

УДК 620.193.2

## О ПРИЧИНАХ УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ ПОД ТОНКИМИ СЛОЯМИ ВОДЫ

КОРОЛЯНЧУК Д. Г.<sup>1</sup>, *ассист.*,  
НЕФЕДОВ В. Г.<sup>2</sup>, *д. т. н., проф.*,  
ОВЧАРЕНКО В. И.<sup>3\*</sup>, *к. т. н., доц.*

<sup>1</sup> Кафедра материаловедения, Государственное высшее учебное заведение “Украинский государственный химико-технологический университет”, пр. Гагарина, 8, Днепро, 49005, Украина, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

<sup>2</sup> Кафедра технологии электрохимических производств и электротехники, Государственное высшее учебное заведение “Украинский государственный химико-технологический университет”, пр. Гагарина, 8, Днепро, 49005, Украина, тел. +38 (0562) 47-06-74, e-mail: [vnefedov@i.ua](mailto:vnefedov@i.ua)

<sup>3\*</sup> Кафедра материаловедения, Государственное высшее учебное заведение “Украинский государственный химико-технологический университет”, пр. Гагарина, 8, Днепро, 49005, Украина, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

**Аннотация. Постановка проблемы.** Коррозия металлов и сплавов наносит значительный экономический ущерб. Ежегодно около 25 % от общего количества изготавливаемого металла составляют убытки от коррозионного разрушения. Причем скорость коррозии под тонкой пленкой влаги увеличивается в 3...10 раз по сравнению со скоростью коррозии в объеме воды. Поэтому актуальной проблемой для изучения является исследование причин коррозии под тонкими пленками влаги и разработка методов защиты от нее. **Результаты.** Выявлено, что причиной аномально высокой скорости коррозии металлов под тонкими пленками воды может быть увеличение электропроводности поверхности раздела фаз газ – жидкость вследствие туннелирования зарядов по упорядоченным поверхностным структурам. **Научная новизна.** Выявлены возможные причины аномально высокой скорости коррозии под тонкими пленками воды. **Практическая значимость.** Результаты исследований позволяют объяснить процессы коррозионного разрушения металлов, протекающие под тонкими слоями воды, в частности, при атмосферной коррозии.

*Ключевые слова:* коррозия; пленка электролита; структура воды; электропроводность; плотность тока

## ПРО ПРИЧИНИ ЗБІЛЬШЕННЯ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЇ ПІД ТОНКИМИ ШАРАМИ ВОДИ

КОРОЛЯНЧУК Д. Г.<sup>1</sup>, *асист.*,  
НЕФЕДОВ В. Г.<sup>2</sup>, *д. т. н., проф.*,  
ОВЧАРЕНКО В. І.<sup>3\*</sup>, *к. т. н., доц.*

<sup>1</sup> Кафедра матеріалознавства, Державний вищий навчальний заклад “Український державний хіміко-технологічний університет”, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

<sup>2</sup> Кафедра технології електротехнічних виробництв та електротехніки, Державний вищий навчальний заклад “Український державний хіміко-технологічний університет”, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (0562) 47-06-74, e-mail: [vnefedov@i.ua](mailto:vnefedov@i.ua)

<sup>3\*</sup> Кафедра матеріалознавства, Державний вищий навчальний заклад “Український державний хіміко-технологічний університет”, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

**Анотація. Постановка проблеми.** Корозія металів і сплавів завдає значних економічних збитків. Щорічно близько 25 % від загальної кількості металу, що виготовляється, становлять збитки від корозійного руйнування. Причому швидкість корозії під тонкою плівкою вологи збільшується в 3...10 разів порівняно зі швидкістю корозії в об'ємі води. Тому актуальною проблемою для вивчення стало дослідження причин корозії під тонкими плівками вологи і розроблення методів захисту від неї. **Результати.** Виявлено, що причиною аномально високої швидкості корозії металів під тонкими плівками води може бути збільшення електропроводності поверхні розділу фаз газ – рідина внаслідок тунелювання зарядів за упорядкованими поверхневими структурами. **Наукова новизна.** Виявлено можливі причини аномально високої швидкості корозії під тонкими плівками води. **Практична значимість.** Результати досліджень дозволяють пояснити процеси корозійного руйнування металів, що відбуваються під тонкими шарами води, зокрема, за атмосферної корозії.

*Ключові слова:* корозія; плівка електроліту; структура води; електропровідність; густина струму

## ABOUT THE CAUSES OF INCREASING THE CORROSION SPEED UNDER THIN WATER LAYERS

KOROLYANCHUK D.G.<sup>1</sup>, *Ass.*,  
NEFEDOV V.G.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
OVCHARENKO V.I.<sup>3\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Materials Science, State Higher Education Establishment “Ukrainian State University of Chemical Technology”, Gagarina ave., 8, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

<sup>2</sup> Department of Electrochemical Production Technology and Electrical Engineering, State Higher Education Establishment “Ukrainian State University of Chemical Technology”, Gagarina ave., 8, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-06-74, e-mail: [vnefedov@i.ua](mailto:vnefedov@i.ua)

<sup>3\*</sup> Department of Materials Science, State Higher Education Establishment “Ukrainian State University of Chemical Technology”, Gagarina ave., 8, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 753-58-29, e-mail: [kafmat@i.ua](mailto:kafmat@i.ua)

**Abstract. Purpose.** Corrosion of metals and alloys causes significant economic damage. Annually about 25 % of the total amount of metal produced are losses from corrosion destruction. And the rate of corrosion under a thin film of moisture increases by 3...10 times compared with the rate of corrosion in the volume of water. Therefore, an urgent problem for studying is the investigation of the causes of corrosion under thin films of moisture and the development of methods of protection against it. **Findings.** It was found that the anomalously high corrosion rate of metals under thin films of water can be caused by an increase in the electrical conductivity of the gas – liquid interface due to the tunneling of charges along ordered surface structures. **Originality.** Possible causes of abnormally high corrosion rates under thin water films were identified. **Practical significance.** The results of the investigations make it possible to explain the processes of corrosion destruction of metals occurring under thin layers of water, in particular, in atmospheric corrosion.

*Keywords:* corrosion; film of electrolyte; structure of water; electrical conductivity; current density

### Введение

Коррозия металлов и сплавов наносит значительный экономический ущерб. Ежегодно около 25 % от общего количества изготавливаемого металла составляют убытки от коррозионного разрушения. Поэтому довольно остро стоит вопрос об изучении причин коррозии и методов защиты от нее.

Одним из наиболее распространенных видов коррозии металлов является атмосферная коррозия с кислородной деполяризацией, поскольку огромное количество сооружений, конструкций и механизмов эксплуатируется в атмосферных условиях. При этом за счет периодического выпадения осадков, конденсации влаги и температурных перепадов на поверхности металла образуется тонкая пленка воды.

Общеизвестным является тот факт, что под тонкой пленкой влаги скорость разрушения металла увеличивается в 3...10 раз по сравнению со скоростью коррозии в объеме воды [1–5]. Отмечено также, что при уменьшении толщины пленки воды скорость коррозии увеличивается.

Например, в работе [6] приводится зависимость изменения коррозионного тока от времени высыхания пленки влаги на поверхности металла после дождя или росы (рис. 1).

При высыхании поверхности металла толщина слоя воды на ней уменьшается, и коррозионный ток возрастает примерно в четыре раза. Аналогичная зависимость приведена в [4] для коррозии стального образца в растворе сульфата натрия (рис. 2).

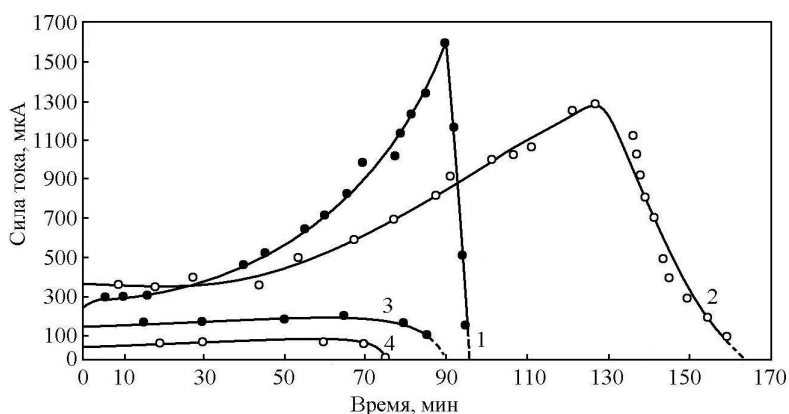


Рис. 1. Кривые изменения силы тока во времени при высыхании пленки дождя и росы: 1 – для дождя при солнечной погоде с ветром; 2 – для дождя при облачной погоде с ветром; 3 – для росы при солнечной погоде; 4 – для росы при облачной погоде / Fig. 1. Curves of the change in the current intensity in time when the rain and dew film dry out: 1 – for rain in sunny weather with wind; 2 – for rain in cloudy weather with wind; 3 – for dew in sunny weather; 4 – for dew in cloudy weather

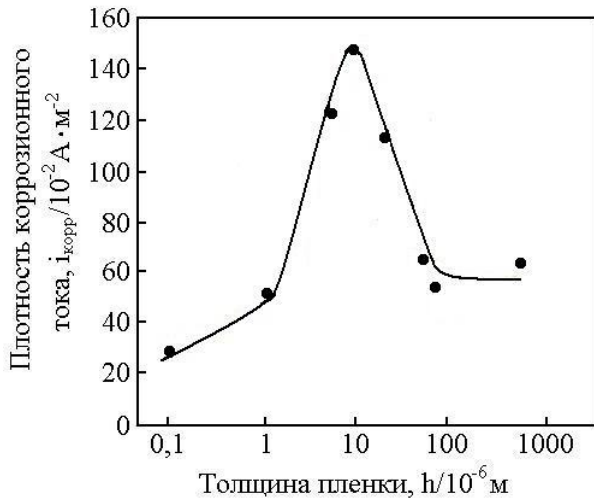


Рис. 2. Зависимость плотности тока коррозии железа от толщины слоя раствора сульфата натрия / Fig. 2. Dependence of the corrosion current density of iron on the thickness of the sodium sulfate solution layer

Необходимо отметить, что повышение скорости коррозии в тонких слоях электролита значительно больше, чем следовало бы ожидать исходя из скорости диффузионных процессов переноса кислорода по закону Фика. В литературе для объяснения данного явления высказывается предположение о наличии интенсивного конвективного перемешивания в пленках электролита толщиной менее 100 мкм [1].

Однако, согласно теории конвективной диффузии Левича [7], можно считать это объяснение неудовлетворительным. Для устранения данного противоречия можно предложить другой механизм переноса вещества и заряда в тонких пленках.

Нами был выявлен новый механизм переноса зарядов в тонких пленках электролитов на границе с воздухом. Основными условиями его проявления являются: а) наличие поверхности раздела фаз газ – жидкость; б) наличие нескомпенсированных  $\text{H}^+$  или  $\text{OH}^-$ -ионов, которые в наших экспериментах генерировались при электролитическом разложении воды.

Электропроводность электролитов измерялась на переменном токе частотой 10 кГц и на постоянном токе в четырехэлектродной ячейке [8]. Показано, что электропроводность пленки гидроксида натрия толщиной 100...300 нм на границе с воздухом превышает электропроводность объема раствора в 150...250 раз (рис. 3).

Коэффициент увеличения электропроводности  $K$ , определяемый как отношение электропроводности в тонкой пленке  $\kappa_S$  к электропроводности в объеме электролита  $\kappa_V$  (1):

$$K = \frac{\kappa_S}{\kappa_V} \quad (1)$$

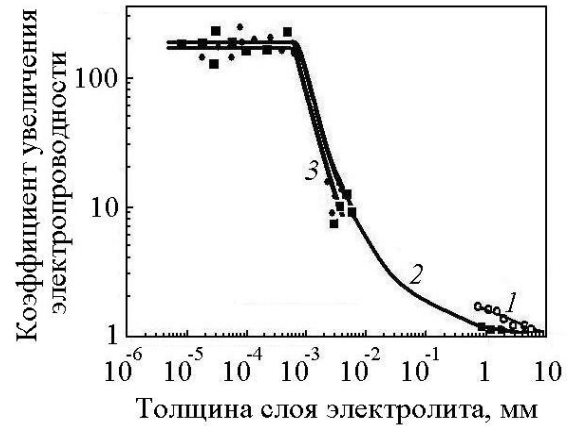


Рис. 3. Зависимость коэффициента увеличения электропроводности от толщины слоя электролита: 1 – измерения при электролизе в слое электролита толщиной 10...1 мм без ПАВ; 2 – измерения при электролизе в слое электролита с ПАВ; 3 – измерения мостовой схемой / Fig. 3. Dependence of the coefficient of increase of the electric conductivity on the thickness of the electrolyte layer: 1 – measurements during the electrolysis in the 10...1 mm thick electrolyte layer without surfactant; 2 – measurements during the electrolysis in the electrolyte layer with the surfactant; 3 – measurements by the bridge circuit

Показано, что электропроводность в тонких слоях и пленках электролита зависит не только от толщины, но и от состава и концентрации электролитов, заряда анионов и катионов, температуры [9–11]. В частности, максимальное увеличение электропроводности любых электролитов наблюдается при температуре 4 °С, при максимально плотном и упорядоченном расположении молекул воды.

Причиной anomalно высокой электропроводности поверхности воды и водных растворов электролитов является структура поверхности. Считается установленным, что вода, кроме тетраэдрической структуры из молекул, объединенных водородными связями, образует гигантские упорядоченные кластеры, особо устойчивые на поверхности воды. Наличие таких кластеров показано в работах [12; 13]. Перенос зарядов по этим кластерам осуществляется  $\text{H}^+$ -ионами в кислых средах,  $\text{OH}^-$ -ионами в щелочных и  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ -ионами в нейтральных. При этом перенос заряда по кластеру напоминает туннелирование электронов на электронных орбиталях. Такой механизм переноса называется крокетным.

В коррозионных системах разница электродных потенциалов значительно меньше напряжения разложения воды. Однако доказано наличие на поверхности металла адсорбционных молекул воды, объединенных с электронным газом металла, которые получили название поверхностных комплексов с переносом заряда (ПКПЗ) [14; 15]. Молекулы воды в этих комплексах могут

диссоциировать на протон и адсорбционно-связанные гидроксид-ионы, то есть обеспечивать появление нескомпенсированных  $H^+$  и  $OH^-$ -ионов без электролитического разложения воды. Это обеспечивает проявление крокетного механизма в коррозионных системах.

Целью данной работы является объяснение аномально высокой скорости коррозии металлов под тонкой пленкой электролита с помощью теории аномально высокой электропроводности.

**Результаты исследований**

*Расчет зависимости плотности тока коррозии от толщины пленки влаги.* На рисунке 1 приведена зависимость тока коррозии от времени высыхания пленки. Для пересчета зависимости тока от толщины пленки нами был рассчитан поток неравновесного испарения (2):

$$g_{II} = \frac{45,6C_B S(P_1 - \phi P_2)}{P_B} \quad (2)$$

где 45,6 – плотность потока испарения при температуре кипения в абсолютно сухой воздух (максимально возможный по скорости процесс), [кг/(час·м<sup>2</sup>)];  $C_B$  – коэффициент, учитывающий интенсивность движения воздуха над ванной;  $C_B = 0,86$  – для быстрого движения воздуха;  $P_B$  – барометрическое давление, атм;  $P_1$  – давление насыщенного пара при температуре раствора, атм;  $P_2$  – давление насыщенного пара при температуре воздуха, атм.

При этом были приняты следующие допущения.

Площадь электродов – 1 см<sup>2</sup>, температура воздуха – +20 °С, атмосферное давление  $P_B = 760$  мм рт. ст., относительная влажность воздуха  $\phi = 90$  %.  $P_1 = P_2 = P_{20} = 17,6$  мм рт. ст. [16].

Расчеты показали, что поток испарения с поверхности 1 см<sup>2</sup> составляет  $9 \cdot 10^{-3}$  мл/час или  $1,5 \cdot 10^{-4}$  мл/мин (3):

$$g_{II} = \frac{45,6 \cdot 0,86 \cdot 1 \cdot 10^{-4} (17,6 - 0,9 \cdot 17,6)}{760} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ л/час} \cdot (3)$$

Это соответствует уменьшению толщины слоя влаги на  $1,5 \cdot 10^{-4}$  см за одну минуту.

Если считать, что полное высыхание видимой влаги наблюдается при 90 минутах (см. рис. 1), то начальное количество влаги на поверхности составит  $0,135 \cdot 10^{-4}$  л, а толщина слоя 0,0135 см.

Изменение плотности тока коррозии по времени, с учетом приведенных выше расчетов, для кривой 1 (рис. 1) приведено на рисунке. 4. По данным [17] принимаем, что плотность тока коррозии железа в объеме воды (при максимальной толщине пленки электролита) равна  $0,5 \text{ А/м}^2$ .

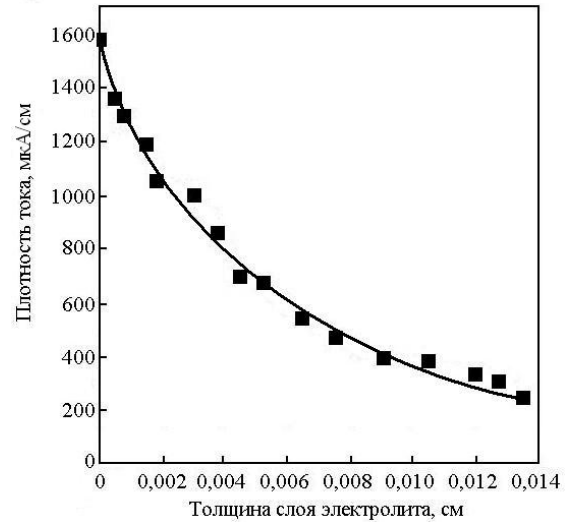


Рис. 4. Зависимость плотности коррозионного тока от толщины слоя электролита / Fig. 4. Dependence of the density of corrosion current on the thickness of the electrolyte layer

*Расчет зависимости удельной электропроводности воды от толщины ее слоя.* Измеренная нами электропроводность дистиллированной воды в объеме составила  $3,6 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ , а в слое толщиной 1 мм эта величина составила  $3,8 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-3} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ . Исходя из этого, коэффициент увеличения электропроводности составил 9...16 раз (16 раз получено в работе [18]). Для расчета воспользуемся законом Ома, правилами Кирхгофа и результатами измерения электропроводности слоя гидроксида натрия в ячейке толщиной 1 мм [19].

Условно разделим слой электролита в ячейке толщиной  $H$  на  $n$  более тонких слоев толщиной  $h$  (рис. 5). Будем считать, что толщина всех слоев, а также поверхностного слоя  $h_{II}$ , одинакова, тогда  $h_{II} = h$ . Тогда общая толщина слоя жидкости составляет  $H = h \cdot n$  (рис. 5). Поскольку поверхностный слой в ячейке один, количество объемных слоёв  $h_0$  будет равно  $(n-1)$ .



Рис. 5. К расчету удельной электропроводности поверхностных слоев электролита / Fig. 5. To the calculation of the specific electrical conductivity of the surface layers of the electrolyte

При включении электролиза ток идет по слоям электролита тем больше, чем больше электропроводность электролита, но падение

напряжения в слоях с одинаковой геометрией при этом должно быть одинаковым (4):

$$\Delta U_{\beta} = \Delta U_{\gamma} \quad (4)$$

или (5):

$$\frac{1}{\kappa_{\beta}} \frac{l}{bh} I_{\beta} = \frac{1}{\kappa} \frac{l}{(n-1)bh} (I_{\beta} - I_{\gamma}) \quad (5)$$

где  $I_{\beta}$  – ток, протекающий по поверхностному слою,  $\Delta U_{\beta}$  – падение напряжения в поверхностном слое,  $\Delta U_{\gamma}$  – падение напряжения в слоях в глубине объема электролита,  $(I_{\beta} - I_{\gamma}) = I_{\gamma}$  – ток, протекающий по слоям в объеме электролита.

В свою очередь, падение напряжения в ячейке с тем же электролитом и одинаковой геометрией, но без поверхности раздела газ – жидкость, равно (6):

$$\Delta U_{\beta} = \frac{1}{\kappa} \frac{l}{bh} I_{\beta} \quad (6)$$

И, как следует из приведенных выше материалов, превышает падение напряжения  $\Delta U_{\gamma}$  в  $K$  раз (7):

$$\Delta U_{\beta} = \frac{\Delta U_{\gamma}}{K} \quad (7)$$

Приравняв правую часть уравнения (5) формуле (6) с учетом (7), получаем (8):

$$K \frac{1}{\kappa} \frac{l}{(n-1)bh} (I_{\beta} - I_{\gamma}) = \frac{1}{\kappa} \frac{l}{nbh} I_{\beta} \quad (8)$$

Отсюда (9):

$$I_{\beta} - I_{\gamma} = \frac{n-1}{Kn} I_{\beta} \quad (9)$$

Это позволяет определить соотношение между токами в поверхностном слое и в глубине электролита, в зависимости от количества слоев, то есть их толщины (10):

$$I_{\gamma} = I_{\beta} \left( 1 - \frac{n-1}{Kn} \right) \quad (10)$$

Сравнение величины тока по формуле (11) с током, текущим в одном слое толщиной  $h$  в такой же по геометрии ячейке с тем же электролитом, но без поверхности раздела воздух – электролит:

$$I_{1\beta} = \frac{I_{\beta}}{n} \quad (11)$$

позволяет определить коэффициент увеличения электропроводности (КУЭ) поверхности (12):

$$K_{\Pi} = \frac{I_{\Pi}}{I_{1\beta}} = n - \frac{n-1}{K} \quad (12)$$

Зависимость КУЭ от толщины слоя воды показана на рисунке 6 (кривая 1).

Примем, что отношение плотности тока в тонких пленках к плотности коррозионного тока в объеме электролита для одной и той же электрохимической системы называется коэффициентом увеличения тока коррозии (13):

$$K_i = \frac{i_{nl}}{i_{об}} \quad (13)$$

По данным [17] принимаем, что для железа плотность коррозионного тока в объеме электролита составляет  $50 \text{ мкА/см}^2$ . Тогда коэффициент увеличения тока коррозии меняется в пределах от 5 до 30 (рис. 6, кривая 2).

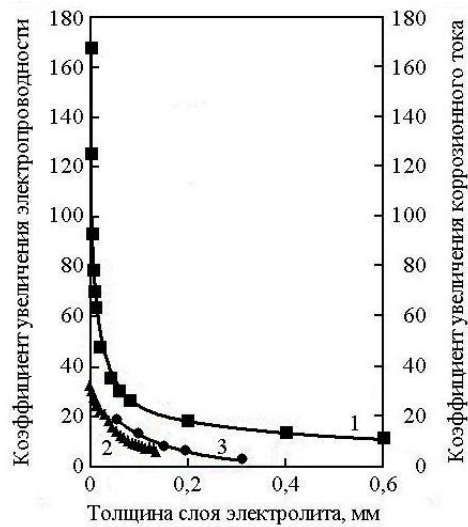


Рис. 6. Зависимость коэффициентов увеличения электропроводности воды (1) и коэффициента увеличения плотности тока коррозии железа (2, [6]) и бронзы (3 [20]) исходя из данных, представленных на рисунке 4) и от толщины слоя электролита / Fig. 6. Dependence of the coefficients of increasing the electrical conductivity of water (1) and the coefficient of increase in the current density of corrosion of iron (2, [6]) and bronze (3 [20]) based on the data presented in figure 4) and the thickness of the layer of electrolyte

Аналогичные расчеты были проведены для бронзы. Плотность тока коррозии в объеме электролита составляла  $18,7 \text{ мкА/см}^2$ , а плотность тока коррозии при изменении толщины пленки воды увеличивалась в 5...20 раз.

Из приведенных кривых видно, что с уменьшением толщины слоя влаги повышается коэффициент увеличения электропроводности и коэффициент увеличения плотности коррозионного тока. Однако следует отметить, что коэффициент увеличения плотности коррозионного тока имеет меньшие значения, по сравнению с величиной возрастания электропроводности для дистиллированной воды. Вероятно, это связано с

увеличением поляризационного сопротивления электродным процессам при увеличении плотности тока.

Показано, что причиной аномально высокой скорости коррозии металлов под тонкими пленками воды может быть увеличение электропроводности поверхности раздела фаз газ – жидкость вследствие туннелирования зарядов по упорядоченным поверхностным структурам.

### Выводы

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Розенфельд И. Л. Атмосферная коррозия металлов : монография / И. Л. Розенфельд. – Москва : изд-во АН СССР, 1960. – 372 с.
2. Nishikata A. Influence of Electrolyte Layer Thickness and pH on the Initial Stage of the Atmospheric Corrosion of Iron / A. Nishikata, V. Ichihara, V. Hayashi, T. Tsuru // J Electrochem. Soc. – April 1997. – Vol. 144, № 4. – Pp. 1244–1252.
3. Ву Дин Вуй. Атмосферная коррозия металлов в тропиках : монография / Ву Дин Вуй. – Москва : Наука, 1994. – 240 с.
4. Morcillo M. Atmospheric corrosion of mild steel / M. Morcillo, D. de la Fuente, I. Díaz, H. Cano // Revista de Metalurgia. – Septiembre – Octubre, 2011. – Vol. 47 (5). – Pp. 426–444.
5. Nagano Hiroo. Atmospheric Corrosion Process for Weathering Steel / Hiroo Nagano, Masato Yamashita // Corrosion Science and Technology. – 2008. – Vol. 7, № 2. – Pp. 119–124.
6. Томашов Н. Д. Теория коррозии и защиты металлов : монография / Н. Д. Томашов. – Москва : изд-во АН СССР, 1959. – 592 с.
7. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика : монография / В. Г. Левич. – Москва : Изд-во ГИФМЛ, 1959. – 700 с.
8. Нефедов В. Г. Влияние толщины слоя электролита на его электропроводность / В. Г. Нефедов, В. В. Матвеев, Д. Г. Королянчук, А. А. Вчерашняя // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – № 1. – С. 194–198.
9. Королянчук Д. Г. Влияние ионного состава электролита на электропроводность поверхности раздела фаз газ – жидкость / Д. Г. Королянчук, В. Г. Нефедов // Вопросы химии и химической технологии. – 2011. – № 4 (1). – С. 264–266.
10. Королянчук Д. Г. Влияние температуры на электропроводность в тонких слоях электролита на границе с воздухом / Д. Г. Королянчук, В. Г. Нефедов // Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – № 1. – С. 171–175.
11. Королянчук Д. Г. Влияние pH раствора на электропроводность тонких слоев с поверхностью воздух – электролит / Д. Г. Королянчук, В. Г. Нефедов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – Вип. 32. – С. 100–105.
12. Гончарук В. В. Кластеры и гигантские гетерофазные кластеры воды / В. В. Гончарук, В. Н. Смирнов, А. В. Сыроешкин, В. В. Маляренко // Химия и технология воды. – 2007. – Т. 29, № 1. – С. 3–17.
13. Гончарук В. В. Кластерная структура тяжелой, обычной и легкой воды / В. В. Гончарук, Е. А. Орехова, В. В. Маляренко // Украинский химический журнал. – 2009. – Т. 75, № 6. – С. 80–85.
14. Подобаев А. Н. Адсорбционное взаимодействие воды с металлами и его роль в процессах электрохимической коррозии: автореф. дисс. на соиск. уч. степ. д-ра хим. наук : 05.17.03 / А. Н. Подобаев – Москва, 2008. – 48 с.
15. Подобаев А. Н. Адсорбция молекул воды в процессе электрохимической ионизации металлов группы железа // Российский химический журнал. – 2008. – Т. LII, № 5. – С. 25–31.
16. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие для вузов / [К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков, под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова]. – Ленинград : Химия, 1987. – 576 с.
17. Hoerl S. Advances in understanding atmospheric corrosion of iron. II. Mechanistic modelling of wet–dry cycles / S. Hoerl, F. Mazaudier, Ph. Dillmann, G. Santarini // Corrosion Science. – 2004. – Vol. 46. – Pp. 1431–1465.
18. Бондарь Д. В. Влияние ионного состава раствора и температуры на аномальную электропроводность тонких слоев электролита при электролизе воды / Д. В. Бондарь, В. Г. Нефедов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2008. – № 16. – С. 16–19.
19. Бондарь Д. В. Электропроводность приповерхностного слоя электролита на границе раздела фаз газ – жидкость. Модельные представления / Д. В. Бондарь, В. Г. Нефедов // Вопросы химии и химической технологии. – 2013. – № 4. – С. 131–135.
20. Liao Xiao-ning. In-situ investigation of atmospheric corrosion behavior of bronze under thin electrolyte layers using electrochemical technique // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2012. – Vol. 22. – Pp. 1239–1249.

### REFERENCES

1. Rozenfel'd I.L. *Atmosfernaya korroziya metallov* [Atmospheric corrosion of metals]. Moscow : AS USSR, 1960, 372 p. (in Russian).
2. Nishikata A., Ichihara V., Hayashi V. and Tsuru N. Influence of Electrolyte Layer Thickness and pH on the Initial Stage of the Atmospheric Corrosion of Iron. J Electrochem. Soc., April 1997, vol. 144, no. 4, pp. 1244–1252.
3. Vu Din Vuy. *Atmosfernaya korroziya metallov v tropikakh* [Atmospheric corrosion of metals in the tropics]. Moscow : Nauka Publ., 1994, 240 p. (in Russian).
4. Morcillo M., de la Fuente D., Díaz I. and Cano H. Atmospheric corrosion of mild steel. Revista de Metalurgia. September – October, 2011, vol. 47 (5), pp. 426–444.
5. Nagano Hiroo and Masato Yamashita. Atmospheric Corrosion Process for Weathering Steel. Corrosion Science and Technology, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 119–124.
6. Tomashov N.D. *Teoriya korrozii i zashchity metallov* [Theory of corrosion and protection of metals]. Moscow : AS USSR, 1959, 592 p. (in Russian).

7. Levich V.G. *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* [Physico-chemical hydrodynamics]. Moscow : GIFML Publ., 1959, 700 p. (in Russian).
8. Nefedov V.G., Matveyev V.V., Korolyanchuk D.G. and Vcherashnyaya A.A. *Vliyanie tolshchiny sloya elektrolita na yego elektroprovodnost'* [Effect of the thickness of the electrolyte layer on its electrical conductivity]. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Questions of chemistry and chemical technology]. 2010, no. 1, pp. 194–198. (in Russian).
9. Korolyanchuk D.G. and Nefedov V.G. *Vliyanie ionnogo sostava elektrolita na elektroprovodnost' poverkhnosti razdela faz gaz – zhidkost'* [Influence of the ionic composition of the electrolyte on the electrical conductivity of the gas – liquid interface]. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Questions of chemistry and chemical technology]. 2011, no. 4 (1), pp. 264–266. (in Russian).
10. Korolyanchuk D.G. and Nefedov V.G. *Vliyanie temperatury na elektroprovodnost' v tonkikh sloyakh elektrolita na granitse s vozdukhom* [Effect of temperature on electrical conductivity in thin layers of electrolyte at the boundary with air]. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Questions of chemistry and chemical technology]. 2012, no. 1, pp. 171–175. (in Russian).
11. Korolyanchuk D.G. and Nefedov V.G. *Vliyanie pH rastvora na elektroprovodnost' tonkikh sloyev s poverkhnost'yu vozdukh – elektrolit* [Effect of pH of the solution on the electrical conductivity of thin layers with the air-electrolyte surface]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv : NTU «KHPÍ», 2012, iss. 32, pp. 100–105. (in Russian).
12. Goncharuk V.V., Smirnov V.N., Syroyeshkin A.V. and Malyarenko V.V. *Klastery i gigantskiye geterofaznyye klasteri vody* [Clusters and giant heterophase clusters of water]. *Khimiya i tekhnologiya vody* [Chemistry and technology of water]. 2007, vol. 29, no. 1, pp. 3–17. (in Russian).
13. Goncharuk V.V., Orehova Ye.A. and Malyarenko V.V. *Klasternaya struktura tyazheloy, obychnoy i legkoy vody* [Cluster structure of heavy, ordinary and light water]. *Ukrainskiy khimicheskii zhurnal* [Ukrainian Chemical Journal]. 2009, vol. 75, no. 6, pp. 80–85. (in Russian).
14. Podobayev A.N. *Adsorbtsionnoye vzaimodeystviye vody s metallami i yego rol' v protsessakh elektrokhimicheskoy korrozii : avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni d-r. khim. nauk: 05.17.03* [Adsorption interaction of water with metals and its role in the processes of electrochemical corrosion : the author's abstract of the thesis for the degree of Doctor of Chemical Sciences]. Moscow, 2008, 48 p. (in Russian).
15. Podobayev A.N. *Adsorbtsiya molekul vody v protsesse elektrokhimicheskoy ionizatsii metallov gruppy zheleza* [Adsorption of water molecules in the process of electrochemical ionization of metals of the iron group]. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal* [Russian Chemical Journal]. 2008, vol. LII, no. 5, pp. 25–31. (in Russian).
16. Pavlov K.F., Romankov P.G. and Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [Examples and tasks on the course of processes and devices of chemical technology]. Leningrad : Khimiya, 1987, 576 p. (in Russian).
17. Hoerl S., Mazaudier F., Dillmann Ph. and Santarini G. Advances in understanding atmospheric corrosion of iron. II. Mechanistic modelling of wet–dry cycles. *Corrosion Science*, 2004, vol. 46, pp. 1431–1465.
18. Bondar' D.V. and Nefedov V.G. *Vliyanie ionnogo sostava rastvora i temperatury na anomal'nyu elektroprovodnost' tonkikh sloyev elektrolita pri elektrolize vody* [Effect of the ionic composition of the solution and temperature on the anomalous electrical conductivity of thin electrolyte layers during the electrolysis of water]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. 2008, no. 16, pp. 16–19. (in Russian).
19. Bondar' D. V. *Elektroprovodnost' pripoverkhnostnogo sloya elektrolita na granitse razdela faz gaz-zhidkost'. Model'nyye predstavleniya / D. V. Bondar', V. G. Nefedov / Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii. – 2013. – №4.– pp. 131-135.* (in Russian)
20. Liao Xiao-ning. In-situ investigation of atmospheric corrosion behavior of bronze under thin electrolyte layers using electrochemical technique. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2012, vol. 22, pp. 1239–1249.

*Статья рекомендована к публикации д-ром хим. наук, проф. Н. Д. Кошелем (Украина), д-ром техн. наук, проф. О. Б. Гириньом (Украина).*

Поступила в редколлегию 20.11.2017

Принята в печать 30.11.2017