

ИНГИБИТОРНАЯ ЗАЩИТА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В ПОТОКЕ РАСТВОРА СЕРНОЙ КИСЛОТЫ, СОДЕРЖАЩЕГО СУЛЬФАТ ЖЕЛЕЗА(III)

© 2025 г. Я. Г. Авдеев^{a, *}, А. В. Панова^a, Т. Э. Андреева^a

^aФедеральное 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 21.04.2024 г.

После доработки 20.05.2024 г.

Принята к публикации 25.05.2024 г.

Изучена коррозия низкоуглеродистой стали в потоке растворов H_2SO_4 , содержащих $Fe_2(SO_4)_3$, включая среды, с добавками ингибиторов коррозии — катамина АБ (смесь четвертичных аммониевых солей) и ИФХАН-92 (3-замещенное производное 1, 2, 4-триазола). 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 $Fe_2(SO_4)_3$ на коррозию стали в растворе H_2SO_4 , преимущественно обусловлено восстановлением $Fe(III)$. Напротив, в ингибированной кислоте ускоряющее действие катионов $Fe(III)$ сказывается на всех парциальных реакциях стали. 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 $Fe_2(SO_4)_3$ на коррозию стали в потоке растворов H_2SO_4 , в том числе в присутствии ингибиторов. В этих средах коррозия стали определяется конвективным фактором, что характерно для процессов с диффузионным контролем. Ингибитор ИФХАН-92, в отличие от катамина АБ, обеспечивает существенное замедление коррозии стали в потоке раствора H_2SO_4 , содержащего $Fe_2(SO_4)_3$. Причиной более высоких ингибиторных эффектов ИФХАН-92 при защите стали в рассматриваемых средах, в сравнении с катамином АБ, является более существенное замедление им парциальных электродных реакций металла.

Ключевые слова: конвекция, диффузионная кинетика, кислотная коррозия, низкоуглеродистая сталь, серная кислота, сульфат железа (III), ингибиторы коррозии.

DOI: 10.31857/S0044453725010033, **EDN:** EIVIQE

Растворы кислот широко применяются на различных предприятиях современного производства в качестве жидкостей различного технологического назначения [1–4]. В частности, их используют для очистки стального оборудования от продуктов коррозии, представленных, в первую очередь, ржавчиной, и других минеральных отложений. В результате растворения оксидных и гидроксидных фаз $Fe(III)$ такие растворы загрязняются растворимыми соединениями $Fe(III)$, существенно меняющими их свойства. Накопление в рассматриваемых средах растворимых солей $Fe(III)$ существенно повышает их окислительную способность, усиливая агрессивность растворов в отношении стальных конструкций, и делает мало эффективным в таких растворах применение ингибиторов

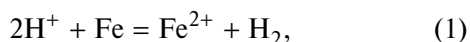
коррозии (ИК). Специфической особенностью коррозии сталей в растворах кислот, содержащих соли $Fe(III)$, является их чувствительность к гидродинамическим параметрам среды. В растворах кислот, включая ингибированные среды, коррозия стали усиливается при увеличении скорости потока среды [5].

Практическая значимость представленного исследования определяется необходимостью создания на основе азотсодержащих органических веществ для нужд современного производства эффективных ИК низкоуглеродистых сталей в растворах кислот [6]. При этом важно понимать, как разрабатываемые ИК будут защищать сталь в потоке коррозионной среды при накоплении в ней солей $Fe(III)$.

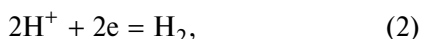
Для понимания процессов, происходящих в системах низкоуглеродистая сталь / раствор кислоты, содержащий соль Fe(III), важно проанализировать влияние условий конвекции агрессивной среды, как на отдельные стадии, так и на коррозию стали в целом. Следует установить влияние ИК на кинетические параметры системы. Оценка влияния гидродинамических параметров растворов кислот, содержащих соли 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.

В качестве модельной среды для проведения исследований нами выбран раствор серной кислоты, содержащий сульфат Fe(III), что определяется ее промышленной востребованностью [7, 8]. В качестве замедлителей коррозии стали исследованы продукты, часто используемые в качестве основы смесевых ИК — катамин АБ (смесь четвертичных аммониевых солей (ЧАС)) и ИФХАН-92 (3-замещенный 1,2,4-триазол). Сравнительные исследования этих ИК показывают, что в сходных условиях ИФХАН-92 сильнее тормозит кислотную коррозию сталей, что является следствием формирования этим соединением на поверхности металла полимолекулярных защитных слоев [9].

Коррозии низкоуглеродистых сталей в растворах минеральных кислот (так называемых “не окислителей”) в упрощенном виде описывается суммарной реакцией



которая является результатом преимущественного протекания парциальных реакций [10, 11]: катодного выделения водорода



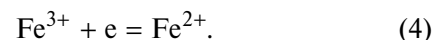
и анодного растворения железа



Особенности механизма реакции (2), реализуемой на поверхности сталей в растворах кислот, обсуждаются в работах [10–12]. Механизмы реакции (3) изучались Хойслером [10], Бокрисом [13], Колотыркиным и Флорианович [14]. Колотыркин и Флорианович показали, что анодная реакция железа в растворах H_2SO_4 протекает с участием в ней сульфат/гидросульфат-анионов.

В наших исследованиях показано [5], что в растворах кислот, содержащих соли 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 минеральных кислот парциальные реакции (2) и (3) реализуются с кинетическим контролем, а реакция (4) — с диффузионным контролем.

В нашем исследовании представляется целесообразным провести поиск, среди замедлителей коррозии различной природы (ЧАС и производное триазола), вещества эффективно тормозящего парциальные реакции стали (2)–(4) в растворах кислот, содержащих соли Fe(III). Такое вещество, по нашим представлениям, должно обеспечить существенное замедление коррозии стали не только в статической, но и в динамической коррозионной среде.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объекты и методы исследования

Для приготовления растворов использовали H_2SO_4 (“х.ч.”), $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (“х.ч.”) и дистиллированную воду. Исследованы ИК — катамин АБ, представляющий собой смесь алкилбензилдиметиламмоний хлоридов $[\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{N}^+(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5]\text{Cl}^-$, где $n = 10–18$, и ИФХАН-92, являющийся 3-замещенным 1,2,4-триазолом.

Электрохимические измерения на низкоуглеродистой стали Ст3 (состав, в % по массе: С — 0.14–0.22, Р — 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 деаэрированных водородом 2 М H_2SO_4 при $t = 25^\circ\text{C}$. Термостатирование стеклянной электрохимической ячейки осуществлялось с помощью циркуляционного термостата LOIP LT-411a (производитель ЗАО “Лабораторное оборудование и приборы”, Россия). Потенциалы стали измеряли относительно хлорид-серебряного электрода, заполненного насыщенным раствором KCl. Стальной электрод зачищали наждачной бумагой М20 и обезжиривали ацетоном. Поляризационные кривые снимали с помощью потенциостата ЭЛ-02.061 (производитель фирма “ЭЛНИТЕКС”, Россия) в потенциодинамическом режиме при скорости поляризации 0,0005 В/с. Перед наложением поляризации электрод выдерживали в исследуемом растворе 30 мин для установления потенциала свободной коррозии E_{cor} , а затем снимали кривые анодной и катодной поляризации стали. После их снятия изучали зависимость катодного тока при $E = -0.30$ В от скорости вращения

электрода ($n = 0, 460, 780, 1090, 1400$ об./мин). За 30 мин до проведения исследований и в ходе выполнения опытов исследуемые растворы деаэрировались водородом, получаемым в электролизере из раствора NaOH. Влияние ингибиторов на электродные процессы оценивали по величинам коэффициента торможения катодной

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

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 -0.05 В соответственно. При расчетах величин γ_c и γ_a за фоновый принимался раствор, содержащий в качестве добавок только катионы Fe(III) соответствующей концентрации.

Величины электродных потенциалов приводят-ся в статье 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_2SO_4 при температуре $t = 20 \pm 2^\circ C$ определяли по потере массы образцов (не менее пяти на точку):

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

Δm — изменение массы образца, г; S — площадь образца, m^2 , τ — длительность коррозионных испытаний, ч. Размер образцов 50 мм × 20 мм × 0.5 мм. Измерение массы стальных образцов до и после коррозионных исследований проводили с помощью аналитических весов GR-202 (производитель фирма AND, Япония). Объем коррозионной среды определялся из расчета 50 мл раствора кислоты на образец. Продолжительность опытов — 2 ч. Исследования выполняли как в статической, так и динамической коррозионной среде при скорости вращения пропеллерной магнитной мешалки $n = 0, 250, 420, 750$ и 1080 об./мин. Перемешивание коррозионной среды осуществлялось магнитной мешалкой MSH-300 (производитель фирма BioSan, Латвия). 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 γ 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

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

и коэффициента ускорения коррозии

$$\gamma_{Fe(III)}^{-1} = k_{Fe(III)} k_0^{-1}, \gamma_{dyn}^{-1} = k_{dyn} k_{st}^{-1}, \quad (10)$$

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

Измерения проведены на приборах ЦКП ФМИ ИФХЭ РАН.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Важные сведения о механизме коррозии стали в растворе кислоты, содержащей соль Fe(III), можно получить исследуя кинетику электродных реакций металла методом вольтамперометрии [15]. В 2 М H_2SO_4 форма поляризационных кривых (ПК) низкоуглеродистой стали свойственна для коррозии, протекающей в области потенциалов ее активного растворения (рис. 1, табл. 1). Присутствие в растворе кислоты $Fe_2(SO_4)_3$ смещает потенциал свободной коррозии стали (E_{cor}) в область более положительных потенциалов, что является результатом ускорения этой добавкой катодной реакции. Катионы Fe(III) практически не влияют на анодный процесс. Наблюдается положительный порядок катодной реакции стали по концентрации катионов Fe(III). Начальный участок катодных ПК характеризуется предельным током (i_{lim}). Напротив, наклон анодной поляризации соответствует фоновому значению.

Наличие в растворе H_2SO_4 добавок $Fe_2(SO_4)_3$ практически не влияет на характер протекания анодной реакции, которая, как в отсутствие, так и в присутствие сульфата Fe(III) протекает в соответствии с уравнением реакции (3). Характер катодных ПК указывает на участие Fe(III) в катодной реакции. В концентрированных растворах кислот ($pH < 2$) катодная реакция, соответствующая уравнению (2), протекает в области кинетического контроля [16], что подтверждается характером катодных ПК, полученных нами. В средах, содержащих $Fe_2(SO_4)_3$, они осложнены предельным током. Происходит изменение механизма катодной реакции. Наблюдаемый i_{lim} определяется диффузионными

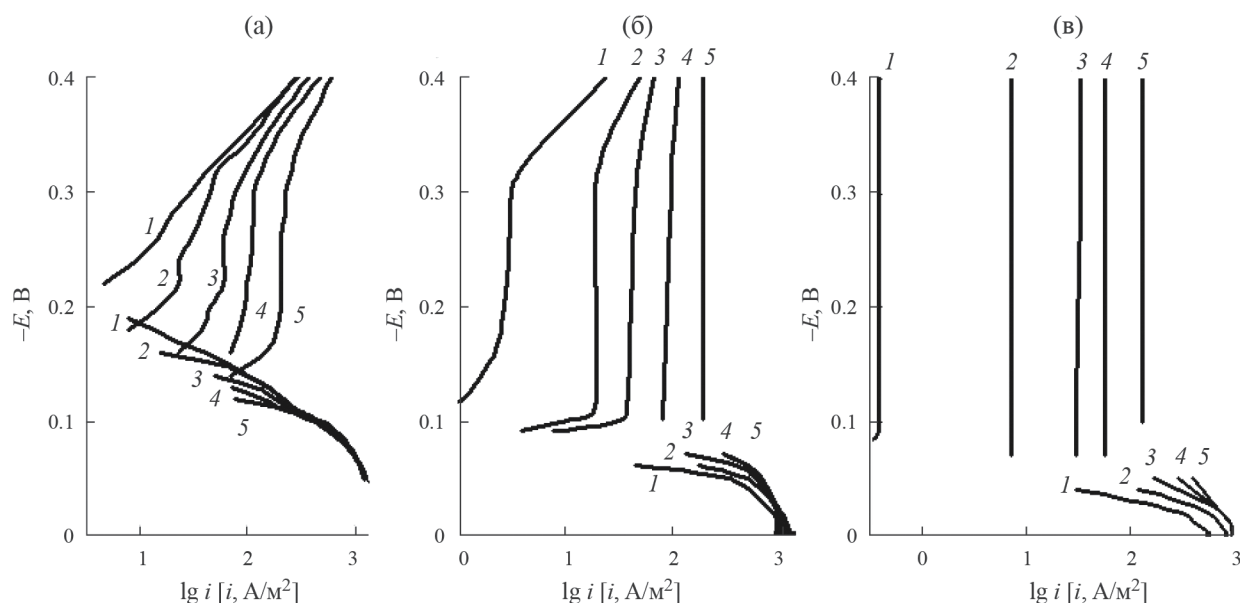


Рис. 1. Поляризационные кривые стального диска Ст3 в 2 М H_2SO_4 (а), ингибированной 10 мМ катамина АБ (б) и 10 мМ ИФХАН-92 (в), в присутствии Fe(III) (моль/л): 1 – 0, 2 – 0.02, 3 – 0.05, 4 – 0.10, 5 – 0.20, $n = 460$ об./мин.

Таблица 1. Значения потенциалов коррозии ($E_{\text{кор}}$) стали Ст3, тафелевых наклонов поляризационных кривых (b_c и b_a), плотности катодного и анодного токов (i_c и i_a) и коэффициенты торможения катодной и анодной реакции (γ_c и γ_a) при $E = -0.30$ и -0.05 В соответственно. E в В, i в A/m^2 , $n = 460$ об./мин, $t = 25^\circ\text{C}$

$C_{\text{Fe(III)}}, \text{M}$	$E_{\text{кор}}$	b_c	i_c	γ_c	b_a	i_a	γ_a
Без ингибитора							
0	-0.20	0.10	29.2	—	0.07	1260	—
0.02	-0.17	i_{lim}^*	46.2	—	0.07	1270	—
0.05	-0.15	i_{lim}	77.9	—	0.07	1340	—
0.10	-0.14	i_{lim}	119	—	0.07	1340	—
0.20	-0.13	i_{lim}	231	—	0.07	1350	—
10 мМ катамина АБ							
0	-0.09	i_{lim}	3.1	9.4	0.07	292	4.3
0.02	-0.07	i_{lim}	19.2	2.4	0.07	476	2.7
0.05	-0.08	i_{lim}	46.2	1.7	0.07	615	2.2
0.10	-0.08	i_{lim}	100	1.2	0.07	692	1.9
0.20	-0.08	i_{lim}	200	1.2	0.07	692	1.9
10 мМ ИФХАН-92							
0	-0.05	i_{lim}	0.4	73.0	0.04	10**	126.0
0.02	-0.05	i_{lim}	7.3	6.3	0.04	50**	25.4
0.05	-0.06	i_{lim}	33.8	2.3	0.05	173	7.7
0.10	-0.06	i_{lim}	57.7	2.1	0.07	308	4.4
0.20	-0.06	i_{lim}	134.6	1.7	0.10	415	3.3

* i_{lim} — предельный ток.

** Значение плотности тока найдено экстраполяцией линейного участка анодной ПК на $E = -0.05$ В.

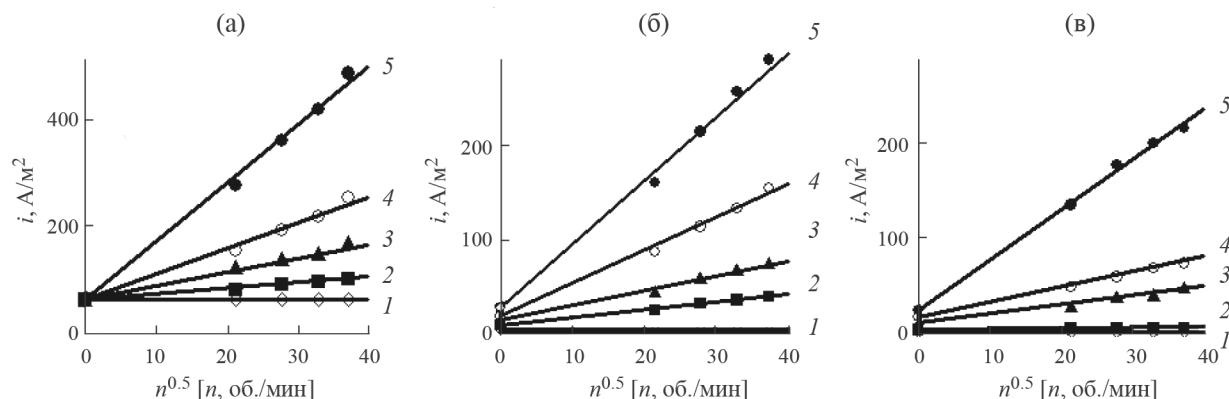


Рис. 2. Зависимости плотности катодного тока от частоты вращения стального диска Ст3 в 2 М H_2SO_4 (а), ингибированной 10 мМ катамина АБ (б) и 10 мМ ИФХАН-92 (в), в присутствии Fe(III) (моль/л): 1 – 0, 2 – 0.02, 3 – 0.05, 4 – 0.10, 5 – 0.20, $E = -0.30$ В, $t = 25^\circ\text{C}$.

Таблица 2. Значения постоянных i_k и f в уравнении $i_c = i_k + f n^{1/2}$ при $E = -0.30$ В и эффективных коэффициентов диффузии катионов Fe(III) для катодной реакции стального вращающегося дискового электрода в 2 М H_2SO_4 , содержащей $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, i_k в A/m^2 , f в $\text{Amin}^{1/2}/(\text{м}^2\text{об.}^{1/2})$, D , $\text{мкм}^2/\text{с}$, $t = 25^\circ\text{C}$

$C_{\text{Fe(III)}}, \text{M}$	Без добавок			10 мМ катамин АБ			10 мМ ИФХАН-92		
	i_k	f	$D \times 10^{-3}$	i_k	f	$D \times 10^{-3}$	i_k	f	$D \times 10^{-3}$
0	61.5	0	—	3.8	0	—	0.4	0	—
0.02	61.5	1.0	0.14 ± 0.02	7.7	0.8	0.08 ± 0.01	2.2	0.1	0.004
0.05	61.5	2.6		13.8	1.6		9.2	1.0	0.03
0.10	61.5	4.8		16.9	3.5		15.4	1.6	0.03
0.20	61.5	11.0		26.9	6.8		23.1	5.3	0.05

ограничениями, связанными с доставкой к поверхности стали деполаризатора — Fe^{3+} , присутствующего в растворе кислоты.

Нами установлено [5], что в области катодных потенциалов на стали в растворах минеральных кислот, содержащих соли Fe(III) , реализуются независимые реакции восстановления H^+ и Fe^{3+} , описываемые уравнениями (2) и (4), а катодный ток складывается из двух парциальных токов. Катодный процесс, определяемый реакцией (2), протекающей в кинетической области, и реакцией (4), контролируемой диффузией, описывается уравнением:

$$i_c = i_k + i_d, \quad (11)$$

где i_k и i_d — плотности кинетического и диффузионного токов. Изучение электрохимических реакций, протекающих с диффузионными ограничениями, проводят с помощью вращающегося дискового электрода [17, 18]. В случае ламинарного движения жидкости вблизи поверхности вращающегося металлического диска значение i_d прямо пропорционально корню квадратному из частоты

вращения дискового электрода (n), а выражение (11) принимает вид:

$$i_c = i_k + f n^{1/2}, \quad (12)$$

где f — коэффициент интенсивности приращения диффузионного тока. В 2 М $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ экспериментальная зависимость i_c от $n^{1/2}$ имеет линейный вид (рис. 2, табл. 2). В 2 М H_2SO_4 отсутствует отклик катодного тока на изменение частоты вращения стального диска, что указывает на кинетическую природу реакции (2). В растворах H_2SO_4 , содержащих $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, кинетическая составляющая катодного тока стального электрода такая же, как и в растворе без $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, что указывает на независимость реакций (2) и (4). Отсюда следует, что реакция (2) реализуется в кинетической, а реакция (4) — в диффузионной области.

Диффузионный ток, определяемый восстановлением Fe(III) на стальном электроде при ламинарном течении жидкости, описывается уравнением Левича [16]:

Таблица 3. Значения кинетического (i_k) и диффузионного (i_d) парциальных катодных токов и коэффициенты торможения ингибиторами этих парциальных катодных токов (γ_k и γ_d) для стального дискового электрода Ст3 (460 об./мин) в 2 М H_2SO_4 , $E = -0.30$ В, i в А/м^2

$C_{\text{Fe(III)}}, \text{М}$	Без добавок		10 мМ катамин АБ				10 мМ ИФХАН-92			
	i_k	i_d	i_k	γ_k	i_d	γ_d	i_k	γ_k	i_d	γ_d
0	61.5	0	3.8	16	0	—	0.4	150	0	—
0.02	61.5	18.5	7.7	8.0	15.4	1.2	2.2	28	1.7	11
0.05	61.5	61.6	13.8	4.5	30.8	2.0	9.2	6.7	18.5	3.3
0.10	61.5	92.3	16.9	3.6	69.3	1.3	15.4	4.0	32.3	2.9
0.20	61.5	215	26.9	2.3	135	1.6	23.1	2.7	112	1.9

$$i_d = 0.62zFC^*D^{2/3}\eta^{-1/6}\omega^{1/2}, \quad (13)$$

где z — число электронов участвующих в реакции, протекающей на электроде, C^* — концентрация Fe(III) в глубине раствора, D — коэффициент диффузии электроактивной частицы, η — кинематическая вязкость жидкости ($0.011 \text{ см}^2/\text{с}$ [19]), ω — угловая скорость вращения диска. Используя уравнение (13) из значений величин плотностей диффузионных токов, были рассчитаны величины $D_{\text{Fe(III)}}$ в 2 М H_2SO_4 (табл. 2).

В фоновых растворах H_2SO_4 , содержащих $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, протекание на стали реакций (2) и (4) независимо. При дальнейшем обсуждении результатов, связанных с ингибированием коррозии стали в таких средах, будем исходить из предположения, что оба этих парциальных катодных процесса также реализуются независимо [5].

Введение в 2 М H_2SO_4 добавки 10 мМ катамина АБ и, особенно, 10 мМ ИФХАН-92, существенно влияет на параметры электродных реакций стали Ст3 (рис. 1, табл. 1). В присутствии этих ИК происходит торможение обоих электродных реакций стали Ст3, причем значения $E_{\text{сог}}$ смещены в область положительных потенциалов в сравнении с фоновой средой на 0.11 и 0.15 В, соответственно, что свидетельствует о преимущественном замедлении этими веществами анодной реакции металла. В средах, содержащих ИК, наклон катодной поляризации, в сравнении с фоновой 2 М H_2SO_4 , увеличен до предельного тока. 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_2SO_4 при отсутствии $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, преимущественно обусловлен реакцией (2), реализующейся с кинетическим контролем. В ингибированных средах, особенно в присутствии ИФХАН-92, значения i_k ниже, чем в фоновой среде.

Наличие в коррозионной среде $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ухудшает торможение ИК катодной и анодной реакций стали, причем этот эффект усиливается при

увеличения содержания в растворе Fe(III) (рис. 1, табл. 1). Наблюдается 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 ингибированной кислоте $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ приводит к росту обеих величин i_k и i_d . Получается, что в ингибированной кислоте соли Fe(III) , ускоряют катодную реакцию, участвуя в ней не только в качестве дополнительного деполаризатора, но и снижают торможение ИК катодного выделения водорода, что в целом негативно сказывается на защите стали. Важно отметить, что при прочих равных условиях в присутствии добавки ИФХАН-92 негативное влияние $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ на торможение электродных реакций стали проявляется в значительно меньшей степени, чем в средах ингибированных катамином АБ.

Выполним количественную оценку влияния рассматриваемых ИК на кинетическую и диффузионную составляющие катодного процесса на стали. Для этого рассчитаем значения i_k и i_d стали в 2 М H_2SO_4 при скорости вращения электрода 460 об./мин (табл. 3). С увеличением содержания Fe(III) в растворе доля катодной реакции за счет его восстановления растет. В неингибированном растворе, содержащем 0.02 М Fe(III) , она составляет 21%, в присутствии 0.20 М Fe(III) — 78%. Сходная картина наблюдается в ингибированных растворах. В кислоте содержащей 0.02 и 0.2 М Fe(III) в присутствии катамина АБ доля восстановления катионов Fe(III) составляет 67 и 83%, а в растворе, содержащем ИФХАН-92, — 44 и 83% соответственно. Значения степеней торможения ингибиторами парциальных катодных токов стали показывают, что при прочих равных условиях, катамин АБ и ИФХАН-92 преимущественно тормозят катодное выделение водорода. Повышение концентрации катионов Fe(III) одновременно снижает торможение исследуемыми ИК восстановления протонов и катионов Fe(III) , но в средах, содержащих

ИФХАН-92, этот эффект выражен слабее, чем в растворах с добавкой катамина АБ.

Следует представлять, как наличие в агрессивной среде ИК повлияет на величину $D_{\text{Fe(III)}}$. Наблюдаемые в ингибированной 2 М H_2SO_4 , особенно в присутствии ИФХАН-92, величины $D_{\text{Fe(III)}}$ ниже значений, характерных для фоновой среды с теми же параметрами (табл. 2). В присутствии 10 мМ катамина АБ величины $D_{\text{Fe(III)}}$ приблизительно на 40% ниже величины, наблюдаемой в средах без ИК, и не зависят от концентрации в растворе $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Напротив, в случае добавки 10 мМ ИФХАН-92 величины $D_{\text{Fe(III)}}$ значительно ниже величины, наблюдаемой в средах без ИК. Значение величины $D_{\text{Fe(III)}}$ растет с увеличением в растворе $C_{\text{Fe(III)}}$. Следует уточнить, что в отличие от 2 М H_2SO_4 , содержащей $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, в ингибированных средах уравнение (13) позволяет рассчитать не истинные значения $D_{\text{Fe(III)}}$, а эффективные. Введение в раствор кислоты незначительных по содержанию добавок ИК (10 мМ) не может столь существенно изменить истинную величину $D_{\text{Fe(III)}}$ в нем. Нам видится другая причина этого явления — молекулы ингибитора, адсорбируясь на поверхности стали, формируют полимолекулярные защитные слои. В частности, состав и структура полимолекулярных защитных слоев, образуемых ингибитором ИФХАН-92, обсуждаются в работе [9]. Для восстановления, катион Fe(III) должен преодолеть защитный слой достигнуть поверхности стали. Скорость такого процесса будет определяться диффузией катион Fe(III) в защитном слое, сформированном ингибитором коррозии. Именно величины $D_{\text{Fe(III)}}$ в приповерхностном защитном слое ингибитора во многом определяют значения эффективных $D_{\text{Fe(III)}}$, полученных по уравнению (13). Необходимо отметить, что катамином АБ и ИФХАН-92 будут формировать на поверхности стали защитные слои с разной проницаемостью в отношении катионов Fe(III) . Вероятно, поверхностный защитный слой, формируемый катамином АБ, более проницаем для катионов Fe(III) в сравнении со слоем, образуемым ИФХАН-92, что отражается на значениях эффективных $D_{\text{Fe(III)}}$. Высокая проницаемость защитного слоя, формируемого катамином АБ, определяется тем, что молекулы ИК связаны с поверхностью металла слабым физическим взаимодействием. Напротив, молекулы ИФХАН-92, при формировании на стали в растворе H_2SO_4 защитного слоя, связываются с поверхностью металла химически, что определяет высокое защитное действие [9].

Выявление нами кинетических параметров исследуемых систем позволяет прогнозировать характер коррозии низкоуглеродистой стали в них. Коррозия стали в 2 М H_2SO_4 , содержащей $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, протекает через стадии, характеризующиеся как кинетическим контролем, так и с диффузионными ограничениями. Поэтому, характер коррозии

стали в таких системах должен существенно зависеть от характера конвекции агрессивной среды. При этом, не следует ожидать эффективной защиты низкоуглеродистой стали в 2 М H_2SO_4 , содержащей $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, добавкой катамина АБ, поскольку этот ингибитор плохо замедляет парциальные электродные реакции стали и, в первую очередь, восстановление катионов Fe(III) . Более перспективен в отношении защиты низкоуглеродистой стали в потоке 2 М H_2SO_4 , содержащей $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, ингибитор ИФХАН-92, который, судя по данным электрохимических исследований, сильнее влияет на парциальные реакции стали.

Сделанные нами выше предположения подтвердились при изучении коррозии низкоуглеродистой стали в 2 М H_2SO_4 , содержащей $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, по массопотере металлических образцов (рис. 3, табл. 4). Как в отсутствии ИК, так и в их присутствии, коррозия низкоуглеродистой стали в 2 М H_2SO_4 , содержащей $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, 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

$$k = k_{\text{ст}} + \lambda w^{1/2}, \quad (14)$$

где $k_{\text{ст}}$ — коррозия низкоуглеродистой стали в статической среде, w — частота вращения пропеллерной мешалки, λ — эмпирический коэффициент, характеризующий интенсивности приращения скорости коррозии. Уравнение (14) формально соответствует уравнению (12), характеризующему электродные реакции, протекающие с диффузионным контролем. При обсуждении полученных экспериментальных зависимостей следует учитывать, что согласно закономерностям диффузионной кинетики, в статической среде может осуществляться только кинетическая составляющая коррозионного процесса, а диффузионная, вследствие отсутствия движения жидкости, реализовываться не будет. Тогда значения $k_{\text{ст}}$, полученные в средах, содержащих $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, должны быть равны значению $k_{\text{ст}}$ в 2 М H_2SO_4 , где процесс реализуется исключительно в кинетическом режиме. Фактические значения $k_{\text{ст}}$ наблюдаемые в средах, содержащих $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, существенно выше величины в 2 М H_2SO_4 . Полученный эффект является результатом естественной конвекции, происходящей в статической коррозионной среде. Еще более он усиливается обильным выделением газообразного водорода в ходе коррозионного процесса на достаточно большой по площади поверхности стальных образцов. Формирующиеся и всплывающие пузырьки

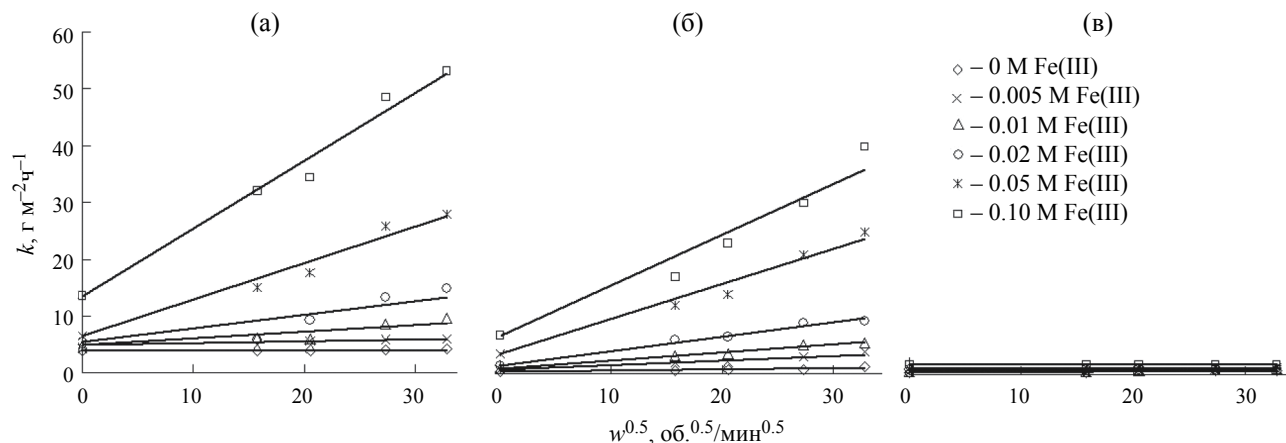


Рис. 3. Зависимости скорости коррозии стали Ст3 в 2 М H_2SO_4 , содержащей Fe(III) , от частоты вращения пропеллерной мешалки в коррозионной среде, а – без ингибитора, б – 10 мМ катамина АБ, в – 10 мМ ИФХАН-92. Продолжительность опытов – 2 ч, $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Таблица 4. Значения постоянных k_{st} и λ в уравнении $k = k_{\text{st}} + \lambda w^{1/2}$ для коррозии низкоуглеродистой стали 08пс в 2 М H_2SO_4 , содержащей $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, k_{st} в $\text{г}/(\text{м}^2\text{ч})$, λ в $\text{гмин}^{1/2}/(\text{м}^2\text{чоб.}^{1/2})$. Продолжительность опытов – 2 ч, $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$

$C_{\text{Fe(III)}}, \text{М}$	Без добавок		10 мМ катамина АБ		10 мМ ИФХАН-92	
	k_{st}	λ	k_{st}	λ	k_{st}	λ
0	4.0	0.005	0.43	0.019	0.35	0.013
0.005	4.2	0.060	0.77	0.081	0.38	0.014
0.01	4.8	0.125	0.90	0.142	0.58	0.011
0.02	5.5	0.152	1.5	0.253	0.84	0.004
0.05	6.4	0.644	3.5	0.614	1.0	0.004
0.10	13.6	1.189	6.7	0.892	1.8	0

водорода могут сильно перемешивать агрессивную среду. При переходе от статической коррозионной среды к динамической этот эффект нивелируется по мере увеличения частоты вращения пропеллерной мешалки. Следует отметить, что в 2 М H_2SO_4 , как в отсутствии 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, в наших дальнейших обсуждениях его учитывать не будем.

Анализ экспериментальных данных показывает, что увеличение содержания в коррозионной среде $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ускоряет коррозию низкоуглеродистой стали (табл. 5). Наиболее существенно увеличение $C_{\text{Fe(III)}}$ сказывается на скорости коррозии стали в среде не содержащей ингибиторов. Также в присутствии $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ в растворе H_2SO_4 коррозия

стали ускоряется при переходе от статической среды к динамической. Например, при $C_{\text{Fe(III)}} = 0,1 \text{ М}$ в 2 М H_2SO_4 , не содержащей ингибитора, переход от статической среды к динамической ($w = 750 \text{ об./мин}$) сопровождается приращением коррозионных потерь $\Delta k = 35 \text{ г}/(\text{м}^2\text{ч})$. При этом скорости коррозии стали в статической среде $k_{\text{st}} = 14 \text{ г}/(\text{м}^2\text{ч})$, что существенно ниже.

В 2 М H_2SO_4 , в отсутствие $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, добавки органических ИК существенно тормозят коррозию стали 08пс. Максимальное защитное действие проявляет ИФХАН-92 для которого значения величин k_{st} и λ максимально снижены в сравнении с фоновой средой (табл. 5). В фоновом растворе H_2SO_4 , а так же в среде, содержащей катамин АБ, присутствие солей Fe(III) увеличивает значения параметров k_{st} и λ . Чем выше $C_{\text{Fe(III)}}$, тем сильнее проявляется негативное влияние $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ на коррозию стали в потоке агрессивной среды. В 2 М H_2SO_4 , ингибированной ИФХАН-92, влияние добавки

Таблица 5. Скорость коррозии (k), приращение коррозионных потерь (Δk) и коэффициент ускорения коррозии (γ^{-1}) стали 08пс в 2 М H_2SO_4 , содержащих $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, k и Δk в $\text{г}/(\text{м}^2\text{ч})$. Продолжительность опытов – 2 ч, $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$

$C_{\text{Fe(III)}}, \text{ М}$	Статическая среда			Динамическая среда (750 об./мин)			$\Delta k_{\text{dyn}}^{**}$	$\gamma_{\text{dyn}}^{-1**}$
	k	$\Delta k_{\text{Fe(III)}}^*$	$\gamma_{\text{Fe(III)}}^{-1*}$	k	$\Delta k_{\text{Fe(III)}}$	$\gamma_{\text{Fe(III)}}^{-1}$		
Без ингибитора								
0	4.0	0	1.0	4.1	0	1.0	0.10	1.0
0.005	4.2	0.2	1.1	5.9	1.8	1.4	1.7	1.4
0.01	4.8	0.8	1.2	8.5	4.4	2.1	3.7	1.8
0.02	5.5	1.5	1.4	11	6.6	2.7	5.5	2.0
0.05	6.4	2.4	1.6	26	22	6.3	20	4.1
0.10	14	10	3.5	49	45	12	35	3.5
10 мМ катамина АБ								
0	0.43	0	1.0	0.77	0	1.0	0.34	1.8
0.005	0.77	0.34	1.8	2.9	2.1	3.7	2.1	3.8
0.01	0.90	0.47	2.1	5.2	4.4	6.8	4.3	5.7
0.02	1.5	1.1	3.5	9.0	8.2	12	7.5	6.0
0.05	3.5	3.1	8.1	21	20	27	18	6.0
0.10	6.7	6.3	16	30	29	39	23	4.5
10 мМ ИФХАН-92								
0	0.35	0	1.0	0.77	0	1.0	0.42	2.2
0.005	0.38	0.03	1.1	0.80	0.03	1.0	0.42	2.1
0.01	0.58	0.20	1.5	0.92	0.15	1.2	0.34	1.6
0.02	0.84	0.49	2.4	0.95	0.18	1.2	0.11	1.1
0.05	1.0	0.64	2.9	1.1	0.33	1.4	0.10	1.1
0.10	1.8	1.5	5.1	1.8	1.0	2.3	0	1.0

* 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).

$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ несколько иное. Увеличение содержания Fe(III) в коррозионной среде повышает значение параметра $k_{\text{ст}}$, но, в целом, понижает значение параметра λ . В результате во всех условиях эксперимента, включая испытания в потоке среды, сохраняется $k \leq 1.8 \text{ г}/(\text{м}^2\text{ч})$.

Высокая эффективность 10 мМ ИФХАН-92 в торможении коррозии стали 08пс в потоке раствора H_2SO_4 , содержащего $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, в сравнении с фоновой средой или средой, содержащей 10 мМ катамина АБ, наглядно демонстрируют данные по приращению коррозионных потерь стали в этих средах в результате перехода от статических к динамическим условиям или при увеличении содержания в коррозионной среде $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (табл. 5).

Сравнение ингибиторного действия 10 мМ катамина АБ и 10 мМ ИФХАН-92 при защите стали 08пс в 2 М H_2SO_4 , содержащей $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$,

показывает более высокие защитные эффекты замещенного триазола, как в статических, так и динамических средах (табл. 6). Увеличение содержания Fe(III) существенно снижает защитное действие катамина АБ в статической и динамической средах. Для ИФХАН-92 происходит незначительное снижение защитного действия в статических условиях коррозионных испытаний. В динамической среде, напротив, наблюдается рост защитного действия.

Различия в защитной эффективности катамина АБ и ИФХАН-92 обусловлены различиями в природе их адсорбционного взаимодействия с металлом. Причина снижения катамином АБ защитного действия в присутствии $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ — ускорение катодной реакции стали, смещающее ее $E_{\text{кор}}$ в область более высоких потенциалов при которых поверхность металла имеет положительный заряд, что,

Таблица 6. Коэффициенты торможения коррозии (γ) стали 08пс в 2 М H_2SO_4 , содержащей $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, исследуемыми ингибиторами коррозии. Продолжительность опытов – 2 ч, $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$

$C_{\text{Fe(III)}}, \text{М}$	10 мМ катамин АБ		10 мМ ИФХАН-92	
	Статическая среда	Динамическая среда (750 об./мин)	Статическая среда	Динамическая среда (750 об./мин)
0	9.3	5.3	11	5.3
0.005	5.5	2.0	11	7.4
0.01	5.3	1.6	8.3	9.2
0.02	3.7	1.2	6.5	12
0.05	1.8	1.2	6.4	24
0.10	2.1	1.6	7.8	27

как показано в работе Антропова [20], ухудшает физическую адсорбцию органических катионов на ней. Молекулы ИФХАН-92 связаны с поверхностью металла химическим взаимодействием.

Интересно, что различия в эффективности ИФХАН-92 и катамина АБ, полученные в ходе коррозионных испытаний, существенно выше, чем предсказывались из данных электрохимических исследований. Причины этих различий кроются в том, что в ходе электрохимических исследований металл постоянно находится в жестких условиях принудительной поляризации, когда электродные реакции на металле протекают со скоростями, значительно превышающими те, что реализуются при $E_{\text{сог}}$. Видимо, принудительная поляризация электрода нежелательно сказывается на защитных свойствах ИФХАН-92.

Получен результат, имеющий важное теоретическое и практическое значение. Показано, что применяя в качестве замедлителей коррозии вещества, способные хемосорбироваться на поверхности металла, можно обеспечить эффективную защиту сталей в потоке раствора кислоты, содержащего соли Fe(III) . Впервые предложен индивидуальный ингибитор – ИФХАН-92, способный защищать сталь в потоке раствора H_2SO_4 , содержащего $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. В самых жестких условиях потока агрессивной среды, содержащей 0.1 М Fe(III) , добавка 10 мМ ИФХАН-92 замедляет коррозию низкоуглеродистой стали почти в 30 раз, обеспечивая $k = 1.8 \text{ г/(м}^2\text{ч)}$.

ВЫВОДЫ

1. Коррозия низкоуглеродистой стали в динамическом растворе H_2SO_4 , содержащем $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, 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:

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

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

2. Коррозия низкоуглеродистой стали в потоке раствора H_2SO_4 , содержащего $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, реализуется в результате протекания на металле трех парциальных реакций: анодной ионизации железа и катодного восстановления протонов и катионов Fe(III) .

3. Изучена возможность ингибиторной защиты низкоуглеродистой стали в потоке раствора H_2SO_4 , содержащем $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, добавками ИФХАН-92 и катамина АБ. Показано, что ингибитор ИФХАН-92, в отличие от катамина АБ, обеспечивает существенное замедление коррозии стали в этих средах. Причиной более высоких ингибиторных эффектов ИФХАН-92 при защите стали в рассматриваемых средах, в сравнении с катамином АБ, является более эффективное замедление им парциальных электродных реакций металла: анодной ионизации железа и катодного восстановления протонов и катионов Fe(III) .

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батраков В.В., Батраков В.П., Пивоварова Л.И., Соболев В.В. Коррозия конструкционных материалов. Газы и неорганические кислоты. Справочное издание. В двух книгах. Кн. 2. Неорганические кислоты. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 320 с.
2. Verma C., Quraishi M.A., Ebenso E.E. // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2020. V. 9. № 4. P. 1261–1276. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-4-5>
3. Глущенко В.Н., Силин М.А. Нефтепромысловая химия: Изд. в 5-ти томах. – Т. 4. Кислотная

- обработка скважин / Под ред. И.Т. Мищенко. М.: Интерконтакт Наука, 2010. 703 с.
4. *Finšgar M., Jackson J.* // Corros. Sci. 2014. V. 86. P. 17–41.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.04.044>
 5. *Авдеев Я.Г., Панова А.В., Андреева Т.Э.* // Журн. физ. химии. 2023. Т. 97. № 5. С. 730.
<https://doi.org/10.31857/S0044453723050059>
[*Avdeev Ya.G., Panova A.V., Andreeva T.E.* // Russ. J. Phys. Chem. A. 2023. V. 97. P. 1018.
<https://doi.org/10.1134/S0036024423050059>]
 6. *Кузнецов Ю.И., Андреев Н.Н., Маршаков А.И.* // Журн. физ. химии. 2020. Т. 94. № 3. С. 381.
<https://doi.org/10.31857/S0044453720030152>.
[*Kuznetsov Yu.I., Andreev N.N., Marshakov A.I.* // Ibid. 2020. V. 94. № 3. P. 505.
<https://doi.org/10.1134/S0036024420030152>]
 7. *Richardson J.A., Abdullahi A.A.* / In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier, 2017. 24 p.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10517-X>
 8. *Ouarga A., Zirari T., Fashu S. et al.* // J. Mater. Res. Technol. 2023. V. 26. P. 5105.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.198>
 9. *Авдеев Я.Г., Ненашева Т.А., Лучкин А.Ю. и др.* // Хим. физика. 2024. Т. 43. № 1. Р. 24.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X24010033>
[*Avdeev Ya.G., Nenasheva T.A., Luchkin A.Yu., Marshakov A.I., Kuznetsov Yu.I.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2024. V. 18, P. 111.
<https://doi.org/10.1134/S1990793124010044>]
 10. *Кеше Г.* Коррозия металлов. Физико-химические принципы и актуальные проблемы. / Пер. с нем. под. ред. акад. Я.М. Колотыркина. М.: Металлургия, 1984. С. 76.
 11. *Плетнев М.А., Решетников С.М.* // Защита металлов. 2004. Т. 40. № 5. С. 513. [*Pletnev M.A., Reshetnikov S.M.* // Prot. Met. 2004. V. 40. P. 460.
<https://doi.org/10.1023/B:PROM.0000043064.20548.e0>]
 12. *Антропов Л.И.* Теоретическая электрохимия. М.: Высш. школа, 1965. С. 348.
 13. *Bockris J.O'M., Drazic D., Despic A.R.* // Electrochim. Acta. 1961. V. 4. № 2–4. P. 325.
[https://doi.org/10.1016/0013-4686\(61\)80026-1](https://doi.org/10.1016/0013-4686(61)80026-1)
 14. *Florianovich G.M., Sokolova L.A., Kolotyркин Ya.M.* // Electrochim. Acta. 1967. V. 12. № 7. P. 879.
[https://doi.org/10.1016/0013-4686\(67\)80124-5](https://doi.org/10.1016/0013-4686(67)80124-5)
 15. *Решетников С.М.* Ингибиторы кислотной коррозии металлов. Л.: Химия, 1986. 144 с.
 16. *Плесков Ю.В., Филиновский В.Ю.* Вращающийся дисковый электрод. М: Наука, 1972. 344 с.
 17. *Du C., Tan Q., Yin G., Zhang J.* / In Rotating Electrode Methods and Oxygen Reduction Electrocatalysts. Eds. W. Xing, G. Yin, J. Zhang, Elsevier B.V. All rights reserved. 2014. P. 171.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63278-4.00005-7>
 18. *Jia Z., Yin G., Zhang J.* / 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.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63278-4.00006-9>
 19. Краткий справочник физико-химических величин. / Под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. Л.: Химия, 1967. С. 103.
 20. *Антропов Л.И., Погребова И.С.* / Коррозия и защита от коррозии. Т. 2. (Итоги науки и техники). М.: ВИНТИ, 1973. С. 27.

Chemical kinetics and catalysis

INHIBITOR PROTECTION OF LOW CARBON STEEL IN THE FLOW OF SULFURIC ACID SOLUTION CONTAINING IRON(III) SULFATE

Ya. G. Avdeev^{a,*}, A. V. Panova^a, and T. E. Andreeva^a

^a*Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences
31-4, Leninsky prospect, 119071 Moscow, Russia*

**e-mail: avdeevavdeev@mail.ru*

Abstract. Corrosion of low-carbon steel in the flow of H₂SO₄ solutions containing Fe₂(SO₄)₃, including media with additives of corrosion inhibitors, viz. catamine AB (a mixture of quaternary ammonium salts) and IFKhAN-92 (3-substituted derivative of 1,2,3-triazole) is 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 latter is characterized by diffusion control. The accelerating effect of Fe₂(SO₄)₃ on the corrosion of steel in H₂SO₄ solution is mainly due to the reduction of Fe(III). In contrast, in an inhibited acid, the accelerating effect of Fe(III) cations affects all partial reactions of steel. The data on corrosion of low-carbon steel in the flow of the

studied media obtained by mass loss of metal samples are in satisfactory agreement with the results of the study of partial electrode reactions. The accelerating effect of $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ on steel corrosion in the flow of H_2SO_4 solutions, including in the presence of inhibitors, is noted. In these media, steel corrosion is determined by the convective factor, which is characteristic of diffusion-controlled processes. Unlike catamine AB, the IFKhAN-92 inhibitor ensures a significant slowdown of steel corrosion in the flow of H_2SO_4 solution containing $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. The reason of higher inhibitor effects of IFKhAN-92 at protection of steel in the considered media as compared to catamine AB is that it slows down partial electrode reactions of metal more substantially.

Keywords: convection, diffusion kinetics, acid corrosion, low-carbon steel, sulfuric acid, iron (III) sulfate, corrosion inhibitors