

УДК 544.653+620.193.013+620.197.3

## ИНГИБИТОРНАЯ ЗАЩИТА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В ПОТОКЕ РАСТВОРА ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ, СОДЕРЖАЩЕГО ФОСФАТ ЖЕЛЕЗА (III)

© 2025 г. Я. Г. Авдеев<sup>a,\*</sup>, А. В. Панова<sup>a</sup>, Т. Э. Андреева<sup>a</sup>

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук

119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4, Россия

\*e-mail: avdeevavdeev@mail.ru

Поступила в редакцию 03.09.2024 г.

После доработки 16.09.2024 г.

Принята к публикации 24.09.2024 г.

Изучена коррозия низкоуглеродистой стали в потоке растворов  $H_3PO_4$ , содержащих  $FePO_4$ , включая среды, с добавками смесевых ингибиторов коррозии, состоящих из 3-замещенного производного 1,2,4-триазола (ИФХАН-92) и KNCS. В обсуждаемой среде на стали реализуются парциальные реакции анодной ионизации железа, катодного восстановления  $H^+$  и катионов Fe(III). Две первых реакции характеризуются кинетическим контролем, а последняя – диффузионным. Ускоряющее действие  $FePO_4$  на коррозию стали в растворе  $H_3PO_4$  преимущественно обусловлено восстановлением Fe(III). В ингибиранной кислоте ускоряющее действие катионов Fe(III) оказывается на всех парциальных реакциях стали. Несмотря на такое ускоряющее действие, смеси ИФХАН-92 и KNCS сохраняют высокое тормозящее действие в отношении электродных реакций стали, что является важным результатом. Данные по коррозии низкоуглеродистой стали в потоке исследуемых сред, полученные по массопотере металлических образцов, находятся в удовлетворительном соответствии с результатами исследования парциальных электродных реакций. Отмечено ускоряющее действие  $FePO_4$  на коррозию стали в потоке растворов  $H_3PO_4$ , в том числе в присутствии ингибиторов. В этих средах коррозия стали определяется конвективным фактором, что характерно для процессов с диффузионным контролем. Смесевые ингибиторы ИФХАН-92 + KNCS обеспечивают существенное замедление коррозии стали в потоке раствора  $H_3PO_4$ , содержащего  $FePO_4$ , что является результатом эффективного замедления им всех парциальных электродных реакций металла.

**Ключевые слова:** конвекция, диффузионная кинетика, коэффициент диффузии, кислотная коррозия, низкоуглеродистая сталь, фосфорная кислота, фосфат железа (III), ингибиторы коррозии

DOI: 10.31857/S0424857025010067, EDN: DKOUII

## INHIBITORY PROTECTION OF LOW CARBON STEEL IN A FLOW OF PHOSPHORIC ACID SOLUTION CONTAINING IRON (III) PHOSPHATE

© 2025 Ya. G. Avdeev<sup>a,\*</sup>, A. V. Panova<sup>a</sup>, and T. E. Andreeva<sup>a</sup>

Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences

31-4, Leninsky prospect, 119071 Moscow, Russia

\*e-mail: avdeevavdeev@mail.ru

The corrosion of low carbon steel in a flow of  $H_3PO_4$  solutions containing  $FePO_4$ , including media with additives of mixture of corrosion inhibitors consisting of a 3-substituted derivative of 1, 2, 4-triazole (IFKhAN-92) and KNCS, was studied. In the discussed medium, partial reactions of anodic ionization of iron, cathodic reduction of  $H^+$  and Fe (III) cations are realized on steel. The first two reactions are characterized by kinetic control, and the last one is diffusion-controlled. The accelerating effect of  $FePO_4$  on steel corrosion in a  $H_3PO_4$  solution is mainly due to the reduction of Fe (III). In inhibited acid, the accelerating effect of Fe (III) cations affects all partial reactions of steel. Despite such an accelerating effect, the mixtures of IFKhAN-92 and KNCS retain a high inhibitory effect on the electrode reactions of steel, which is an important result.

The data on corrosion of low carbon steel in the flow of the studied media, obtained from the mass loss of metal samples, are in satisfactory agreement with the results of the study of partial electrode reactions. The accelerating effect of  $\text{FePO}_4$  on steel corrosion in the flow of  $\text{H}_3\text{PO}_4$  solutions, including in the presence of inhibitors, is noted. In these media, steel corrosion is determined by the convective factor, which is typical for processes with diffusion control. Mixtures of inhibitors IFKhAN-92 + KNCS provide significant slowdown of steel corrosion in the flow of  $\text{H}_3\text{PO}_4$  solution containing  $\text{FePO}_4$ , which is the result of its effective slowdown of all partial electrode reactions of the metal.

**Keywords:** convection, diffusion kinetics, diffusion coefficient, acid corrosion, low carbon steel, phosphoric acid, iron (III) phosphate, corrosion inhibitors

## ВВЕДЕНИЕ

Перспективными промышленными средами для очистки поверхностей изделий и технологического оборудования, изготовленных из низкоуглеродистых сталей, от термической окалины, ржавчины и минеральных отложений, часто включающих в свой состав фазы оксидов и оксигидроксида  $\text{Fe(III)}$ , являются растворы фосфорной кислоты. Относительно высокая скорость растворения в этих средах фаз оксидов железа ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) – их важное преимущество, по сравнению с растворами соляной и серной кислот, традиционно используемых для кислотной очистки сталей [1–3]. В ходе эксплуатации растворы  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , в первую очередь вследствие их взаимодействия с поверхностными фазами оксидов и оксигидроксида  $\text{Fe(III)}$ , накапливают фосфаты  $\text{Fe(III)}$ . Фосфат  $\text{Fe(III)}$  не растворяется в воде. Растворимость фосфата  $\text{Fe(III)}$  в растворах  $\text{H}_3\text{PO}_4$  – результат его химического взаимодействия с кислотой, приводящего к образованию смеси кислых фосфатов сложного состава [4]. В дальнейшем такие системы будем формально рассматривать как раствор  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащий  $\text{FePO}_4$ .

Накопление в рассматриваемых средах растворимых солей  $\text{Fe(III)}$  существенно повышает их окислительную способность, усиливает агрессивность растворов в отношении стальных конструкций [5], и делает малоэффективным в таких растворах применение ингибиторов коррозии (ИК) [6]. Специфической особенностью коррозии сталей в растворах кислот, содержащих соли  $\text{Fe(III)}$ , является их чувствительность к гидродинамическим параметрам среды. В растворах кислот, включая ингибиционные среды, коррозия стали усиливается при увеличении скорости потока среды [7].

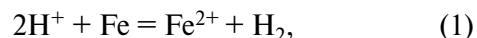
Практическая значимость представленного исследования определяется необходимостью создания для нужд современного производства эффективных ИК низкоуглеродистых сталей в растворах кислот [8]. При этом важно представлять,

как разрабатываемые ИК будут защищать сталь в потоке коррозионной среды при накоплении в ней солей  $\text{Fe(III)}$ .

Для понимания процессов, происходящих в системах низкоуглеродистая сталь – раствор  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащий  $\text{FePO}_4$ , важно проанализировать влияние условий конвекции агрессивной среды как на отдельные стадии, так и на коррозию стали в целом. Следует установить влияние ИК на кинетические параметры системы. Оценка влияния гидродинамических параметров растворов кислот, содержащих соли  $\text{Fe(III)}$ , на коррозию стали важна не только в теоретическом плане, позволяющем выделить диффузионные стадии коррозионного процесса и определить их кинетические параметры, но и в практическом, поскольку промышленная эксплуатация этих сред часто осуществляется в условиях потока жидкости или сопровождается существенной естественной конвекцией в результате выделения на поверхности металла газообразного водорода, образующегося в результате реакции металла с кислотой.

В качестве замедлителей коррозии стали в растворе  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащей  $\text{FePO}_4$ , нами исследована смесь ИФХАН-92 (3-замещенный 1,2,4-триазол) и KNCS. Показано [9], что смесь 5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS эффективно защищает низкоуглеродистые стали в статических растворах  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . В основе защитного действия этого ИК лежит его способность формировать из раствора  $\text{H}_3\text{PO}_4$  на поверхности стали полимолекулярный слой, состоящий из полимерного комплекса, образованного катионами  $\text{Fe(II)}$ , молекулами 3-замещенного 1,2,4-триазола и роданид анионами [10].

Коррозия низкоуглеродистых сталей в растворах минеральных кислот (так называемых “неокислителей”) в упрощенном виде описывается суммарной реакцией



которая является результатом преимущественно протекания парциальных реакций [11, 12]: катодного выделения водорода



и анодного растворения железа



Особенности механизма реакции (2), реализуемой на поверхности сталей в растворах кислот, обсуждаются в работах [11–13]. Механизмы реакции (3) изучались Хойслером [11], Бокрисом [14], Колотыркиным и Флорианович [15], Решетниковым [16]. Колотыркин и Флорианович показали [15], что растворение железа в фосфатных растворах осуществляется с участием  $\text{OH}^-$  и  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , при этом участие ионов  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  в анодном процессе наблюдается только при  $\text{pH} > 4$ . Позднее Решетниковым [16], при изучении растворов с более высоким суммарным содержанием фосфат-анионов, показано участие  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  в анодной реакции на стали при более низких значениях  $\text{pH}$ .

Нами показано [5], что в растворах  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащих фосфат Fe(III), коррозия низкоуглеродистых сталей реализуется путем протекания трех независимых парциальных реакций – анодной ионизации железа (3), катодного выделения водорода (2) и восстановления катионов Fe(III):



В растворах с высоким содержанием  $\text{H}_3\text{PO}_4$  парциальные реакции (2) и (3) реализуются с кинетическим контролем, а реакция (4) – с диффузионным контролем.

В нашем исследовании представляется целесообразным изучить возможность замедления парциальных реакций стали (2)–(4) в растворах  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащих фосфат Fe(III), смесевыми добавками ИФХАН-92 + KNCS. Нами предполагается, что эффективное торможение реакций (2)–(4) изучаемыми смесевыми ИК должно обеспечить существенное замедление коррозии стали не только в статических, но и в динамических растворах  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащих фосфат Fe(III).

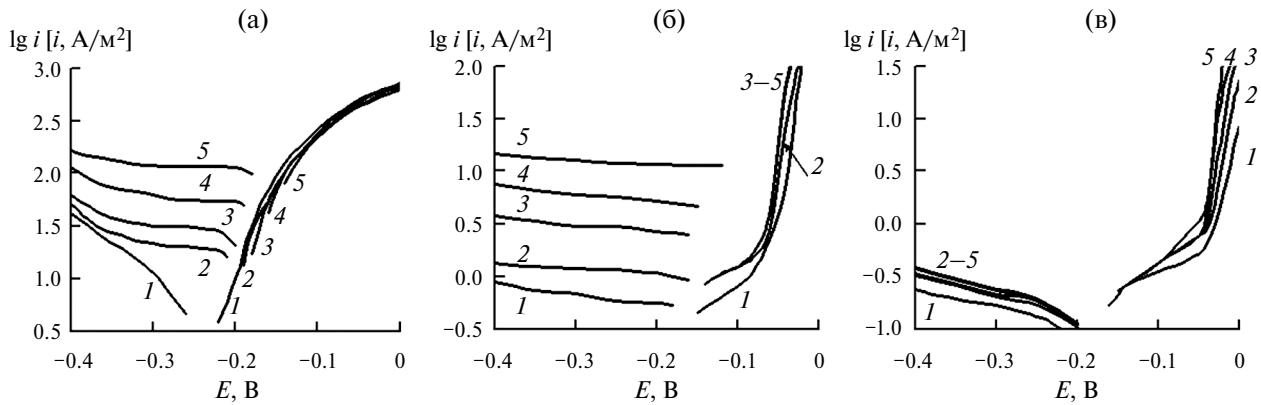
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для приготовления растворов использовали  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (х.ч.) и дистиллированную воду. Растворы  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащие фосфат Fe(III), получали реакцией  $\text{Fe(OH)}_3$ , осажденного  $\text{NaOH}$  (х.ч.) из раствора  $\text{FeCl}_3$ , с избытком  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . Для приготовления раствора хлорида Fe(III) использовали  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (ч.). В качестве замедлителей коррозии исследовали ингибитор ИФХАН-92, являющийся 3-замещенным 1,2,4-триазолом, и KNCS (х.ч.).

Электрохимические измерения на низкоуглеродистой стали Ст3 (состав, в % по массе: C – 0.14–0.22; P – 0.04; Si – 0.15–0.33; Mn – 0.40–0.65; S – 0.05; Cr – 0.3; Ni – 0.3; N – 0.008; Cu – 0.3; As – 0.08; остальное – Fe) проводили на вращающемся дисковом электроде ( $n = 460$  об/мин) в растворе 2 М  $\text{H}_3\text{PO}_4$  при  $t = 25^\circ\text{C}$ . Потенциал стали измеряли относительно хлоридсеребряного электрода, заполненного насыщенным раствором KCl. Стальной электрод зачищали наждачной бумагой (М20) и обезжиривали ацетоном. Поляризационные кривые (ПК) снимали с помощью потенциостата ЭЛ-02.061 при скорости поляризации рабочего электрода 0.0005 В/с. Перед наложением поляризации электрод выдерживали в исследуемом растворе 30 мин для установления потенциала свободной коррозии  $E_{\text{cor}}$ , а затем снимали кривые анодной и катодной поляризации стали. После их снятия изучали зависимость катодного тока, поддерживая  $E = -0.30$  В, от скорости вращения электрода ( $n = 0, 460, 780, 1090$  и 1400 об/мин). В случае коррозии стали в растворах  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащих соли Fe(III), катодный процесс включает реакцию (2). Характер ее протекания может зависеть от давления газообразного водорода в системе. Для получения стабильных результатов электрохимических измерений, удаление растворенного кислорода воздуха из исследуемых сред проводили путем их деаэрации газообразным водородом. Это позволяло осуществлять электрохимические измерения при постоянном давлении газообразного водорода в системе. Растворы деаэрировали в течение 30 мин до начала проведения исследований. Водород получали в электролизере из раствора NaOH. Средняя скорость подачи газа составляла 1 мл/с. На время выполнения электрохимических измерений пропускание водорода непосредственно через раствор кислоты прекращалось.

В качестве базовой скорости вращения стального дискового электрода при проведении электрохимических исследований выбрано наименьшее из обсуждаемых значений – 460 об/мин. При такой частоте вращения плотности кинетического и диффузионного токов, характеризующих катодную реакцию, реализующуюся на электроде в условиях проведенного эксперимента, наиболее близкие. Такое положение позволяет надеяться на получение более корректной оценки влияния добавок фосфата Fe(III) на парциальные катодные реакции стали.

Влияние ингибиторов на электродные процессы оценивали по величинам коэффициента торможения катодной



**Рис. 1.** Поляризационные кривые стали Ст3 в 2 М  $H_3PO_4$  (а) с добавками 0.5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS (б) и 5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS (в), содержащей  $FePO_4$ , М: 1 – 0; 2 – 0.01; 3 – 0.02; 4 – 0.05; 5 – 0.10. Значение  $n = 460$  об/мин;  $t = 25^\circ C$ .

$$\gamma_c = i_{c,0} i_{c,in}^{-1} \quad (5)$$

и анодной реакций:

$$\gamma_a = i_{a,0} i_{a,in}^{-1}, \quad (6)$$

где  $i_{c,0}$  и  $i_{a,0}$  – плотности катодного и анодного токов в фоновом растворе,  $i_{c,in}$  и  $i_{a,in}$  – плотности катодного и анодного токов в растворе с изучаемой добавкой при потенциалах –0.30 и –0.10 В соответственно. При расчетах величин  $\gamma_c$  и  $\gamma_a$  за фоновый принимался раствор, содержащий в качестве добавок только катионы  $Fe(III)$  соответствующей концентрации.

Величины электродных потенциалов приводятся по стандартной водородной шкале.

Скорость коррозии стали 08ПС (состав, в % по массе: С – 0.08; Mn – 0.5; Si – 0.11; P – 0.035; S – 0.04; Cr – 0.1; Ni – 0.25; Cu – 0.25; As – 0.08; остальное – Fe) в 2 М  $H_3PO_4$  при температуре  $20 \pm 2^\circ C$  определяли по потере массы образцов ( $\geq 5$ -ти на точку) размером 50 мм  $\times$  20 мм  $\times$  0.5 мм, исходя из расчета 50 мл раствора кислоты на образец:

$$k = \Delta m S^{-1} \tau^{-1}, \quad (7)$$

при этом  $\Delta m$  – изменение массы образца, г;  $S$  – площадь образца, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – длительность коррозионных испытаний, ч; продолжительность опытов – 2 ч. Исследования выполняли как в статической, так и динамической коррозионной среде при скорости вращения магнитной мешалки  $w = 250, 420, 750$  и  $1080$  об/мин. Перед опытом образцы зачищали на абразивном круге (ISO 9001, зернистость 60) и обезжиривали ацетоном.

Эффективность ингибиторов оценивали по величинам коэффициентов торможения

$$\gamma = k_0 k_{in}^{-1}, \quad (8)$$

где  $k_0$  и  $k_{in}$  – скорость коррозии стали 08ПС в фоновом растворе и в растворе с изучаемой добавкой. При расчетах величин  $\gamma$  за фоновый принимался раствор, содержащий в качестве добавок только катионы  $Fe(III)$  соответствующей концентрации.

Влияние присутствия в кислоте растворенной соли  $Fe(III)$ , при одинаковой скорости потока раствора, и характера потока коррозионной среды, при постоянном содержании  $Fe(III)$ , на скорость коррозии стали оценивали по величинам приращения коррозионных потерь

$$\Delta k_{Fe(III)} = k_{Fe(III)} - k_0, \quad (9)$$

$$\Delta k_{dyn} = k_{dyn} - k_{st} \quad (10)$$

и коэффициента ускорения коррозии

$$\gamma_{Fe(III)}^{-1} = k_{Fe(III)} k_0^{-1}, \quad (11)$$

$$\gamma_{dyn}^{-1} = k_{dyn} k_{st}^{-1}, \quad (12)$$

где  $k_{Fe(III)}$  и  $k_0$  – скорости коррозии стали 08ПС в растворе кислоты в присутствии и в отсутствие соли  $Fe(III)$ , а  $k_{dyn}$  и  $k_{st}$  – скорости коррозии той же стали в динамической и статической средах.

Измерения проведены на приборах центра коллективного пользования физическими методами исследования Института физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук (ЦКП ФМИ ИФХЭ РАН).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Важные сведения об особенностях механизма коррозии стали в растворе кислоты, содержащей соль  $Fe(III)$ , можно получить, исследуя кинетику электродных реакций металла методом вольтамперометрии [15]. В 2 М  $H_3PO_4$  форма ПК низко-

**Таблица 1.** Значения потенциалов коррозии ( $E_{\text{cor}}$ ) стали Ст3, тафелевых наклонов поляризационных кривых ( $b_c$  и  $b_a$ ), плотностей катодного и анодного токов ( $i_c$  и  $i_a$ ), коэффициентов торможения катодной и анодной реакций ( $\gamma_c$  и  $\gamma_a$ ), полученные при  $E = -0.30$  и  $-0.10$  В соответственно. Значения  $E$  приведены в вольтах,  $i$  – в А/м<sup>2</sup>,  $n = 460$  об/мин;  $t = 25^\circ\text{C}$

$C_{\text{Fe(III)}}, \text{M}$	$E_{\text{cor}}$	$b_c$	$i_c$	$\gamma_c$	$b_a$	$i_a$	$\gamma_a$
<b>2 М <math>\text{H}_3\text{PO}_4</math></b>							
0	-0.23	0.125	11.5	—	0.06	262	—
0.01	-0.20	$i_{\text{lim}}^*$	21.5	—	0.06	236	—
0.02	-0.19	$i_{\text{lim}}$	31.5	—	0.06	227	—
0.05	-0.18	$i_{\text{lim}}$	63.1	—	0.06	226	—
0.10	-0.17	$i_{\text{lim}}$	119	—	0.06	215	—
<b>2 М <math>\text{H}_3\text{PO}_4 + 0.5 \text{ мМ ИФХАН-92} + 0.5 \text{ мМ KNCS}</math></b>							
0	-0.16	$i_{\text{lim}}$	0.69	16.7	$i_{\text{lim}}^{**}$	0.81	323
0.01	-0.15	$i_{\text{lim}}$	1.2	17.9	$i_{\text{lim}}^{**}$	1.2	197
0.02	-0.15	$i_{\text{lim}}$	3.0	10.5	$i_{\text{lim}}^{**}$	1.2	189
0.05	-0.13	$i_{\text{lim}}$	6.0	10.5	$i_{\text{lim}}^{**}$	1.2	188
0.10	-0.12	$i_{\text{lim}}$	12.6	9.4	$i_{\text{lim}}^{**}$	1.2	179
<b>2 М <math>\text{H}_3\text{PO}_4 + 5 \text{ мМ ИФХАН-92} + 0.5 \text{ мМ KNCS}</math></b>							
0	-0.17	$i_{\text{lim}}$	0.16	71,8	$i_{\text{lim}}^{**}$	0.35	749
0.01	-0.16	$i_{\text{lim}}$	0.20	108	$i_{\text{lim}}^{**}$	0.42	562
0.02	-0.16	$i_{\text{lim}}$	0.22	143	$i_{\text{lim}}^{**}$	0.42	540
0.05	-0.16	$i_{\text{lim}}$	0.23	274	$i_{\text{lim}}^{**}$	0.42	538
0.10	-0.16	$i_{\text{lim}}$	0.24	496	$i_{\text{lim}}^{**}$	0.42	512

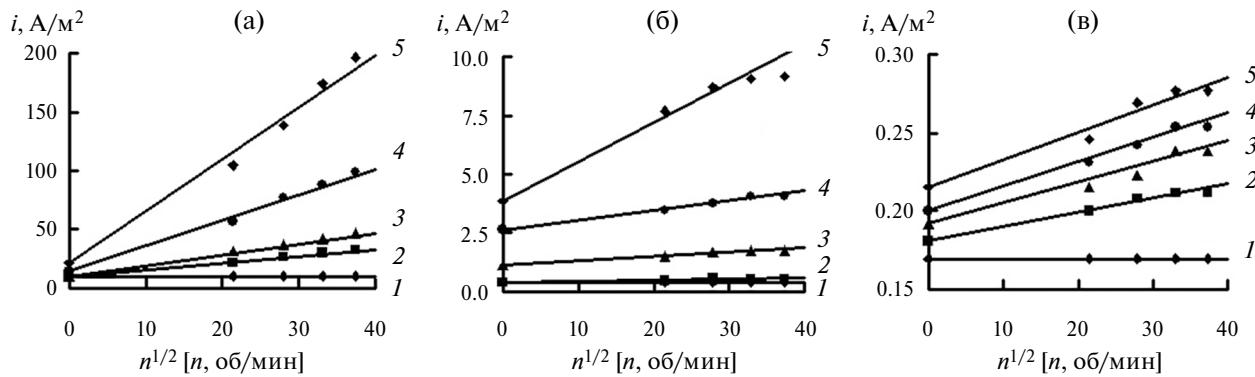
\*  $i_{\text{lim}}$  – предельный ток.

\*\* Значение относится к первому линейному участку анодной ПК.

углеродистой стали свойственна для коррозии, протекающей в области потенциалов ее активного растворения (рис. 1, табл. 1). В этой среде наклон катодной ПК стали ( $b_c$ ) близок к теоретически предсказываемому для железа значению 0.120 В, но наклон анодной ПК металла ( $b_a$ ) выше теоретического значения 0.035 В [16]. Увеличение наклона  $b_a$  стали является результатом формирования на ее поверхности слоя шлама, наблюдаемого визуально. Присутствие в растворе кислоты  $\text{FePO}_4$  смещает потенциал свободной коррозии стали ( $E_{\text{cor}}$ ) в область более положительных значений, что является результатом растормаживания этой добавкой катодной реакции. Катионы  $\text{Fe(III)}$  практически не влияют на анодный процесс, но имеет место положительный порядок катодной реакции по их концентрации. Начальный участок катодных ПК характеризуется предельным током ( $i_{\text{lim}}$ ). Напротив, наклон анодной ПК соответствует фоновой зависимости.

Наличие в растворе  $\text{H}_3\text{PO}_4$  добавок  $\text{FePO}_4$  практически не влияет на характер протекания

анодной реакции, которая как в отсутствие, так и в присутствии фосфата  $\text{Fe(III)}$  протекает в соответствии с уравнением (3). Характер катодных ПК указывает на участие  $\text{Fe(III)}$  в катодной реакции. В концентрированных растворах кислот (рН < 2) катодная реакция, соответствующая уравнению (2), протекает в области кинетического контроля [18], что подтверждается характером катодной ПК. В присутствии фосфата  $\text{Fe(III)}$  они осложнены предельным током, что указывает на изменение механизма катодной реакции. Наблюдаемый предельный ток может быть обусловлен диффузионными ограничениями, связанными с доставкой к поверхности стали окислителей –  $\text{H}^+$  и  $\text{Fe}^{3+}$ , присутствующих в растворе кислоты. Поскольку концентрация  $\text{H}^+$  более чем на порядок величины выше, чем  $C_{\text{Fe(III)}}$ , то предельный ток скорее будет результатом диффузионных ограничений по доставке катионов  $\text{Fe(III)}$  к поверхности стали. Для подтверждения этого предположения требуется исследовать влияние потока электролита на скоп-



**Рис. 2.** Зависимость плотности катодного тока от частоты вращения стального диска в 2 М  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (а) с добавками 0.5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS (б) и 5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS (в), содержащей  $\text{FePO}_4$ , М: 1 – 0; 2 – 0.01; 3 – 0.02; 4 – 0.05; 5 – 0.10.  $E = -0.30$  В,  $t = 25^\circ\text{C}$ .

рость катодной реакции стали, которое обычно проводят с помощью дискового электрода. Изменяя частоту его вращения, регулируют режим течения жидкости вблизи поверхности металла [19, 20].

Для катодного процесса стали, определяемого реакцией (2), протекающей в кинетической области, и реакцией (4), контролируемой диффузией, применимо уравнение

$$i_c = i_k + i_d, \quad (13)$$

где  $i_k$  и  $i_d$  – плотности кинетического и диффузионного токов. В случае ламинарного движения жидкости вблизи поверхности вращающегося металлического диска, значение  $i_d$  прямо пропорционально корню квадратному из частоты вращения дискового электрода ( $n$ ), а потому выражение (13) таково:

$$i_c = i_k + f n^{1/2}. \quad (14)$$

В 2 М  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{FePO}_4$  экспериментальная зависимость  $i_c$  от  $n^{1/2}$  имеет линейный вид (рис. 2, табл. 2). Однако в 2 М  $\text{H}_3\text{PO}_4$  отсутствует отклик катодного тока на изменение частоты вращения стального диска, что указывает на кинетическую природу реакции (2). В присутствии  $\text{FePO}_4$  кинетическая составляющая катодного тока такая же, как и в его отсутствии, что указывает на независимость реакций (2) и (4). Кроме этого ясно, что реакция (2) происходит в кинетической, а реакция (4) – в диффузионной области.

Диффузионный ток, обусловленный восстановлением  $\text{Fe(III)}$  на стальном катоде при ламинарном течении жидкости, описывается уравнением [18]

$$i_d = 0.62zFC^*D^{2/3}\eta^{-1/6}n^{1/2}. \quad (15)$$

**Таблица 2.** Значения постоянных  $i_k$  и  $f$  в уравнении (14) при  $E = -0.30$  В для катодной реакции стального вращающегося дискового электрода в 2 М  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащей  $\text{FePO}_4$ . Значения  $i_k$  – в  $\text{A/m}^2$ ,  $f$  – в  $\text{A мин}^{1/2}/(\text{м}^2 \text{об}^{1/2})$ ,  $t = 25^\circ\text{C}$

$C_{\text{Fe(III)}} \text{, М}$	$i_k$	$f$	$D, \text{мкм}^2/\text{с}$
2 М $\text{H}_3\text{PO}_4$			
0	10.2	0	–
0.01	10.2	0.50	
0.02	10.2	0.97	
0.05	10.2	2.34	$130 \pm 10$
0.10	10.2	4.84	
2 М $\text{H}_3\text{PO}_4 + 0.5 \text{ мМ ИФХАН-92} + 0.5 \text{ мМ KNCS}$			
0	0.38	0	–
0.01	0.38	0.0046	0.1
0.02	1.12	0.020	0.3
0.05	2.61	0.042	0.3
0.10	3.85	0.17	0.8
2 М $\text{H}_3\text{PO}_4 + 5 \text{ мМ ИФХАН-92} + 0.5 \text{ мМ KNCS}$			
0	0.17	0	–
0.01	0.18	0.0010	
0.02	0.19	0.0013	
0.05	0.20	0.0015	Менее 0.01
0.10	0.22	0.0017	

Здесь  $C^*$  – концентрация  $\text{Fe(III)}$  в глубине раствора,  $\eta$  – кинематическая вязкость жидкости ( $0.011 \text{ см}^2/\text{с}$  [21]),  $n$  – угловая скорость вращения стального диска. Используя уравнение (15), представляется возможным рассчитать  $D_{\text{Fe(III)}}$  в 2 М  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (см. табл. 2). Полученное значение  $D_{\text{Fe(III)}}$  имеет хорошую сходимость с данным, найден-

ным методом циклической вольтамперометрии Pt-электрода в 2 М  $H_3PO_4$ , содержащей  $FePO_4$ , и приводимым в работе [5].

В фоновых растворах  $H_3PO_4$ , содержащих  $FePO_4$ , протекание на стали реакций (2) и (4) независимо. При дальнейшем обсуждении результатов, связанных с ингибицированием коррозии стали в таких средах, будем исходить из предположения, что оба этих парциальных катодных процесса также реализуются независимо.

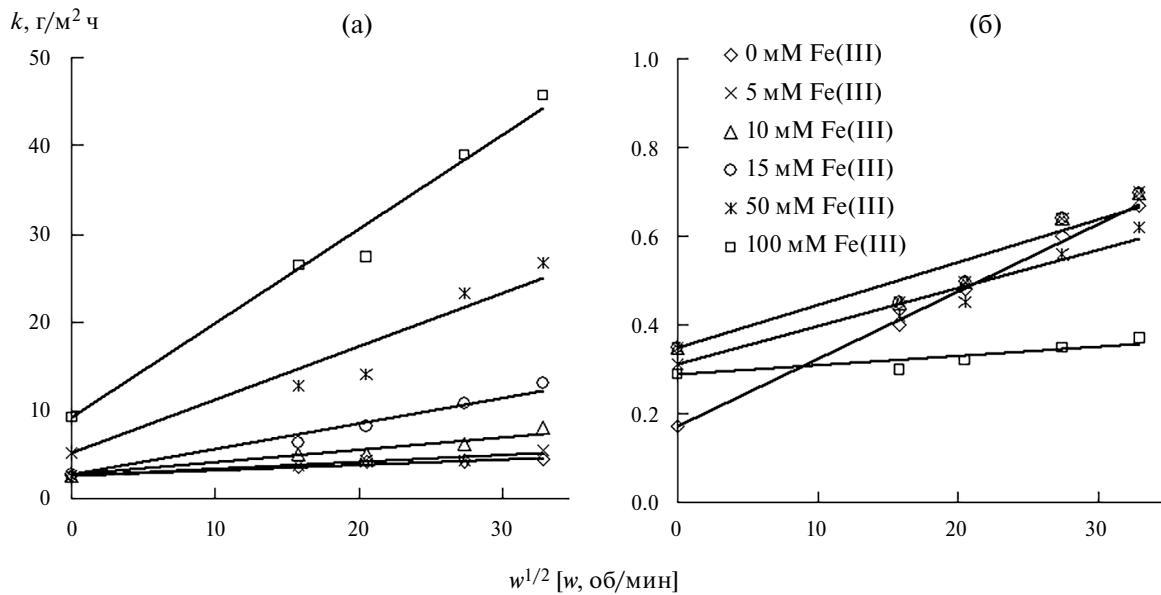
Введение в 2 М  $H_3PO_4$  добавки 0.5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS и, особенно, 5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS существенно влияет на параметры электродных реакций стали Ст3 (рис. 1, табл. 1). В присутствии этих ИК происходит торможение обеих электродных реакций стали Ст3, причем значения  $E_{cor}$  смешены в область положительных потенциалов в сравнении с фоновой средой на 0.07 и 0.06 В соответственно, что свидетельствует о преимущественном замедление этими смесями анодной реакции металла. В средах, содержащих ИК, наклон катодной ПК, в сравнении с фоновой 2 М  $H_3PO_4$ , увеличен до предельного тока. Анодные ПК имеют два линейных участка. Первый участок, примыкающий к  $E_{cor}$ , характеризуется предельным диффузионным током, обусловленным эффективным торможением анодной реакции защитной пленкой ингибитора. При более высоких потенциалах наблюдается участок анодной активации металла, характеризуемый существенным ростом тока [22, 23]. Он в первую очередь связан с частичной десорбцией с поверхности стали ингибитора. В таких средах отсутствует отклик катодного тока на частоту вращения стального дискового электрода (рис. 2, табл. 2), а катодный процесс, как и в 2 М  $H_3PO_4$  при отсутствии  $FePO_4$ , должен быть обусловлен реакцией (2), реализующейся с кинетическим контролем. В ингибицированных средах, особенно в присутствии 5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS, значения  $i_k$  ниже, чем в фоновой среде.

Присутствие в коррозионной среде  $FePO_4$  ухудшает торможение смесевыми ИК анодной и, особенно, катодной реакций стали, причем этот эффект для катодной реакции усиливается при увеличении содержания в растворе  $Fe(III)$  (рис. 1, табл. 1). Имеет место отклик катодного тока на частоту вращения дискового электрода (рис. 2, табл. 2). В такой системе катодный ток будет складываться из кинетического, определяемого парциальной реакцией (2), и диффузионного, обусловленного парциальной реакцией (4),

токов. Увеличение содержания в ингибицированной кислоте  $FePO_4$  приводит к росту обеих величин  $i_k$  и  $i_d$ . Получается, что в ингибицированной кислоте соли  $Fe(III)$  ускоряют катодную реакцию, участвуя в ней не только в качестве дополнительного деполяризатора, но и снижают торможение ИК катодного выделения водорода, что в целом негативно сказывается на защите стали. При прочих равных условиях в присутствии добавки 5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS негативное влияние  $FePO_4$  на торможение электродных реакций стали проявляется в значительно меньшей степени, чем в средах ингибицированных 0.5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS. Несмотря на это, значения параметров  $i_k$  и  $i_d$  в ингибицированных средах существенно ниже, чем в аналогичных фоновых растворах. Полученный результат позволяет надеяться на эффективную защиту низкоуглеродистой стали смесью ИФХАН-92 и KNCS в растворах  $H_3PO_4$ , содержащих  $FePO_4$ .

Следует представлять, как наличие в агрессивной среде смесевых ИК повлияет на величину  $D_{Fe(III)}$ . Наблюдаемые в ингибицированной 2 М  $H_3PO_4$ , особенно в присутствии 5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS, величины  $D_{Fe(III)}$  существенно ниже значений, характерных для фоновой среды с теми же параметрами (табл. 2). Следует уточнить, что в отличие от 2 М  $H_3PO_4$ , содержащей  $FePO_4$ , в ингибицированных средах уравнение (15) позволяет рассчитать не истинные значения  $D_{Fe(III)}$ , а эффективные. Введение в раствор кислоты незначительных по содержанию добавок ИК (не более 5.5 мМ) не может столь существенно изменить истинную величину  $D_{Fe(III)}$  в нем. Нам видится другая причина этого явления — молекулы ингибитора, адсорбируясь на поверхности стали, формируют полимолекулярные защитные слои. Состав и структура полимолекулярных защитных слоев, образуемых смесевым ингибитором ИФХАН-92 + KNCS, обсуждаются в работе [10]. Для восстановления катион  $Fe(III)$  должен, преодолев защитный слой, достигнуть поверхности стали. Скорость такого процесса будет определяться диффузией катионов  $Fe(III)$  в защитном слое, сформированном ИК. Именно величины  $D_{Fe(III)}$  в приповерхностном защитном слое ингибитора во многом определяют значения эффективных  $D_{Fe(III)}$ , полученных по уравнению (15).

Выявление нами кинетических параметров исследуемой системы позволяет прогнозировать характер коррозии низкоуглеродистой стали в ней. Коррозия стали в 2 М  $H_3PO_4$ , содержащей



**Рис. 3.** Зависимость скорости коррозии стали Ст3 от частоты вращения пропеллерной мешалки в коррозионной среде при  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  в  $2 \text{ M H}_3\text{PO}_4$  (а) с добавкой 5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS (б), содержащей  $\text{FePO}_4$ . Продолжительность опытов – 2 ч.

$\text{FePO}_4$ , протекает через стадии, характеризуемые как кинетическим контролем, так и с диффузионными ограничениями. Поэтому характер коррозии стали в таких системах должен существенно зависеть от характера конвекции агрессивной среды. Следует ожидать эффективной защиты низкоуглеродистой стали в  $2 \text{ M H}_3\text{PO}_4$ , содержащей  $\text{FePO}_4$ , смесевыми ИК, поскольку они эффективно замедляют парциальные электродные реакции стали, включая восстановление катионов  $\text{Fe(III)}$ . Чем выше содержание ИФХАН-92 в смесевом ИК, тем существеннее его влияние на парциальные реакции стали.

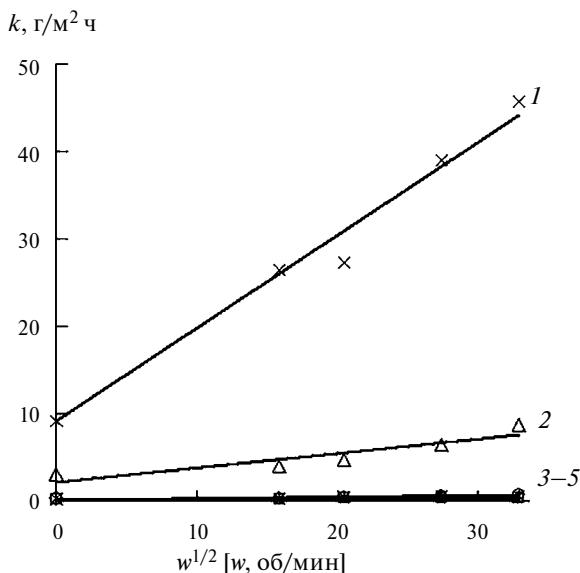
Данные предположения подтвердились при изучении коррозии низкоуглеродистой стали 08ПС в потоке  $2 \text{ M H}_3\text{PO}_4$ , содержащей  $\text{FePO}_4$ , по массопотере металлических образцов (рис. 3, табл. 3). Как в отсутствии смесевого ИК, так и в его присутствии, коррозия низкоуглеродистой стали в  $2 \text{ M H}_3\text{PO}_4$ , содержащей  $\text{FePO}_4$ , усиливается при увеличении  $C_{\text{Fe(III)}}$ . Практически во всех исследованных средах наблюдается отклик коррозионного процесса на скорость перемешивания коррозионной среды. Экспериментальная зависимость скорости коррозии низкоуглеродистой стали от частоты вращения пропеллерной мешалки, использованной для создания принудительной конвекции агрессивной среды, может быть описана уравнением

$$k = k_{\text{st}} + \lambda w^{1/2}, \quad (16)$$

**Таблица 3.** Значения постоянных  $k_{\text{st}}$  ( $\text{г}/(\text{м}^2\text{ч})$ ) и  $\lambda$  ( $\text{г мин}^{1/2}/(\text{м}^2 \text{об}^{1/2})$ ) в уравнении (16) для коррозии низкоуглеродистой стали 08ПС при  $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$  в растворе  $2 \text{ M H}_3\text{PO}_4$ , содержащем  $\text{FePO}_4$

$C_{\text{Fe(III)}}, \text{M}$	$2 \text{ M H}_3\text{PO}_4$		$2 \text{ M H}_3\text{PO}_4 + 5 \text{ мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS}$	
	$k_{\text{st}}$	$\lambda$	$k_{\text{st}}$	$\lambda$
0	2.5	0.065	0.17	0.015
0.005	2.6	0.079	0.35	0.010
0.01	2.7	0.14	0.35	0.010
0.02	2.8	0.29	0.35	0.010
0.05	5.2	0.60	0.31	0.009
0.10	9.2	1.1	0.29	0.002

где  $k_{\text{st}}$  – коррозия низкоуглеродистой стали в статической среде,  $w$  – частота вращения пропеллерной мешалки,  $\lambda$  – эмпирический коэффициент, характеризующий интенсивность приращения скорости коррозии. Уравнение (16) формально соответствует уравнению (14), характеризующему электродные реакции, протекающие с диффузионным контролем. Следует отметить, что в  $2 \text{ M H}_3\text{PO}_4$ , как в отсутствие ИК, так и в их присутствии, наблюдается незначительный отклик коррозионного процесса на увеличение скорости потока коррозионной среды, что объясняется присутствием в рассматриваемых средах растворенного кислорода воздуха. Поскольку наблюдаемый эффект кислорода незначителен,



**Рис. 4.** Зависимость скорости коррозии стали Ст3 от частоты вращения пропеллерной мешалки в коррозионной среде при  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  в 2 М  $\text{H}_3\text{PO}_4$  + 0.1 М  $\text{FePO}_4$  (1) с добавками 0.01 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS (2), 0.1 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS (3), 0.5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS (4), 5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS (5). Продолжительность опытов – 2 ч.

**Таблица 4.** Значения постоянных  $k_{st}$  ( $\text{г}/(\text{м}^2\text{ч})$ ) и  $\lambda$  ( $\text{г} \cdot \text{мин}^{1/2}/(\text{м}^2\text{ч об}^{1/2})$ ) в уравнении (16) для коррозии низкоуглеродистой стали 08ПС при  $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$  в растворе 2 М  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащем 0.1 М  $\text{FePO}_4$  + 0.5 мМ KNCS

$C_{\text{ИФХАН-92}}$ , мМ	$k_{st}$	$\lambda$
0.01	3.0	0.13
0.1	0.34	0.010
0.5	0.30	0.008
5	0.29	0.002

в наших дальнейших обсуждениях его учитывать не будем.

В средах, ингибирированных 5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS, значения  $k_{st}$  и  $\lambda$  существенно ниже величин, наблюдавшихся в растворах без ИК при всех концентрациях  $\text{FePO}_4$  (табл. 3). Имеет место эффективная защита низкоуглеродистой стали в потоке коррозионной среды, содержащей  $\text{FePO}_4$ . Уменьшение содержания замещенного триазола в смеси ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS приводит к снижению ее защитного действия (рис. 4, табл. 4). Остаточное защитное действие проявляется даже при  $C_{\text{ИФХАН-92}} = 0.01$  мМ.

Анализ экспериментальных данных показывает, что увеличение содержания в коррозионной среде  $\text{FePO}_4$  ускоряет коррозию низкоуглероди-

стой стали (табл. 5). Наиболее существенно увеличение  $C_{\text{Fe(III)}}$  сказывается на скорости коррозии стали в среде, не содержащей ингибиторов. Также в присутствии  $\text{FePO}_4$  в растворе  $\text{H}_3\text{PO}_4$  коррозия стали ускоряется при переходе от статической среды к динамической. Напротив, в ингибирированных средах отклик скорости коррозии на увеличение  $C_{\text{Fe(III)}}$  и ускорение потока агрессивной среды незначителен. Рассматриваемые смесевые ИК обеспечивают в изучаемых растворах защиту металла как в статических, так и в динамических средах (табл. 6).

Получен результат, имеющий важное теоретическое и практическое значение. Показано, что применяя в качестве замедлителей коррозии смеси веществ, способные формировать на поверхности металла полимолекулярные защитные слои, можно обеспечить эффективную защиту сталей в потоке раствора кислоты, содержащего соли Fe(III). Впервые предложен смесевой ингибитор – ИФХАН-92 + KNCS, способный защищать сталь в потоке раствора  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащего Fe(III). В жестких условиях потока агрессивной среды (750 об/мин), содержащей 0.1 М Fe(III), добавка 5 мМ ИФХАН-92 + 0.5 мМ KNCS замедляет коррозию низкоуглеродистой стали почти в 110 раз, обеспечивая  $k = 0.35 \text{ г}/(\text{м}^2 \text{ч})$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Коррозия низкоуглеродистой стали в динамическом растворе  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащем  $\text{FePO}_4$ , ускоряется с увеличением скорости потока среды и увеличением концентрации в ней соли Fe(III). Эмпирическая зависимость скорости коррозии стали от интенсивности потока исследуемых сред, перемешиваемых пропеллерной мешалкой, может быть представлена в виде линейной зависимости:

$$k = k_{st} + \lambda w^{1/2},$$

где  $k_{st}$  – скорость коррозии стали в статической среде,  $w$  – частота вращения пропеллерной мешалки,  $\lambda$  – эмпирический коэффициент.

2. Коррозия низкоуглеродистой стали в потоке раствора  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащем  $\text{FePO}_4$ , реализуется в результате протекания на металле трех парциальных реакций: анодной ионизации железа и катодного восстановления протонов и катионов Fe(III).

3. Впервые показана возможность ингибиторной защиты низкоуглеродистой стали в потоке раствора  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , содержащем  $\text{FePO}_4$ , добавками смеси ИФХАН-92 и KNCS. Смесевые ИК обе-

**Таблица 5.** Скорость коррозии ( $k$ ), приращение коррозионных потерь ( $\Delta k$ ) и коэффициент ускорения коррозии ( $\gamma^{-1}$ ) стали 08ПС в растворах 2 М  $H_3PO_4$ , содержащих Fe(III).  $k$  и  $\Delta k$  в г/(м<sup>2</sup>ч). Продолжительность опытов – 2 ч,  $t = 20 \pm 2^\circ C$

$C_{Fe(III)}$ , М	Статическая среда			Динамическая среда (750 об/мин)			$\Delta k_{dyn}^{**}$	$\gamma_{dyn}^{-1**}$
	$k$	$\Delta k_{Fe(III)}^*$	$\gamma_{Fe(III)}^{-1*}$	$k$	$\Delta k_{Fe(III)}^*$	$\gamma_{Fe(III)}^{-1*}$		
$2 M H_3PO_4$								
0	2.5	–	–	4.2	–	–	1.7	1.7
0.005	2.6	0.1	1.0	4.4	0.2	1.0	1.8	1.7
0.01	2.6	0.1	1.0	6.2	2.0	1.5	3.6	2.4
0.02	2.8	0.3	1.1	11	6.6	2.6	8.0	3.9
0.05	5.2	2.7	2.1	23	19	5.5	18	4.4
0.10	9.2	6.7	3.7	39	30	9.3	30	4.2
$2 M H_3PO_4 + 0.01 mM ИФХАН-92 + 0.5 mM KNCS$								
0.10	3.0	–	–	6.5	–	–	3.5	2.2
$2 M H_3PO_4 + 0.1 mM ИФХАН-92 + 0.5 mM KNCS$								
0.10	0.34	–	–	0.62	–	–	0.28	1.8
$2 M H_3PO_4 + 0.5 mM ИФХАН-92 + 0.5 mM KNCS$								
0.10	0.30	–	–	0.56	–	–	0.26	1.9
$2 M H_3PO_4 + 5 mM ИФХАН-92 + 0.5 mM KNCS$								
0	0.17	–	–	0.60	–	–	0.43	3.5
0.005	0.35	0.18	2.1	0.64	0.04	1.1	0.29	1.8
0.01	0.35	0.18	2.1	0.64	0.04	1.1	0.29	1.8
0.02	0.35	0.18	2.1	0.64	0.04	1.1	0.29	1.8
0.05	0.31	0.14	1.8	0.56	-0.04	0.93	0.25	1.8
0.10	0.29	0.12	1.7	0.35	-0.29	0.58	0.06	1.2

\* – Изменение величины в результате присутствия в растворе Fe(III) при одинаковой скорости потока раствора.

\*\* – Изменение величины в результате ускорения потока раствора при постоянном содержании в нем Fe(III).

**Таблица 6.** Коэффициенты торможения коррозии ( $\gamma$ ) стали 08ПС в растворах 2 М  $H_3PO_4$ , содержащих Fe(III), добавками ИФХАН-92 + KNCS. Продолжительность опытов – 2 ч,  $t = 20 \pm 2^\circ C$

$C_{Fe(III)}$ , М	Статическая среда		Динамическая среда (750 об/мин)	
	$5 mM ИФХАН-92 + 0.5 mM KNCS$			
0		15		7.0
0.005		7.4		6.9
0.01		7.4		9.7
0.02		8.0		17
0.05		17		41
0.10		32		110
$0.5 mM ИФХАН-92 + 0.5 mM KNCS$				
0.10		30		70
$0.1 mM ИФХАН-92 + 0.5 mM KNCS$				
0.10		27		63
$0.01 mM ИФХАН-92 + 0.5 mM KNCS$				
0.10		3.1		6.0

спечивают существенное замедление коррозии стали в этих средах. Причиной высоких ингибиторных эффектов смесей ИФХАН-92 и KNCS при защите стали в потоке раствора  $H_3PO_4$ , содержащего  $FePO_4$ , является эффективное замедление ими парциальных электродных реакций металла: анодной ионизации железа и катодного восстановления протонов и катионов  $Fe(III)$ .

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузин, А.В., Горичев, И.Г., Шелонцев, В.А., Кузьменко, А.Н., Плахотная, О.Н., Овсянникова, Л.В. Роль комплексообразования при растворении оксидов железа в ортофосфорной кислоте. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия*. 2021. Т. 62. № 6. С. 515. [Kuzin, A.V., Gorichev, I.G., Shelontsev, V.A., Kuzmenko, A.N., Plahotnaia, O.N., and Ovsyannikova, L.V., The Role of a Complex Formation in the Dissolution of Iron Oxides in Orthophosphoric Acid, *Moscow Univ. Chem. Bull.*, 2021, vol. 76, no. 6, p. 398.] DOI: 10.3103/S0027131421060055
2. Кузин, А.В., Горичев, И.Г., Шелонцев, В.А., Елисеева, Е.А., Маманков, А.В. Исследование и моделирование растворения магнетита в ортофосфорной кислоте. *Металлы*. 2021. № 2. С. 11. [Kuzin, A.V., Gorichev, I.G., Shelontsev, V.A., Eliseeva, E.A., and Mamankov, A.V., Dissolution of magnetite in orthophosphoric acid: study and modeling, *Russ. Metall.*, 2021, vol. 2021, p. 260.] DOI: 10.1134/S0036029521030083
3. Кузин, А.В., Горичев, И.Г., Лайнэр, Ю.А. Особенности стимулирующего действия фосфат-ионов на кинетику растворения оксидов железа в кислой среде. *Металлы*. 2013. № 5. С. 24. [Kuzin, A.V., Gorichev, I.G., and Lainer, Y.A., Stimulating effect of phosphate ions on the dissolution kinetics of iron oxides in an acidic medium, *Russ. Metall.*, 2013, vol. 2013, p. 652.] DOI: 10.1134/S0036029513090073
4. Продан, И.Е., Ещенко, Л.С., Печковский, В.В. Изучение кристаллизации фосфатов железа в системе железо (III) – фосфорная кислота – вода. *Журн. неорган. химии*. 1989. Т. 34. № 7. С. 1860. [Prodan, I.E., Yeshchenko, L.S., and Pechkovsky, V.V., Study of the crystallization of iron phosphates in the system iron (III) – phosphoric acid – water, *Russ. J. Inorg. Chem.*, (in Russian), 1989, vol. 34, no. 7, p. 1860.]
5. Авдеев, Я.Г., Панова, А.В., Андреева, Т.Э. Коррозия низкоуглеродистой стали в потоке раствора фосфорной кислоты, содержащего фосфат железа (III). *Электрохимия*. 2023. Т. 59. С. 404. DOI: 10.31857/S0424857023070046  
[Avdeev, Y.G., Panova, A.V., and Andreeva, T.E., Corrosion of Low-Carbon Steel in a Flow of Phosphoric Acid Solution Containing Iron (III) Phosphate, *Russ. J. Electrochem.*, 2023, vol. 59, p. 512.] DOI: 10.1134/S1023193523070030
6. Avdeev, Ya.G., Panova, A.V., and Anfilov, K.L., Effect of  $Fe(III)$  salts on the protection of low carbon steel in sulfuric acid solutions by some corrosion inhibitors, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2024, vol. 13, no. 2, p. 1135. DOI: 10.17675/2305-6894-2024-13-2-26
7. Авдеев, Я.Г., Андреева, Т.Э. Особенности механизма коррозии сталей в ингибирированных растворах кислот, содержащих соли железа (III). *Журн. физ. химии*. 2022. Т. 96. № 2. С. 281. DOI: 10.31857/S0044453722020030  
[Avdeev, Ya.G. and Andreeva, T.E., Mechanism of Steel Corrosion in Inhibited Acid Solutions Containing Iron (III) Salts, *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2022, vol. 96, no. 2, p. 423.] DOI: 10.1134/S0036024422020030
8. Кузнецов, Ю.И., Андреев, Н.Н., Маршаков, А.И. Физико-химические аспекты ингибирирования коррозии металлов. *Журн. физ. химии*. 2020. Т. 94. № 3. С. 381. DOI: 10.31857/S0044453720030152  
[Kuznetsov, Yu.I., Andreev, N.N., and Marshakov, A.I., Physicochemical Aspects of Metal Corrosion Inhibition, *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2020, vol. 94, no. 3, p. 505.] DOI: 10.1134/S0036024420030152
9. Avdeev, Ya.G., Tyurina, M.V., and Kuznetsov, Yu.I., Protection of low-carbon steel in phosphoric acid solutions by mixtures of a substituted triazole with sulfur-containing compounds, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2014, vol. 3, no. 4, p. 246. DOI: 10.17675/2305-6894-2014-3-4-246-253
10. Авдеев, Я.Г., Тюрина, М.В., Кузнецов, Ю.И., Пронин, Ю.Е., Казанский, Л.П. Защита низкоуглеродистой стали в растворах фосфорной кислоты ингибитором ИФХАН-92. Ч. 2. *Коррозия: материалы, защита*. 2013. № 6. С. 17. [Avdeev, Ya.G., Tyurina, M.V., Kuznetsov, Yu.I., Pronin, Yu.E., and Kazanskiy, L.P., Protection of low-carbon steel in phosphoric acid solutions with IFKhAN-92 inhibitor. Part 2, *Corros.: mater., prot.* (in Russian), 2013, no. 6, p. 17.]
11. Кеше, Г. *Коррозия металлов. Физико-химические принципы и актуальные проблемы* / Пер. с нем. под. ред. акад. Я. М. Колотыркина. М.: Металлургия, 1984. 400 с. [Kaesche, H., *Die Korrosion der Metalle. Physikalisch-chemische Prinzipien und Aktuelle Probleme* (in German), Springer, Berlin, 1979.]
12. Плетнев, М.А., Решетников, С.М. Кооперативные эффекты в задаче о кислотной коррозии металлов. *Защита металлов*. 2004. Т. 40. № 5. С. 513.

- [Pletnev, M.A. and Reshetnikov, S.M., Cooperative Effects in the Problem of Acid Corrosion of Metals, *Prot. Met.*, 2004, vol. 40, p. 460.]  
DOI: 10.1023/B: PROM.0000043064.20548.e0
13. Антропов, Л.И. *Теоретическая электрохимия*. М.: Высш. шк., 1965. С. 348–380. [Antropov, L.I. *Theoretical Electrochemistry* (in Russian), Vysshaya Shkola, Moscow, 1965, p. 348–380.]
14. Bockris, J.O'M., Drazic, D., and Despic, A.R., The electrode kinetics of the deposition and dissolution of iron, *Electrochim. Acta*, 1961, vol. 4, no. 2–4, p. 325. DOI: 10.1016/0013-4686(61)80026-1
15. Катревич, А.Н., Флорианович, Г.М., Колотыркин, Я.М. Выяснение кинетических параметров реакции активного растворения железа в растворах фосфатов. *Защита металлов*. 1974. Т. 10. № 4. С. 369. [Katrevich, A.N., Florianovich, G.M., and Kolotyrkin, Ya.M., Elucidation of the kinetic parameters of the reaction of active dissolution of iron in phosphate solutions, *Prot. Met.*, (in Russian), 1974, vol. 10, no. 4, p. 369.]
16. Решетников, С.М., Макарова, Л.Л. Кинетика и механизм катодных и анодных процессов, определяющих кислотную коррозию металлов в области активного растворения. *Оксислительно-восстановительные и адсорбционные процессы на поверхности твердых металлов: Межвуз. сб.* Ижевск: Удмурт. гос. ун-т, 1979. С. 25–49. [Reshetnikov, S.M. and Makarova, L.L., Kinetics and mechanism of cathodic and anodic processes that determine acid corrosion of metals in the area of active dissolution, *Redox and adsorption processes on the surface of solid metals* (in Russian), Udmurt State University, Izhevsk, 1979, p. 25–49.]
17. Решетников, С.М. *Ингибиторы кислотной коррозии металлов*. Л.: Химия, 1986. 144 с. [Reshetnikov, S.M., *Inhibitors of acid corrosion of metals* (in Russian), Leningrad: Khimiya, 1986.]
18. Плесков, Ю.В., Филиновский, В.Ю. *Вращающийся дисковый электрод*. М: Наука, 1972. 344 с. [Pleskov, Yu.V. and Filinovskii, V.Yu., *The Rotating Disk Electrode* Consultants Bureau, New York, 1976.]
19. Du, C., Tan, Q., Yin, G., and Zhang, J., Rotating Disk Electrode Method, *In Rotating Electrode Methods and Oxygen Reduction Electrocatalysts*, Eds. W. Xing, G. Yin, J. Zhang, Elsevier B.V. All rights reserved, 2014, p. 171–198.  
DOI: 10.1016/B978-0-444-63278-4.00005-7
20. Jia, Z., Yin, G., and Zhang, J., Rotating Ring-Disk Electrode Method, *In Rotating Electrode Methods and Oxygen Reduction Electrocatalysts*, Eds. W. Xing, G. Yin, J. Zhang, Elsevier B.V. All rights reserved, 2014, p. 199–229.  
DOI: 10.1016/B978-0-444-63278-4.00006-9
21. Xing, W., Yin, M., Lv, Q., Hu, Y., Liu, C., and Zhang J., Oxygen solubility, diffusion coefficient, and solution viscosity, *In Rotating Electrode Methods and Oxygen Reduction Electrocatalysts*, Eds. W. Xing, G. Yin, J. Zhang, Elsevier B.V. All rights reserved, 2014, p. 1–31.  
DOI: 10.1016/B978-0-444-63278-4.00001-X
22. Avdeev, Ya.G., About the nature of iron anodic activation in solutions of mineral acids, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2020, vol. 9, no. 4, p. 1375.  
DOI: 10.17675/2305-6894-2020-9-4-10
23. Pletnev, M.A., Effect of inhibitors on the desorption potentials in the anodic dissolution of iron in acid solutions – A review, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2020, vol. 9, no. 3, p. 842.  
DOI: 10.17675/2305-6894-2020-9-3-4

## REFERENCES

- Kuzin, A.V., Gorichev, I.G., Shelontsev, V.A., Kuzmenko, A.N., Plakhotnaia, O.N., and Ovsyannikova, L.V., The Role of a Complex Formation in the Dissolution of Iron Oxides in Orthophosphoric Acid, *Moscow Univ. Chem. Bull.*, 2021, vol. 76, no. 6, p. 398. DOI: 10.3103/S0027131421060055
- Kuzin A.V., Gorichev I.G., Shelontsev, V.A., Eliseeva, E.A., and Mamankov, A.V., Dissolution of magnetite in orthophosphoric acid: study and modeling, *Russ. Metall.*, 2021, vol. 2021, p. 260.  
DOI: 10.1134/S0036029521030083
- Kuzin, A.V., Gorichev, I.G., and Lainer, Y.A., Stimulating effect of phosphate ions on the dissolution kinetics of iron oxides in an acidic medium, *Russ. Metall.*, 2013, vol. 2013, p. 652.  
DOI: 10.1134/S0036029513090073
- Prodan, I.E., Yeshchenko, L.S., and Pechkovsky, V.V., Study of the crystallization of iron phosphates in the system iron (III) – phosphoric acid – water, *Russ. J. Inorg. Chem.* (in Russian), 1989, vol. 34, no. 7, p. 1860.
- Avdeev, Y.G., Panova, A.V., and Andreeva, T.E., Corrosion of Low-Carbon Steel in a Flow of Phosphoric Acid Solution Containing Iron (III) Phosphate, *Russ. J. Electrochem.*, 2023, vol. 59, p. 512.  
DOI: 10.1134/S1023193523070030
- Avdeev, Ya.G., Panova, A.V., and Anfilov, K.L., Effect of Fe(III) salts on the protection of low carbon steel in sulfuric acid solutions by some corrosion inhibitors, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2024, vol. 13, no. 2, p. 1135.  
DOI: 10.17675/2305-6894-2024-13-2-26
- Avdeev, Ya.G. and Andreeva, T.E., Mechanism of Steel Corrosion in Inhibited Acid Solutions Containing Iron (III) Salts, *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2022, vol. 96, no. 2, p. 423.  
DOI: 10.1134/S0036024422020030
- Kuznetsov, Yu.I., Andreev, N.N., and Marshakov, A.I., Physicochemical Aspects of Metal Corrosion Inhibition, *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2020, vol. 94, no. 3. p. 505.  
DOI: 10.1134/S0036024420030152
- Avdeev, Ya.G., Tyurina, M.V., and Kuznetsov, Yu.I., Protection of low-carbon steel in phosphoric acid solutions by mixtures of a substituted triazole with sulfur-containing compounds, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*

- 2014, vol. 3, no. 4, p. 246.  
DOI: 10.17675/2305-6894-2014-3-4-246-253
10. Avdeev, Ya.G., Tyurina, M.V., Kuznetsov, Yu.I., Pronin, Yu.E., and Kazanskiy, L.P., Protection of low-carbon steel in phosphoric acid solutions with IFKhAN-92 inhibitor. Part 2, *Corros.: mater., prot.* (in Russian), 2013, no. 6, p. 17.
  11. Kaesche, H., *Die Korrosion der Metalle. Physikalisch-chemische Prinzipien und Aktuelle Probleme* (in German), Springer, Berlin, 1979.
  12. Pletnev, M.A. and Reshetnikov, S.M., Cooperative Effects in the Problem of Acid Corrosion of Metals, *Prot. Met.*, 2004, vol. 40, p. 460.  
DOI: 10.1023/B: PROM.0000043064.20548.e0
  13. Antropov, L.I. *Theoretical Electrochemistry* (in Russian), Vysshaya Shkola, Moscow, 1965, p. 348–380.
  14. Bockris, J.O'M., Drazic, D., and Despic, A.R., The electrode kinetics of the deposition and dissolution of iron, *Electrochim. Acta*, 1961, vol. 4, no. 2–4, p. 325.  
DOI: 10.1016/0013-4686(61)80026-1
  15. Katrevich, A.N., Florianovich, G.M., and Kolotyrkin, Ya.M., Elucidation of the kinetic parameters of the reaction of active dissolution of iron in phosphate solutions *Prot. Met.* (in Russian), 1974, vol. 10, no. 4, p. 369.
  16. Reshetnikov, S.M. and Makarova, L.L., Kinetics and mechanism of cathodic and anodic processes that determine acid corrosion of metals in the area of active dissolution, *Redox and adsorption processes on the surface of solid metals* (in Russian), Udmurt State University, Izhevsk, 1979, p. 25–49.
  17. Reshetnikov, S.M., *Inhibitors of acid corrosion of metals*, (in Russian), Leningrad: Khimiya, 1986.
  18. Pleskov, Yu.V. and Filinovskii, V.Yu., *The Rotating Disk Electrode*, Consultants Bureau, New York, 1976.
  19. Du, C., Tan, Q., Yin, G., and Zhang, J., Rotating Disk Electrode Method, In *Rotating Electrode Methods and Oxygen Reduction Electrocatalysts*, Eds. W. Xing, G. Yin, J. Zhang, Elsevier B.V. All rights reserved, 2014, p. 171–198.  
DOI: 10.1016/B978-0-444-63278-4.00005-7
  20. Jia, Z., Yin, G., and Zhang, J., Rotating Ring-Disk Electrode Method, In *Rotating Electrode Methods and Oxygen Reduction Electrocatalysts*, Eds. W. Xing, G. Yin, J. Zhang, Elsevier B.V. All rights reserved, 2014, p. 199–229.  
DOI: 10.1016/B978-0-444-63278-4.00006-9
  21. Xing, W., Yin, M., Lv, Q., Hu, Y., Liu, C., and Zhang J., Oxygen solubility, diffusion coefficient, and solution viscosity, In *Rotating Electrode Methods and Oxygen Reduction Electrocatalysts*, Eds. W. Xing, G. Yin, J. Zhang, Elsevier B.V. All rights reserved, 2014, p. 1–31.  
DOI: 10.1016/B978-0-444-63278-4.00001-X
  22. Avdeev, Ya.G., About the nature of iron anodic activation in solutions of mineral acids, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2020, vol. 9, no. 4, p. 1375.  
DOI: 10.17675/2305-6894-2020-9-4-10
  23. Pletnev, M.A., Effect of inhibitors on the desorption potentials in the anodic dissolution of iron in acid solutions – A review, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2020, vol. 9, no. 3, p. 842.  
DOI: 10.17675/2305-6894-2020-9-3-4