответственно.

Для расчета скорости массоотдачи при малых числах Рейнольдса используется корреляция [5] $\beta_{g,l} = 0,2\sqrt{\text{Re}}D_g/L$, где D_g — коэффициент молекулярной диффузии радионуклидов в парогазовой среде; L — диаметр межфазной поверхности. При турбулентном обтекании поверхности расплава соответственно аналогии между переносом тепла и массы используется соотношение $\beta_{g,t} = 0,0164 \text{Sc}^{1/3} \text{Re}^{4/5}$, где Sc — число Шмидта [6]. Для расчета массообмена при естественной конвекции, исходя из аналогии между процессами переноса тепла и массы в газе, можно воспользоваться корреляцией $\beta_{g,ec} = 0,21 \text{Ra}^{1/4} D_g/L$, где Ra — число Релея [5]. Для моделирования выхода газообразных продуктов деления — изотопов ксенона и криптона из натриевого теплоносителя в защитный газ в модуле реализована инженерная модель [7].

Моделирование образования аэрозолей.

В модуле учитывается возможность нуклеации и неравновесной конденсации всех продуктов деления и активации в зависимости от конкретных термодинамических условий [8]. Кристаллизация растворенных продуктов коррозии в жидкой фазе теплоносителя не учитывается.

Модель частиц. В основе модели лежит метод фракций, согласно которому частицы группируются в отдельные размерные фракции с фиксированными границами, например, объема [8, 9]. В результате общее интегрально-дифференциальное уравнение динамики переходит в систему нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка для массы или концентрации частиц каждой фракции. Для рас-

чета динамики рассматривается модель перемешанных компонентов [9]. В этом приближении учитывается суммарная масса различных компонентов в составе частицы при заданной и постоянной для всех частиц фазовой плотности. Состав частиц из разных фракций может отличаться. Поэтому при столкновении частиц разного состава необходимо учитывать изменение массы как суммарной, так и каждого компонента. Соответственно число уравнений в модели определяется произведением числа размерных фракций на число компонентов в составе частиц. Основным параметром, характеризующим сетку размеров частиц, является отношение объемов частиц соседних фракций $\alpha = v_i/v_{i-1} > 1$. В разрабатываемой модели используется метод расчета с $\alpha > 1$.

Моделирование конденсации и коагуляции. При моделировании конденсации и испарения используется кинетический подход. Конденсация i -го компонента пара на частицах j -й фракции рассматривается как коагуляция i -го мономера и j -й частицы. Скорость испарения определяется с учетом эффекта Кельвина. Основным является метод расчета коагуляции фиксированных усредненных монодисперсных мод [9].

Моделирование осаждения частиц на поверхность. Интегральная скорость осаждения дисперсных частиц определяется как сумма скоростей отдельных механизмов осаждения $V_d = \sum V_{d,i}$, включая броуновскую и турбулентную диффузию, термофорез, гравитационное осаждение. Как и в большинстве интегральных кодов, скорость осаждения частиц из объема ячейки на поверхность характеризуется комплексом $(S_c/V_c)V_d(m)$, где S_c , V_c — площадь смачиваемой поверхности и объем ячейки соответственно; $V_d(m)$ — скорость осаждения на поверхность частиц массой m .

Структура и назначение модуля. Состав моделей в модуле позволяет рассматривать все основные процессы, определяющие миграцию радионуклидов в 1-м контуре и газовой системе быстрого реактора: перенос примесей жидкой и газовой фазой теплоносителя, осаждение и повторный смыв с поверхности в натриевом теплоносителе, межфазный массоперенос примесей, нуклеацию паров продуктов деления и ак-

тивации и их конденсацию на частицах и поверхностях конструктивных элементов, коагуляцию полидисперсных частиц с учетом многокомпонентного состава, осаждение полидисперсных частиц на поверхность конструктивных элементов (табл. 2).

Модуль AEROSOL-LM/Na ориентирован на описание массопереноса в канальном приближении. Основным ограничением его применения является отсутствие прямого контакта теплоносителя с воздухом, т.е. горения натрия. Источники примесей в ячейках каналов определяются опционально и задаются как входные параметры задачи. Они могут либо задаваться пользователем во входном файле, либо рассчитываться в соответствующих модулях интегрального кода. Во втором случае элементы кода выполняют функции интерфейса. Входная информация задается во входном файле кода HYDRA-IBRAE/LM/V2 в соответствии со стандартом его записи. При этом во входном файле в специальном разделе задаются список рассматриваемых продуктов деления и других конденсирующихся компонентов, размер аэрозольных фракций, рассматриваемые физические процессы, параметры ячеек в нодализационной схеме контура реакторной установки. Кроме того, в

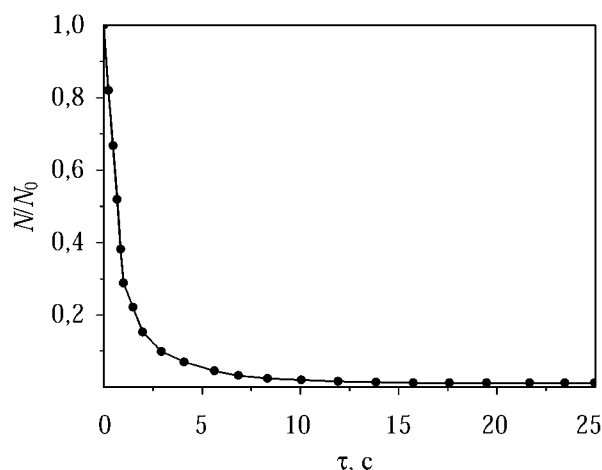
разделы с описанием структурных элементов теплогидравлического контура (каналов и камер) могут быть добавлены информация о начальной концентрации рассматриваемых примесей в жидком натрии и парогазовой среде, интенсивность источников примеси в жидкой и газовой фазе. Результаты расчета представляются в виде как пространственного распределения концентрации и массы примесей в жидкой и газовой фазах теплоносителя в ячейках, так и временных зависимостей интегральных величин.

Тестирование модуля. Правильность работы модуля проверялась сравнением расчетных результатов с точными решениями для аналитических тестов — переноса примесей в газовой и жидкой фазах, осаждения и смыва примесей, испарения продуктов деления с поверхности натриевого теплоносителя. Для проверки программной реализации моделей динамики аэрозолей рассматривались тесты для коагуляции частиц в замкнутом объеме с постоянной скоростью, совместного осаждения и коагуляции частиц, переноса частиц в газовой фазе теплоносителя.

В рамках теста «осаждение и коагуляция частиц в замкнутом объеме с постоянной скоростью процессов» рассматривались коагуляция и

Таблица 2. Возможные формы и фазовое состояние продуктов деления, коррозии и активации в натриевом теплоносителе и защитном газе быстрого реактора

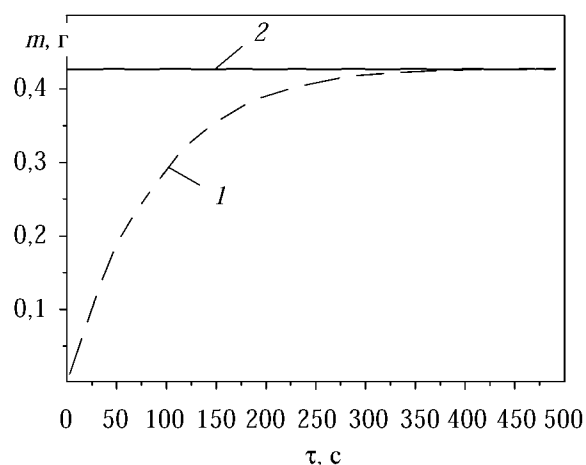
Элемент	Поведение в теплоносителе	Компонент	Фазовое состояние
Xe, Kr	Радиоактивные благородные и нерастворимые	Xe, Kr	Пузыри в натрии
I, Br	Умеренно летучие примеси, реагируют с натрием	NaI, NaBr	Растворимые примеси в натрии, аэрозоль и пар в газе
Металлы: Cs, Rb Sr, Ba, La, Ce, Nb	Растворимые, летучие Нелетучие	Cs, Rb SrO, BaO, La ₂ O ₃ , CeO ₂ , NbO ₂	То же Суспензия твердых частиц в натрии, аэрозоль в газе
Ru, Pd, Rh Ag	Слаборастворимые Растворимый	Ru, Pd, Rh Ag	То же Растворимая примесь в натрии, аэрозоль в газе
Mo, Tc	Нелетучие	MeO, MeO ₂	Суспензия твердых частиц в натрии, аэрозоль в газе
Te	Умеренно летучий, реагирует с натрием	Na ₂ Te	Растворимая примесь в натрии, аэрозоль в газе
Актиноиды U, Pu	Тугоплавкие, реагируют с натрием	MeO ₂ , Na ₃ MeO ₄	Суспензия твердых частиц в натрии, аэрозоль в газе
Продукты коррозии Mn, Co, Cr	Растворимые, нелетучие	Mn, Co, Cr	Растворимая примесь в натрии, аэрозоль в газе
Продукты активации: Na Ar	Летучий »	Na Ar	Примесь в натрии, аэрозоль в газе Примесь в натрии, пар в газе



Р и с. 1. Расчетная (—) и аналитическая (●) временная зависимость изменения относительной концентрации частиц $N(\tau)/N_0$

осаждение цезия в закрытой с двух сторон заглушками круглой горизонтальной трубе постоянного сечения длиной 0,5 м и внутренним диаметром 0,05 м, заполненной аргоном температурой 450 °С, давлением 0,15 МПа и начальной концентрацией аэрозольных частиц 10^8 м^{-3} . Коэффициент коагуляции $2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$, осаждения $0,25 \text{ с}^{-1}$, т.е. характерное время осаждения 4 с. Моделировалось изменение концентрации цезия в трубе в зависимости от времени (рис. 1). Следует отметить, что при получении аналитического решения предполагалось, что теплогидравлические параметры газовой фазы известны и получены при решении соответствующей теплогидравлической задачи с помощью кода HYDRA-IBRAE/LM/V2. При базовых параметрах расчета с числом аэрозольных фракций 200 относительная погрешность расчетного решения составила менее 0,2%. Затем выполнялась проверка сходимости решения по числу аэрозольных фракций и шагу по времени. Таким образом обосновывалась корректность реализации моделей динамики аэрозолей в программном модуле.

В рамках теста «испарение иодида натрия и цезия в инертный защитный газ из натриевого теплоносителя» моделировались испарение и конденсация примесей на межфазной поверхности. Для тестирования использовался упрощенный модельный контур, состоящий из последовательно соединенных вертикальных гидравлических каналов с постоянным сечением $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Суммарная масса жидкого натрия составляла 1,74 кг, суммарный объем парогазовой



Р и с. 2. Расчетная (1) и аналитическая (2) временная зависимость изменения суммарной массы паров цезия в защитном газе

среды $4,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, температура теплоносителя 460 °С, содержание цезия в натрии 0,01 кг. При плотности паров натрия $2,1 \text{ кг/м}^3$ и коэффициенте относительной летучести 81,33 масса насыщенных паров цезия составит $4,3 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$, характерное время переходного процесса 183 с (рис. 2). Расчетные результаты для равновесной массы цезия в защитном газе совпадают с аналитическим решением с погрешностью 0,3%. Отметим, что для ускорения расчета скорость испарения и конденсации паров цезия была пропорционально увеличена при сохранении термодинамического соотношения между ними для данной температуры.

Таким образом, тестирование подтвердило соответствие и правильность программной реализации моделей динамики многокомпонентных полидисперсных аэрозолей в защитном газе, дегазации и испарения продуктов деления с поверхности жидкого натрия, смыва с поверхности растворенных в натрии продуктов деления и активированных продуктов коррозии, осаждения продуктов деления на поверхность и переноса в газовой и жидкой фазе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жилкин А.С., Попов Э.П. Моделирование переноса радиоактивных продуктов коррозии в контурах с натриевым теплоносителем. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 1, с. 34—41.
2. Зайцев А.А., Казанцев А.А., Лукьянов А.А. и др. Тестирование интегрированного программного средства по моделированию гипотетических аварий на РУ БН. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2015, № 2, с. 60—70.

3. Корсун А.С., Семенов В.Н., Цаун С.В. Численное моделирование осаждения цезия в натриевых контурах с помощью кода СОКРАТ-БН. — Изв. РАН. Энергетика, 2015, № 4, с. 58—68.
4. Рогожкин С.А. Численное моделирование теплогидравлических процессов в верхней камере быстрого реактора. — Атомная энергия, 2013, т. 115, вып. 5, с. 295—298.
5. Sheth A. Parametric Study of Sodium Aerosols in the Cover-Gas Space of Sodium-Cooled Reactors. ANL-75-11, 1975.
6. Химическая гидродинамика. Справочное пос. М.: Квантум, 1996. 336 с.
7. Жилкин А.С., Осипов С.Л., Саляев А.В. и др. Численное моделирование поведения продуктов коррозии и газообразных продуктов деления с помощью кода СОКРАТ-БН. — Изв. РАН. Энергетика, 2014, № 3, с. 97—105.
8. Сорокин А.А. Моделирование динамики аэрозолей продуктов деления в первом контуре. — Атомная энергия, 2015, т. 118, вып. 3, с. 172—176.
9. Сорокин А.А. Моделирование коагуляции аэрозолей продуктов деления. — Там же, вып. 4, с. 228—232.

Поступила в Редакцию 18.04.17

УДК 621.039.58

МОДУЛЬ Tritium ДЛЯ РАСЧЕТА ПОВЕДЕНИЯ ТРИТИЯ В КОНТУРЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Ильасова О.Х., Назарова С.Н. (ИБРАЭ РАН, г. Москва), Сорокин А.А. (ОИВТ РАН, г. Москва)

Программный модуль Tritium, предназначенный для моделирования поведения трития в контурах реакторной установки с натриевым и свинцовым теплоносителем, позволяет вычислить интенсивность его источника в помещениях АЭС и поступление в окружающую среду. На основании этих данных может быть оценена доза облучения персонала станции. Тритий является радиоактивным изотопом водорода и образуется в результате процессов деления ядер в реакторе. Основным источником трития в быстрых реакторах является активная зона. Его выход из активной зоны, перенос по контурам и поступление в окружающую среду определяются большой проникающей способностью через конструкционные материалы. Главными компонентами трития и водорода являются (без учета заряда) их атомы в жидком теплоносителе и конструкционных материалах, молекулы HT, T₂ и H₂ в защитном газе, а также T, HT и HTO в воде и водяном паре, которые образуются в результате реакций изотопного обмена. В холодных ловушках образуются гидриды натрия NaN и NaT.

Поведение трития в контурах реакторной установки определяется поступлением в первый контур, переносом трития и водорода с теплоносителем, проникаемостью через металлические стенки каналов и слой отложений на поверхности, накоплением в холодных ловушках, изотопным обменом в холодных ловушках и воде третьего контура, стоком из контуров через про-

течки трубопроводов и с водой третьего контура в бассейн-накопитель.

Таким образом, применительно к быстрым реакторам уравнение баланса массы трития рассматривается для последовательности пространственных ячеек каналов первого и второго контуров реактора с натриевым и третьего контура с пароводяным теплоносителем. Распространение трития по контурам определяется его проникаемостью через стенки промежуточных теплообменников и парогенераторов, стоком с водородом в холодных ловушках и в относительно меньшей степени проникаемостью через стенки трубопроводов и выходом в газовые полости контуров.

Характеристика модуля. В качестве базовых в модуле рассматриваются модели, разработанные в АО «ГНЦ РФ — ФЭИ» [1] и Институте ядерных технологий ENEA (Италия) [2]. Соответственно прототипом для разрабатываемого модуля являлся отечественный программный модуль TRI1.1. Основное отличие модуля Tritium заключается в возможности детального моделирования элементов реакторной установки, интеграции с другими модулями из состава интегрального кода, использовании одномерной нестационарной модели переноса трития по контурам, возможности расчета его источника в топливном модуле, расчете коэффициентов пропускания через стенки каналов в зависимости от характеристик материала и свойств теплоносителя (табл. 1).