

корпуса, однако полученные на модели ТВС данные о влиянии обогрева корпуса могут быть полезны для верификации и уточнения моделей повторного залива расчетных кодов.

Таким образом, эксперименты показали отсутствие существенного влияния перемешивающих решеток на эффективность расхолаживания ТВС-2М в условиях повторного залива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yadigaroglu G., Nelson R.A., Teschendorff V. e.a. Modeling of reflooding. — Nucl. Engng Design, 1993, v. 145, № 1, p. 1—35.
2. Murao Y., Iguchi T., Sugimoto J. e.a. Thermal-hydraulic model for reflooding phenomena in PWR-LOCA. — In: Proc. 6th Intern. Topical Mtg on Reactor Thermal Hydraulics. France, Grenoble, 1993, Oct. 5—8, v. 1, p. 723—732.

Поступила в Редакцию 13.09.19

УДК 621.039.532

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ СТАЛИ В КОНТУРАХ С НАТРИЕМ

Алексеев В.В., Сорокин А.П., Кузина Ю.А. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)

e-mail: alexeev@ippe.ru

Использование жидких металлов в качестве теплоносителей позволяет создать высокоэффективные энергетические установки, в том числе в ядерной энергетике. Повышение эффективности, ресурса и безопасности работы установок, возможность создания ЯЭУ с более высокими параметрами в значительной степени определяются обоснованием физико-химических процессов в системе теплоноситель—конструкционный материал—примеси.

Важными проблемами, которые должны быть решены при создании и эксплуатации ЯЭУ с натриевым теплоносителем, являются коррозия и массоперенос конструкционных материалов. В результате массопереноса возможно как ухудшение свойств конструкционных материалов, так и сужение, забивание проходных сечений каналов гидравлического тракта реактора, что приводит к снижению безопасности. Экспериментальные исследования на крупномасштабных установках для выявления указанных эффектов дороги, иногда и невозможны. Моделирование массопереноса в контурах промышленных ЯЭУ с жидкометаллическими теплоносителями на экспериментальных установках в полном объеме не проводилось. Наиболее подробную информацию могут дать расчетно-теоретические методы исследования. В настоящее время разработка таких методов для рассматриваемого класса задач находится в начальной стадии. Отсутствует замкнутая система уравнений, известные расчетные оценки

недостаточно обоснованы, отсутствуют физико-химические константы.

Массоперенос продуктов коррозии в натриевых контурах ЯЭУ моделируется для определения условий, обеспечивающих эффективное функционирование теплоносителя и конструкционных материалов, в том числе определение допустимого повышения температуры теплоносителя и содержания примесей, получение количественных данных о выходе и накоплении твердофазных примесей в элементах гидравлического тракта и газовых полостях.

Коррозия стали в натрии. Коррозионное взаимодействие между натрием и конструкционными материалами представляет собой сложный физико-химический процесс, в котором определяющими являются следующие составляющие:

растворение компонентов конструкционных материалов в натрии;

образование сплавов и химических соединений компонентов конструкционных материалов с натрием и примесями, содержащимися в натрии;

проникновение натрия в конструкционный материал;

массоперенос в жидком натрии в результате температурного и концентрационного переноса.

Наиболее агрессивной примесью в натрии является кислород, который образует с компонентами стали и сплавов сложные оксиды типа $\text{Na}_x\text{Me}_y\text{O}_z$. Образование таких соединений возможно с Fe, Cr, Ni, Mo. Пороговый уровень кис-

лорода в натрии, необходимый для образования таких соединений, приведен в работе [1].

Исследованиями коррозионного поведения аустенитной хромоникелевой стали в неизотермическом потоке натрия с разным содержанием кислорода было получено уравнение для расчета скорости коррозии [2]

$$J = J_0 C_{O_2}^{1,2} f \exp\left(-\frac{12\,900}{T}\right),$$

где J — скорость коррозии, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; J_0 — коэффициент, зависящий от состава стали, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; C_{O_2} — концентрация кислорода в натрии, млн^{-1} ; f — коэффициент, зависящий от скорости потока натрия: $f = 1$ для $W > W_{\text{кр}}$, $f = 0,33(W/W_{\text{кр}})$ для $W < W_{\text{кр}}$; W — скорость потока, $\text{м}/\text{с}$; $W_{\text{кр}}$ — критическая скорость потока натрия, выше которой скорость коррозии не зависит от скорости потока, для стали X18H10T она составляет 3—4 $\text{м}/\text{с}$.

Теплоноситель с растворенными примесями, поступая в участки контура с пониженной температурой, образует пересыщенный раствор, в результате чего в его объеме спонтанно образуются центры кристаллизации (зародыши твердой фазы). Концентрация примеси в теплоносителе, при которой образуются зародыши твердой фазы, рассчитывается по уравнению Томсона [3]

$$C_{\text{кр}}/C_s = \exp(4\sigma\mu/(\rho_p l_0 RT)), \quad (1)$$

где σ — удельная энергия поверхности раздела зародыш—расплав; μ — молекулярная масса оксида натрия; ρ_p — плотность материала частиц; l_0 — размер зародышей частиц; $C_{\text{кр}}$, C_s — концентрация предельно пересыщенного раствора и насыщения соответственно.

Массоперенос частиц продуктов коррозии. Изменение дисперсной системы описывается уравнением [4]. Если не учитывать эрозийные источники частиц, имеем

$$\begin{aligned} \frac{df(m)}{d\tau} = & \frac{1}{2} \int_0^m \beta(m-m') f(m-m') f(m') dm' - \\ & - \int_0^\infty \beta(m,m') f(m) f(m') dm' + \\ & + \frac{I_1(m)}{m dm} - k_0(m) f(m) S/V, \end{aligned} \quad (2)$$

где m , m' — масса соударяющихся частиц; β — ядро кинетического уравнения; $I_1(m)$ — интен-

сивность объемного источника взвеси для частиц массой m , $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; S , V — площадь поверхности, омываемой теплоносителем, и объем рассматриваемого участка проточной части; $k_0(m)$ — коэффициент отложения частиц на поверхности проточной части.

Уравнение (2) является фундаментальным для расчета массопереноса дисперсной фазы в циркуляционном контуре.

Свойства дисперсных систем и их поведение в циркуляционных натриевых контурах в значительной степени зависят от адгезионных характеристик материалов. На силы адгезии частиц в жидких средах влияют такие факторы, как материал частиц и подложки, размер и геометрия частиц, условия нанесения частиц на подложку, наличие поверхностно-активных веществ, смачиваемость поверхности и некоторые другие. Надежных методов расчета силы адгезии нет, для ее определения используются, как правило, эмпирические зависимости.

Другим важным параметром, характеризующим взаимодействие частиц с поверхностью, является коэффициент трения. Одной из причин трения является взаимное зацепление неровностей на поверхностях. В случае чистых поверхностей сила трения может достигать значения, соответствующего напряжению среза более мягкого материала в трущейся паре. В среде щелочных металлов происходит очистка поверхностей, оксидные пленки могут удаляться, что приводит к росту коэффициента трения [5]. Как отмечается в работе [6], коэффициент трения металлов в натрии, не загрязненном примесями, составляет 0,5—1.

Условие отрыва частицы, расположенной на стенке горизонтального канала в его нижней части, потоком жидкости выражается неравенством [7]

$$F_{\text{л}} \geq K_{\text{тр}} (F_{\text{а}} + F_{\text{в}} - F_{\text{п}}).$$

Это условие использовано для вывода зависимости критической скорости от основных параметров рассматриваемой системы. Вес частицы записан с учетом выталкивающей силы

$$F_{\text{в}} = \frac{\pi g l^3 (\rho_{\text{ч}} - \rho)}{6}.$$

Для частиц, форма которых отличается от сферической, зависимость силы адгезии имеет вид

$$F_a = K_\phi K_a l,$$

где K_ϕ — коэффициент, учитывающий влияние формы частиц на силу адгезии.

Экспериментальный коэффициент адгезии частиц стали с поверхностью коррозионно-стойкой стали X18H10T в натрии составляет $K_a \pm \Delta K_a = (10 \pm 3)10^{-5}$ Н/м, трения — $K_{тр} \pm \Delta K_{тр} = 1,2 \pm 0,1$ [7].

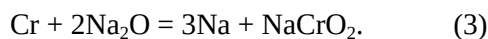
Плотность потока примеси на поверхность канала с учетом переноса только частиц монодисперсной взвеси рассчитывается по уравнению

$$W = k_o C_p,$$

где C_p — концентрация взвеси в потоке натрия; k_o — коэффициент отложения.

Учет химического взаимодействия с кислородом. При повышенном содержании кислорода в натрии необходимо учитывать его химическое взаимодействие с компонентами стали [8]. В первую очередь, это относится к железу и хрому.

При взаимодействии хрома с оксидом натрия протекает реакция



Полагаем, что кислород в натрии находится в форме Na_2O . Другими реакциями оксида натрия пренебрегаем.

Константа равновесия реакции (3) выражается через активность соответствующих компонентов:

$$k = \frac{a(\text{NaCrO}_2) a(\text{Na})^3}{a(\text{Cr}) a(\text{Na}_2\text{O})^2}. \quad (4)$$

Кинетическое уравнение этой реакции, если рассматривать изменение концентрации NaCrO_2 , выражается зависимостью

$$\left[\frac{dC(\text{NaCrO}_2)}{d\tau} \right]_p = K^{\rightarrow} C(\text{Cr}) C(\text{Na}_2\text{O})^2 - K^{\leftarrow} C(\text{NaCrO}_2) C(\text{Na})^3.$$

Индекс «р» здесь указывает на изменение концентрации сложного оксида за счет реакции (4).

Учитывая, что константа равновесия исходной реакции $K = K^{\rightarrow}/K^{\leftarrow}$, а также с учетом конвективного переноса растворенного сложного

оксида в натрии получим изменение его концентрации в теплоносителе в мольных долях:

$$\frac{dC(\text{NaCrO}_2)}{d\tau} = K^{\rightarrow} \left[C(\text{Cr}) c(\text{Na}_2\text{O})^2 - \frac{C(\text{NaCrO}_2)}{K} \right] + 4\chi_{\text{ок}} \frac{C(\text{NaCrO}_2)_w - C(\text{NaCrO}_2)}{D_k},$$

где D_k — диаметр канала, м; $\chi_{\text{ок}}$ — коэффициент массоотдачи сложного оксида от стенки канала, м/с; индекс «w» характеризует пристеночную концентрацию.

Изменение концентрации хрома в натрии в дифференциальном виде с учетом его конвективного переноса в канале получим также в мольных долях:

$$\frac{dC(\text{Cr})}{d\tau} = - \left[\frac{dC(\text{NaCrO}_2)}{d\tau} \right]_p + 4\chi_{\text{ок}} \frac{C(\text{Cr})_w - C(\text{Cr})}{D_k}.$$

Аналогично для изменения концентрации кислорода в форме оксида в натрии получено выражение

$$\frac{dC(\text{Na}_2\text{O})}{d\tau} = -2 \left[\frac{dC(\text{NaCrO}_2)}{d\tau} \right]_p + 4\chi_{\text{O}} \frac{C(\text{Na}_2\text{O})_w - C(\text{Na}_2\text{O})}{D_k}.$$

Для замыкания полученной системы уравнений определяется пристеночная концентрация компонентов, исходя из следующих соображений. Поскольку концентрация оксида натрия существенно превышает концентрацию остальных компонентов в растворе, можно принять

$$C(\text{Na}_2\text{O})_w = C(\text{Na}_2\text{O}).$$

Пристеночная концентрация хрома $C(\text{Cr})_w$ рассчитывается на основании баланса потоков хрома:

осаждающегося на поверхности канала

$$J_{\text{ок}} = K_r \beta_k [C(\text{Cr})_w - C(\text{Cr})_{sw}], \quad (5)$$

выносимого в поток натрия за счет конвекции

$$J_{\text{ок}} = -\chi_{\text{Cr}} [C(\text{Cr})_w - C(\text{Cr})]. \quad (6)$$

Совместно решая уравнения (5), (6), получим

$$C(\text{Cr})_w = \frac{\chi_{\text{Cr}} C(\text{Cr}) + K_r \beta_k C(\text{Cr})_s^w}{\chi_{\text{Cr}} + K_r \beta_k},$$

где χ_{Cr} — коэффициент массоотдачи хрома на стенку канала, м/с; β_k — константа скорости кристаллизации, м/с; $C(Cr)_s^w$ — концентрация насыщения хрома в натрии возле стенки канала, мол. доля; K_r — коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности.

Концентрация двойного оксида хрома в пристеночном слое определяется на основании уравнения (4), записанного для соответствующих условий:

$$C(NaCrO_2)_w = k C(NaCrO_2)_s \frac{C(Cr)_w}{C(Cr)_s} \left[\frac{C(Na_2O)}{C(Na_2O)_s} \right]^2,$$

где $C(Na_2O)_s$ — концентрация насыщения оксида натрия в натрии, мол. доля.

Коэффициент χ определяется исходя из известной критериальной зависимости тепломассообмена [9]

$$Nu_d = 5 + 0,025 Pe_d^{0,8},$$

где $Pe_d = U D_k / D_i$.

$$\chi_i = Nu_d D_i / D_k,$$

где D_i — коэффициент диффузии примеси в теплоносителе (индекс i характеризует вид примеси), м²/с.

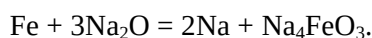
Константа равновесия (4)

$$k = \exp(-\Delta G^0 / RT),$$

где ΔG^0 — энергия Гиббса, Дж/моль.

Оценка производительности источника взвешенных частиц. Решение приведенной системы уравнений позволяет рассчитать распределение растворенных компонентов в натрии по ходу течения в охлаждаемом канале. Кроме того, учитывая превышение поступления компонентов в натрий над пределом их растворимости, оценивается производительность источника дисперсной фазы в потоке теплоносителя.

Аналогичные уравнения можно записать для переноса железа в натрии. Для этого случая уравнение химической реакции в натрии имеет вид



Интенсивность объемного источника взвеси $I_1(m)$ может быть рассчитана двумя способами. Первый основан на использовании уравнения Томсона (1) для определения критического

насыщения раствора $C_{кр}$. В этом случае концентрация образовавшихся зародышей частиц C_n определяется как разность между концентрацией с критическим пересыщением и насыщенного раствора с учетом поправочного коэффициента k_1 :

$$C_n = C_{кр} - k_1 C_s.$$

Задается плотность распределения массы зародышей частиц по размеру

$$\varphi_n(l) = a/l_e (l/l_e)^{a-1} \exp[-(l/l_e)^a],$$

где l_e , a — постоянные для данной дисперсной системы.

Плотность распределения массы зародышей частиц по массе

$$f_n(m) = C_n \varphi_n(l) l / (3m^2).$$

Окончательно получим

$$I_1(m) = f_n(m) m dm/d\tau.$$

Второй способ вычисления интенсивности объемного источника взвеси заключается в использовании кинетической теории гомогенного зародышеобразования

$$I_1(m) = J(m) dm.$$

Скорость образования зародышей в пересыщенной жидкости [10, 11]

$$J(m) = K(m) \exp(-W_k / kT),$$

где $K(m)$ — кинетический коэффициент гомогенного зародышеобразования; W_k — энергия образования сферического зародыша из раствора; k — постоянная Больцмана.

Константы массопереноса. Представленные уравнения содержат физические константы, характеризующие массоперенос никеля и хрома. Некоторые константы точно не известны, среди них коэффициенты для расчета скорости коррозии стали в натрии, диффузии в натрии, адгезии, трения, отложения частиц, коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности канала, размер зародыша твердой фазы, удельная энергия образования поверхности раздела зародыш—расплав, изобарно-изотермический потенциал реакции образования двойного оксида, концентрация насыщения двойного оксида в натрии, компонентов стали в натрии, константа скорости реакции образования двойного оксида, скорости кристаллизации, селективного растворения в натрии.

Программа дальнейших исследований должна включать уточнение указанных констант.

Заключение. В результате протекания процессов массопереноса возможно ухудшение свойств конструкционных материалов, сужение и забивание проходных сечений каналов гидравлического тракта. Наряду с проведением экспериментальных исследований стоит задача моделирования процессов массопереноса в контурах с жидкометаллическими теплоносителями, внедрения расчетно-теоретических методов исследования. В настоящее время разработка таких методов находится в начальной стадии, известные расчетные оценки недостаточно обоснованы, отсутствуют данные некоторых физико-химических констант. На основании исследования определены константы, характеризующие массоперенос в системе натрий—сталь—примеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загоруйко Ю.И., Козлов Ф.А., Воробьева Т.А. Дополнительные данные по растворимости индивидуальных веществ в натрии: Препринт ФЭИ-2412, 1997.
2. Краев Н.Д., Умняшкин Е.В., Старков О.В. и др. Влияние физико-химических параметров на скорость массопереноса в жидких щелочных металлах: Препринт ФЭИ-122, 1981.
3. Матусевич Л.Н. Кристаллизация из растворов в химической промышленности. М.: Химия, 1968.
4. Волощук В.М. Кинетическая теория коагуляции. Л.: Гидрометеиздат, 1984.
5. Турчин Н.М., Дробышев А.В. Экспериментальные жидкометаллические стенды. М.: Атомиздат, 1978.
6. Glaeser W. Wear and friction characteristics of structural materials in liquid sodium. — Reactor Technol., 1972, v. 15, № 1, p. 1—10.
7. Алексеев В.В., Козлов Ф.А., Загоруйко Ю.И. Расчет критической скорости транспортировки взвесей в потоке теплоносителя. — Атомная энергия, 1984, т. 57, вып. 1, с. 14—18.
8. Алексеев В.В., Кондратьев А.С. Моделирование массопереноса продуктов коррозии в контурах ЯЭУ с натриевым теплоносителем. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2010, № 4, с. 162—171.
9. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1990.
10. Скрипов В.П., Коверда В.П. Спонтанная кристаллизация переохлажденных жидкостей. М.: Наука, 1984.
11. Кидяров Б.И. Кинетика образования кристаллов из жидкой фазы. Новосибирск: Наука, 1979.

Поступила в Редакцию 25.04.19

УДК 537.9

ЯДЕРНО-МАГНИТНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ-РЕЛАКСОМЕТРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАСХОДА И СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА АЭС

Давыдов В.В., Мязин Н.С. (Санкт-Петербургский политехнический ун-т Петра Великого, г. Санкт-Петербург), Кирюхин А.В. (АО «Концерн Росэнергоатом», г. Москва)
e-mail: davydov_vadim66@mail.ru

Модернизация конструкций ядерных паропроизводящих установок (ЯППУ), эксплуатирующихся на АЭС, требует внедрения новых или совершенствования используемых измерительных приборов и датчиков [1—8]. Одним из важных параметров, который контролируется на АЭС, является расход теплоносителя q_m в первом контуре ЯППУ и питательной воды q_v в контуре турбоагрегата. Для их контроля используют различные типы расходомеров [4, 5, 9—13]. Эти приборы и устройства имеют свои преимущества и недостатки [3—5, 8—14]. К основным недостаткам можно отнести повышение

погрешности измерения до 5% и более со временем их эксплуатации по причине контакта измерительных элементов приборов со средой [3—5, 8—15]. Например, в реакторе БРЕСТ-300 этот процесс идет достаточно интенсивно, так как максимальная температура теплоносителя составляет $T_m \sim 650^\circ\text{C}$, $q_m \sim 0,08 \text{ м}^3/\text{с}$. В некоторых случаях среда обладает высокой химической активностью, например, БН-600 с нитридным уран-плутониевым топливом. В нем теплоносителем является расплав жидкого натрия. Длительное взаимодействие механических элементов расходомеров или измерительных кон-