УДК 620.193.4

А.М. Лапин, С.Г. Ковчур (канд.техн.наук)

КОРРОЗИЯ БЕСКОНЕЧНОЙ ПЛАСТИНЫ В ЛАМИНАРНОМ ПОТОКЕ ЭЛЕКТРОЛИТА

Настоящая работа является частью исследования, посвященного изучению процессов переноса массы в ламинарном и турбулентном потоках, текущих в каналах сложной формы с неизотермическими стенками.

Этот вопрос представляет значительный интерес для исследователей, работающих во многих областях современной техники, в частности ядерной энергетики, где состояние замкнутых контуров в основном определяется процессами отложения различных осадков на стенках и их коррозией. При химическом фрезеровании, при прокачке агрессивных жидкостей по трубам также необходим метод расчета скоростей съема металла или коррозии.

Практическая важность изучения коррозионных процессов и обилие факторов, влияющих на коррозию, обусловили появление за последние время большого количества публикаций по этим вопросам [1 - 8]. В работах показано, что на процесс коррозии оказывают существенное влияние так называемые внешние факторы: состав, температура, скорость среды, ее электрическое сопротивление.

Расчет процесса электрохимической коррозии в настоящее время осуществляется преимущественно графоаналитическим способом [3 - 8]. Сущность его заключается в снятии поляризационных кривых и определении точки пересечения катодной кривой с анодной. Полученное значение коррозионного тока позволяет вычислить материальный эффект коррозии, проявляющийся в анодном процессе перехода ион-атомов металла в раствор. При этом остающиеся свободные электроны отводятся на катодных участках веществами, способными к восстановлению,- деполяризаторами. Тем не менее этот способ неприменим тогда, когда необходимо учитывать влияние внешних условий на коррозию, в частности скорости движения жидкости.

Воздействие внешних факторов (кроме электрического сопротивления) связано с ускорением или торможением диффузии к поверхности металла активных веществ (окислителей или деполяризаторов).

Запишем уравнение конвективной диффузии в нестационарном режиме:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} . \qquad (1)$$

Сформулируем граничные условия:

$$y = 0; \quad - \frac{\partial c}{\partial y} = \beta \frac{c}{\sqrt{t}} = i(t); \qquad (2)$$

$$\left.\begin{aligned} x = 0;\ C = C_o \\ t = 0;\ C = C_o \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

$$t = \infty;\ C = C_o; \quad \beta = \frac{1}{K_н D_n F} , \qquad (4)$$

где i – ток коррозии; $K_н$ – константа окисления с учетом нестационарности процесса; D – коэффициент диффузии, n – валентность ионов металла, F – 96 500 кул/г-экв – число Фарадея.

Кроме того, имеем уравнение неразрывности, которому удовлетворяют составляющие скорости V_x и V_y потока в уравнении (1). Последние могут быть выражены через функцию тока ψ. Таким образом, имеем

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \qquad (5)$$

и

$$V_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad V_y = \frac{\partial \psi}{\partial x} . \qquad (6)$$

После замены переменных (t, x, y) на (t, x, ψ) и несложных преобразований получим

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left[\left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_\psi - V_y \frac{\partial c}{\partial \psi} \right] V_x + V_x \frac{\partial c}{\partial \psi} V_y = \qquad (7)$$

$$= D V_x \frac{\partial}{\partial \psi} \left(V_x \frac{\partial c}{\partial \psi} \right)$$

или

$$\frac{\partial c}{\partial t} + V_x = \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_\psi = DV_x \frac{\partial}{\partial \psi}\left(V_x \frac{\partial c}{\partial \psi}\right).$$

Можно показать, что уравнение (7) с граничным условием (2), записанным в новых переменных, имеет автомодельное решение.

Используя разложение V_x в ряд, можем записать:

$$V_x \approx \gamma \frac{y}{\sqrt{x}}; \qquad \psi \approx \frac{y^2}{\sqrt{x}},$$

где

$$\gamma = 0{,}332 \frac{U_o^{3/2}}{\sqrt{x}}, \text{ т.е. } V_x \approx \gamma \frac{\psi^{1/2}}{x^{1/4}}. \tag{8}$$

С учетом (8) уравнение (7) и граничное условие (2) можно представить следующим образом:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \gamma \frac{\psi^{1/2}}{x^{1/4}}\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_\psi = D\gamma \frac{\psi^{1/2}}{x^{1/4}} \times$$
$$\times \frac{\partial}{\partial \psi}\left(\gamma \frac{\psi^{1/2}}{x^{1/4}} \cdot \frac{\partial c}{\partial \psi}\right); \tag{9}$$

$$-\gamma \frac{\psi^{1/2}}{x^{1/4}} \cdot \frac{\partial c}{\partial \psi}\Big/_{\psi=0} = \beta \frac{c}{\sqrt{t}} = i(t). \tag{10}$$

Остальные граничные условия остаются без изменения.

Произведем замену переменных: (t, x, ψ) на (ξ, η),

где $\xi = \dfrac{t}{x}$, $\eta = \dfrac{\psi}{x^{1/2}}$.

Таким образом, $c = f(\xi, \eta) = f\left(\dfrac{t}{x}; \dfrac{\psi}{x^{1/2}}\right)$.

После несложных преобразований имеем

$$(1 - \xi\sqrt{\eta}\,\gamma)\frac{\partial f}{\partial \xi} - \frac{1}{2}\gamma\,(D\gamma + \eta^{3/2})\frac{\partial f}{\partial \eta} =$$
$$= D\gamma^2 \eta \frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2}; \tag{11}$$

$$-\gamma\left(\sqrt{\xi\eta}\,\frac{\partial f}{\partial \eta}\right) = \beta f. \tag{12}$$

Рассмотрим случай, когда $\xi \to 0$ и $\eta \to 0$. Оценивая порядок коэффициентов перед производными в уравнении (11), можем записать его в виде

$$\frac{\partial f}{\partial \xi} - \frac{1}{2} D\gamma^2 \frac{\partial f}{\partial \eta} = D\gamma^2 \eta \frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2} . \tag{13}$$

Это уравнение так же, как и (1), имеет автомодельное решение. Вводя переменную $z = \frac{\xi}{\eta}$ вместо (13) и (12) можно записать его в виде

$$(1 - \frac{3}{2} D\gamma^2 z) \frac{\partial f}{\partial z} = D\gamma^2 z^2 \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} ; \tag{14}$$

$$-\gamma z^{3/2} \frac{\partial f}{\partial z} = \beta f. \tag{15}$$

Обозначив

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{d f}{d z} = U , \tag{16}$$

получим вместо (14) уравнение с разделяющимися переменными:

$$(1 - \frac{3}{2} D\gamma^2 z) U dz = D\gamma^2 z^2 dU. \tag{17}$$

Интегрируем это уравнение:

$$\int \left(\frac{1}{z^2} - \frac{3D\gamma^2}{2z} \right) dz = \int D\gamma^2 \frac{dU}{U} ;$$

$$-\frac{1}{z} - \frac{3}{2} D\gamma^2 \ln z + \ln A = D\gamma^2 \ln U$$

и после преобразований получаем:

$$\frac{d f}{d z} = \frac{\sqrt[D\gamma^2]{A e^{\frac{1}{2}}}}{\sqrt{z^3}} = \frac{A^{1/D\gamma^2} e^{-\frac{1}{z D\gamma}}}{\sqrt{z^3}} . \tag{18}$$

Обозначим:

$$\frac{1}{z} = \varphi^2 , \qquad z = \frac{1}{\varphi^2} ; \quad z^{3/2} = \frac{1}{\varphi^3} ; dz = - \frac{2}{\varphi^3} .$$

Подставляя эти данные в (18), после интегрирования имеем:

$$f=-A^{1/D\gamma^2} D\gamma \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\frac{1}{D\gamma^2}\varphi^2} d\varphi + B. \quad (19)$$

Известно, что $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\varphi^2} d\varphi = \Phi(z).$ (20)

Эту функцию называют "интегралом вероятности" ошибок или просто "интегралом вероятности". Функция подробно затабулирована, поэтому нам остается, используя граничные условия, вычислить постоянные интегрирования A и B. Очевидно, B = $= C_0$:

$$A^{1/D\gamma^2} = \frac{\beta C_0}{\gamma(1+\sqrt{D\pi})}.$$

Подставляя значения постоянных интегрирования в уравнение (19), получим:

$$f=C_0\left[1-\frac{\beta}{1+\sqrt{D\pi}}\cdot\frac{2}{\sqrt{\Pi}}\int_0^z e^{-1/D\gamma^2\cdot\varphi^2} d\varphi\right]. \quad (21)$$

С учетом (20) уравнение (21) можно записать в виде

$$f=C_0\left[1-\frac{\beta}{1+\sqrt{D\pi}} e^{1/D\gamma^2} \Phi(z)\right]. \quad (22)$$

Полученное уравнение позволяет определить коррозионный ток и, следовательно, материальный эффект пластины в ламинарном потоке коррозионно-активной среды или электролита. Другими словами, уравнение дает возможность учесть влияние одного из внешних факторов на скорость химических процессов, в частности электрохимической коррозии, а также нестационарности процесса. Решения для других предельных случаев могут быть получены также путем оценки коэффициентов перед производными в уравнении (11).

В ы в о д

На основании изложенного можно сделать вывод, что путем оценки коэффициентов перед производными в уравнении конвективной диффузии в нестационарном режиме получено выражение для определения коррозионного тока, т.е. материального эффекта коррозии.

Литература

1. Акимов Г.В. Основы учения о коррозии и защите металлов. М., 1946. 2. Коррозия в воде высокой чистоты. Сб. докл. И.Л.М., 1958. 3. Томашев Н.П. Теория коррозии и защиты металлов. М., 1959. 4. Коррозия реакторных материалов. М., 1960. 5. Справочник по коррозии и износу в ядерных реакторах с водяным охлаждением. М., 1960. 6. Акользин П. А. Коррозия конструкционных материалов ядерных и тепловых энергетических установок. М.,1963. 7. Коррозия конструкционных материалов водоохлаждаемых реакторов Сб.стат.М., 1965. 8. Жук Н.П. Коррозия и защита металлов. Расчеты. М., 1957.