

# АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА СТЕНКАХ КОНТУРОВ БЫСТРЫХ НАТРИЕВЫХ РЕАКТОРОВ

**А.С. Корсун, В.С. Харитонов, М.Ф. Филиппов**

*НИЯУ «МИФИ», г. Москва*



Исследуется проблема моделирования процессов формирования радиоактивных отложений на стенках контуров быстрых натриевых реакторов. Рассмотрены модели, предназначенные для расчета формирования отложений радиоактивных и нерадиоактивных продуктов коррозии на стенках элементов контуров реакторной установки (РУ) типа БН. Предложен подход, предполагающий для учета влияния трехмерного характера течения на процессы массопереноса в некоторых участках контура циркуляции РУ типа БН совместно с одномерным описанием массопереноса использовать трехмерную модель, где процессы переноса представляются в приближении пористого тела.

**Ключевые слова:** моделирование процессов массопереноса, пористое тело, радиоактивные продукты коррозии.

**Keywords:** mass transfer modeling, porous media, radioactive corrosion products.

Одной из проблем эксплуатации энергетических реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем является накопление радиоактивных отложений на стенках элементов первого контура. Это явление приводит к

– ухудшению радиационной обстановки на АЭС во время проведения ремонтных работ в первом контуре;

– возникновению дополнительных дозовых затрат при ведении ремонтных работ.

Формирование отложений происходит в результате загрязнения теплоносителя радиоактивными примесями. Основными процессами, приводящими к появлению радиоактивных примесей в теплоносителе, являются

– выход продуктов деления из-под разгерметизированных оболочек твэлов;

– активация конструкционных материалов в активной зоне с последующей их коррозией, приводящая к образованию радиоактивных продуктов коррозии в натрии.

Анализ накопленного опыта эксплуатации реакторных установок с натриевым теплоносителем показал, что активность отложений продуктов коррозии определяется изотопами  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$  [1]. Накопление данных изотопов может вносить существенный вклад в активность технологических сред первого контура РУ (например, активность  $^{54}\text{Mn}$  в контуре охлаждения реактора БН-350 достигала значения 2,6 ТБк [2]). Распре-

© А.С. Корсун, В.С. Харитонов, М.Ф. Филиппов, 2013

деление осажденных на стенках радиоактивных продуктов коррозии в контуре обладает рядом особенностей. Отмечено, что  $^{54}\text{Mn}$  накапливается, в основном, в холодных частях контура, при этом влияние температуры и химического состава стенок на процесс накопления на них  $^{54}\text{Mn}$  указывает на абсорбционный механизм отложения [3]. Изотопы  $\text{Co}$  в большей степени накапливались в горячих участках контура (согласно опыту эксплуатации БОР-60 и петлевым экспериментам [4]).

При наличии в активной зоне негерметичных твэлов, в которых имеет место прямой контакт топлива с теплоносителем, заметный вклад в накопление активности в технологических средах реакторной установки (РУ) вносят вышедшие из таких твэлов продукты деления (в частности, в первом контуре РУ БН-350 активность изотопа  $^{137}\text{Cs}$  достигала значения 370 ТБк [5]).

Авторами [2] в ходе анализа имеющихся экспериментальных данных по эксплуатации холодных ловушек и дезактивации натриевых контуров продемонстрировано, что продукты деления присутствуют в натрии как в растворенном виде, так и в виде слабо-растворимых примесей. Механизм формирования отложений на стенках также различен – наблюдалась как абсорбция некоторых изотопов конструкционной сталью, так и формирование осадка на поверхности стенок в результате осаждения твердых частиц.

Для количественной оценки процесса формирования радиоактивных отложений в контурах строящихся и проектируемых реакторных установок с натриевым теплоносителем с целью обоснования их радиационной безопасности становится актуальной задача разработки математической модели процессов накопления радиоактивных продуктов деления и коррозии на стенках элементов контуров.

В настоящее время накоплен значительный опыт в области математического моделирования процессов переноса и поведения радиоактивных продуктов коррозии в натриевых контурах. Разработана методика расчета процесса формирования отложений продуктов коррозии, которые формируются в зависимости от температуры теплоносителя, отношения омываемой поверхности к объему, скорости потока теплоносителя и других параметров первого контура [6]. В рамках данного подхода процесс массопереноса в натриевом контуре рассматривается как одномерный процесс переноса растворенных в натрии примесей (изотопов  $\text{Mn}$  и  $\text{Co}$ ) жидкой фазой теплоносителя, абсорбируемых на стенках элементов первого контура, и описывается системой из двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_V}{\partial t} + w \cdot \frac{\partial C_V}{\partial z} = \frac{K_c \cdot S}{V} \cdot C_P - (K_o + \lambda) \cdot C_V, \\ \frac{\partial C_P}{\partial t} = \frac{K_o \cdot V}{S} \cdot C_V - (K_c + \lambda) \cdot C_P. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $C_V(z,t)$  – концентрация частиц в теплоносителе ( $1/\text{см}^3$ );  $C_P(z,t)$  – поверхностная концентрация частиц в отложениях на стенке трубопровода ( $1/\text{см}^2$ );  $K_o(z)$  – коэффициент осаждения на стенку трубопровода ( $1/\text{с}$ );  $K_c(z)$  – коэффициент смыва с поверхности трубопровода ( $1/\text{с}$ );  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада ( $1/\text{с}$ );  $w(z)$  – скорость потока теплоносителя ( $\text{см}/\text{с}$ );  $S$  и  $V$  – площадь омываемой поверхности ( $\text{см}^2$ ) и объем теплоносителя ( $\text{см}^3$ ) соответственно.

В модели (1) для вычисления скорости массообмена между теплоносителем и стенками контура используются коэффициенты массопереноса за счет диффузии через пограничный ламинарный слой и коэффициенты адсорбции и десорбции примеси на поверхности. Недостатком модели при этом можно считать отсутствие учета влияния характера обтекания стенок (поперечного или продольного) на величину коэффициента массопереноса в пристеночной области.

Следует также отметить подход к моделированию процессов переноса и поведения в натрии слаборастворимых нерадиоактивных продуктов коррозии (окислов Fe и Cr), описанный в работе [7]. В рамках данного подхода рассматривается перенос продуктов коррозии с учетом химического взаимодействия в системе натрия - конструкционный материал - примеси. Одномерная математическая модель [7] описывает массоперенос примесей системой уравнений следующего вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{df(m)}{d\tau} = \frac{1}{2} \int_0^m \beta(m-m') f(m-m') f(m') dm' - \int_0^\infty \beta(m,m') f(m) f(m') dm' + \\ + \frac{I1(m) + I2(m)}{m \cdot dm} - k_o(m) f(m) \frac{S}{V}, \\ \frac{dc_d^f}{d\tau} = \frac{4\beta_t(c_d^w - c_d^f)}{D_k} - \int_0^{mx} 6\beta_p \cdot f(m) \cdot m \frac{c_d^f - c_s^f}{\rho_p l} dm, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $c_d^f$  – концентрация компонента  $n$  примеси ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $c_s^f$  – концентрация насыщения раствора ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $\beta_p$  – коэффициент массоотдачи от поверхности частиц ( $\text{м}/\text{с}$ );  $\beta_t$  – коэффициент массоотдачи от стенки канала ( $\text{м}/\text{с}$ );  $\rho_p$  и  $l$  – плотность и размер частиц ( $\text{кг}/\text{м}^3$  и  $\text{м}$ );  $mx$  – масса наиболее крупной частицы ( $\text{кг}$ );  $f(m)$  – плотность распределения частиц по массам ( $1/(\text{м}^3 \text{ кг})$ );  $I1(m)$ ,  $I2(m)$  – интенсивности объемного и эрозионного источников взвеси для частиц массой  $m$  ( $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ );  $\beta$  – ядро кинетического уравнения ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $D_k$  – диаметр канала ( $\text{м}$ );  $c_d^w$  – концентрация примеси у стенки ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $k_o(m)$  – скорость осаждения частиц размера  $m$  ( $\text{м}/\text{с}$ ).

В рамках данного подхода массоперенос продуктов коррозии рассматривается как совокупность процессов переноса дисперсной системы, состоящей из натрия с растворенными в нем продуктами коррозии и частицами, образовавшимися в результате кристаллизации продуктов коррозии из раствора, образования отложений продуктов коррозии на стенках в результате кристаллизации и осаждения дисперсной фазы. При этом параметры модели (2), относящиеся к описанию физико-химических процессов (скорость кристаллизации, плотность частиц и т.п.), определены только для случая переноса сложных оксидов железа и хрома.

Эта математическая модель была использована для расчета процесса массопереноса в первом контуре реакторной установки БН-600 слаборастворимых продуктов коррозии [7].

Анализ структуры уравнений и результатов модельных экспериментов выявил ряд существенных недостатков моделей с точки зрения рассмотрения процесса переноса летучих и нелетучих продуктов деления:

- используемые в них замыкающие соотношения для расчета скоростей массообмена между теплоносителем и стенками контура применимы только для некоторых типов продуктов коррозии;

- модели являются одномерными, что не позволяет учитывать влияние трехмерного характера течения теплоносителя в некоторых участках контура (примером такого участка является верхняя камера смешения БН-600) на процесс массопереноса.

В связи с тем, что формирование отложений изотопов продуктов деления происходит как сорбционным путем, так и в результате осаждения твердых частиц, система уравнений, описывающая процесс массопереноса продуктов деления, в общем случае будет включать в себя уравнения для всех  $k$ -тых растворимых и  $n$ -ных нерастворимых соединений изотопа  $l$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C^{l,k}}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{u} \cdot C^{l,k}) = \operatorname{div}(D^{l,k} \cdot \operatorname{grad}(C^{l,k})) - \lambda^l \cdot C^{l,k}, \\ \frac{\partial C_p^{l,k}}{\partial t} = K_o^{l,k} \cdot C_w^{l,k} - K_c \cdot C_p^{l,k} - \lambda^l \cdot C_p^{l,k}, \\ \frac{\partial X_i^{l,n}}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{u} \cdot X_i^{l,n} - \mathbf{J}_i^{l,n} - X_i^{l,n} \cdot D_t \cdot \operatorname{grad}(q_{ui}) + \mathbf{V}_{gi} \cdot X_i^{l,n}) = H_p - \lambda^l \cdot X_i^{l,n} \\ \dots \end{array} \right. \quad (3)$$

с граничными условиями

$$\left\{ \begin{array}{l} -D^{l,k} \cdot \frac{\partial(C^{l,k})}{\partial n} \Big|_{\text{гран}} = K \cdot (C^{l,k} - C_w^{l,k}) = -K_o^{l,k} \cdot C_w^{l,k} + K_c^{l,k} \cdot C_p^{l,k}, \\ -D_i^{l,n} \cdot \frac{\partial(X_i^{l,n})}{\partial n} \Big|_{\text{гран}} = -\beta_i^{l,n} \cdot (X_i^{l,n})_w, \\ \dots \end{array} \right.$$

где  $C^{l,k}$  – массовая концентрация примеси  $k$  в растворенном состоянии;  $C_w^{l,k}$  – массовая концентрация растворенной примеси  $k$  у стенки;  $C_p^{l,k}$  – поверхностная концентрация примеси  $k$  на стенке;  $X_i^{l,n}$  – концентрация  $i$ -той фракции частиц примеси  $n$ ;  $(X_i^{l,n})_w$  – концентрация  $i$ -той фракции частиц примеси  $n$  у стенки;  $D^{l,k}$  – коэффициент диффузии примеси  $n$  в растворенном состоянии;  $\beta_i^{l,n}$  – скорость осаждения  $i$ -той фракции частиц примеси  $l$ ;  $D_i^{l,n}$  – коэффициент диффузии частиц  $i$ -той фракции примеси  $n$ ;  $K_o^{l,k}$  – скорость абсорбции примеси  $k$ ;  $K_c^{l,k}$  – скорость десорбции примеси  $k$ ;  $\mathbf{J}_i^{l,n}$  – вектор диффузии частиц  $i$ -той фракции;  $D_t$  – коэффициент диффузии безынерционных частиц;  $q_{ui}$  – коэффициент турбулентной миграции;  $\mathbf{V}_{gi}$  – скорость гравитационного осаждения частиц  $i$ -той фракции;  $H_p$  – источник, описывающий кинетические процессы (коагуляцию);  $\lambda^l$  – постоянная распада изотопа  $l$ .

Для замыкания данной системы уравнений необходимо для каждого типа из рассматриваемых продуктов деления и коррозии разработать методику определения коэффициентов массообмена (абсорбции, десорбции, скорости осаждения частиц) и расчета источника, описывающего кинетические процессы.

Для учета влияния трехмерного характера течения на процессы массопереноса в некоторых участках контура циркуляции реакторной установки типа БН предлагается совместно с одномерным описанием массопереноса использовать трехмерную модель, в которой рассмотрение процессов переноса осуществляется в приближении пористого тела. В рамках такого подхода процесс переноса примесей описывается системой уравнений, включающей в себя

– уравнение переноса примеси в растворенном состоянии

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial \bar{C}^{l,k}}{\partial \tau} + \varepsilon \cdot \operatorname{div}(\bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{C}^{l,k}) = \\ = \operatorname{div}(D_{\text{эф}}^{l,k} \cdot \operatorname{grad}(\bar{C}^{l,k})) - \varepsilon \cdot K_o^{l,k} \cdot \bar{C}^{l,k} + \frac{1}{V} \int_{S_{\text{жт}}} K_c^{l,k} \cdot C_p^{l,k} \cdot dS - \varepsilon \cdot \lambda^l \cdot \bar{C}^{l,k}, \end{aligned} \quad (4)$$

– уравнение переноса частиц

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial \bar{X}_i^{l,n}}{\partial \tau} + \varepsilon \cdot \operatorname{div}(\bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{X}_i^{l,n}) = \\ = \operatorname{div}(D_{\text{эф},f} \cdot \operatorname{grad}(\bar{X}_i^{l,n})) + \mathbf{V}_{gi,V} \cdot \bar{X}_i^{l,n} + \bar{H}_p - \beta_{i,\text{эф}}^{l,n} \cdot \bar{X}_i^{l,n} - \varepsilon \cdot \lambda^l \cdot \bar{X}_i^{l,n}, \end{aligned} \quad (5)$$

– уравнение, описывающее изменение поверхностной концентрации примеси на стенках элементов контура

$$\frac{1}{V} \int_{S_{\text{ЖТ}}} \frac{\partial C_p^{l,k}}{\partial \tau} dS = \varepsilon \cdot K_o^{l,k} \cdot \bar{C} - \frac{1}{V} \int_{S_{\text{ЖТ}}} K_c^{l,k} \cdot C_p^{l,k} dS - \frac{1}{V} \int_{S_{\text{ЖТ}}} \lambda^l \cdot C_p^{l,k} dS. \quad (6)$$

Для замыкания данной системы уравнений необходимо определить

- эффективный коэффициент диффузии растворенных примесей и частиц;
- скорость осаждения частиц на стенки;
- осредненную скорость гравитационного осаждения;
- осредненный объемный источник, описывающий кинетические процессы;
- скорость массоотдачи от стенки к раствору примеси  $k$  за счет процессов абсорбции и десорбции.

В настоящее время задачу разработки методов расчетного исследования процессов формирования радиоактивных отложений в контурах реакторных установок типа БН нельзя считать до конца решенной. Рассмотренные в статье модели данных процессов, ориентированные на одномерное описание переноса только некоторых типов радиоактивных продуктов коррозии, не предназначены для расчета процесса формирования отложений продуктов деления, вносящих вклад в активность отложений на стенках контура. Кроме того, в моделях (2) и (3) не учитывается влияние характера обтекания стенок на скорость массообменных процессов.

Модель (4)–(6) не обладает этими недостатками – она ориентирована на трехмерное описание переноса примесей как в растворенном состоянии, так и находящихся в теплоносителе в форме дисперсной фазы.

### Литература

1. Бакуменко О.Д., Кулаковский М.Я., Сергеев В.А. Проблемы активности первого контура быстрых энергетических реакторов // US/USSR Seminar on ZMFBR Reactor Safety. Argonne, USA, 1976. С.2 – 63.
2. Четкин Ю.В., Кизин В.Д., Поляков В.И. Радиационная безопасность АЭС с быстрым реактором и натриевым теплоносителем. М.: Энергоатомиздат. 1983.
3. Stamm H.H., Hanke H.D., Clauss H. Removal of Radionuclides from Liquid Sodium by Sorption on Metallic Surfaces // Richland Conf. 1980. P. 17 – 58.
4. Brehm W.F. Radioactive Corrosion Product Transport and Control // Proc. of the Intern. Conf. on Liquid Metal Technology in Energy Production. 1976. Vol. 1. P.263.
5. Васильев И.И., Плещенкова Л.К., Пугачев Г.П. и др. Установка переработки натриевого теплоносителя реакторной установки БН-350. / I Международная выставка и конференция «Атомная энергетика и промышленность» KazAtomExpo, 19-21 мая 2010, Астана, Казахстан.
6. Васильева К.И., Жилкин А.С., Кузнецов И.А. Аналитическое решение уравнения переноса радиоактивных частиц теплоносителем ядерного реактора // Атомная энергия. 1982. Т. 52. №4. С. 267.
7. Алексеев В.В., Кондратьев А.С. Моделирование массопереноса продуктов коррозии в контурах ЯЭУ с натриевым теплоносителем // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2010. № 4. С. 162-171.

Поступила в редакцию 07.05.2013

oxygenated electrolyte with different measuring electrodes and reference electrodes. Experimental results prove the possibility of applying of the gas phase electrochemical oxygen sensor with a solid oxygenated electrolyte for control the content of hydrogen in gas phase of loop of reactors with heavy liquid metal coolants.

**УДК 53.082.731:543.272.2**

*The study of temperature influence on the performance of conductometric hydrogen sensor element based on Pd-Ag alloy \ Skomorokhov A.N., Shelemet'ev V.M., Askhadulin R.Sh., Storozhenko A.N., Skomorokhova S.N., Sitnikov I.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 8 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 4 titles.*

Temperature influence on such characteristics of the conductometric hydrogen sensor elements response time and magnitude of variation of the electric resistance in the temperature range from 180 up to 310°C has been investigated. Type of functional dependence of variation of the electric resistance in dependence from hydrogen concentration at various temperatures was determined.

**УДК 621.039.548**

*The methodical features of structural investigations for sodium cooling pins \ Kinyov E.A., Tsygvintsev V.A., Barybin A.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 10 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 3 titles.*

The specificity of rupture pin defect and gas flow pin defect are examined. It is complicated to identify the first type of defects about its feature: initial or secondary. It is hard to localize the other flow defect. Depth analysis is demanded of the complex investigation including the defect modeling results. Article data illustrates the urgent need of waterless technology is one must during preparation of faulty pins for post reactor investigations.

**УДК 621.039.53**

*Analysis of approaches to the simulations of the processes of radioactive deposits formations on the contour's walls of the fast sodium reactors \ Korsun A.S., Kharitonov V.S., Filippov M.F.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 5 pages. – References, 7 titles.*

The paper presents analysis of approaches to the simulations of the processes of radioactive deposits formations on the contour's walls of the fast sodium reactors.

**УДК 621.039.526.034**

*Design substantiation of electricity-heated reactor model construction with supercritical parameters \ Avdeev E.F., Chusov I.A., Shelegov A.S., Ukraintsev V.F., Titov D.M., Ragulin S.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 9 pages, 4 tables, 3 illustrations. – References, 11 titles.*

The paper presents the Russian concept of electrically heated supercritical reactor model. Coolant with such parameters can enhance efficiency of facility to 45-49%. Russian concept of new generation NPP's based on supercritical parameters of coolant not limited only reactor facility. The development of new electricity generating facility based on Brayton cycle with recuperative heat exchangers is considered. Basic concept of reactor facility model is based on transition possibility between one-way and two-way core models by minimal change in reactor core model design. Reactor facility model has been developed with geometry distortion with scale factor (full scale reactor/reactor model) 1:5. In this paper the main requirements has been formulated for design of reactor model. Design justification of reactor model based on energy equation for coolant flow and closure equations for cell and assembly model flow rates. In the energy equation included the heat part generated by the friction and loses on acceleration. The original system of equations was performed by iteration. Calculations were performed for three types of media: water, carbon dioxide and Freon-134. Estimation results of thermal-hydraulic characteristics for supercritical reactor model shows that parameter of water, carbon dioxide and Freon-134 achieved on 31 MWt, 3,9 MWt and 4,0 MWt respectively.