

ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОРРОЗИИ СТАЛИ В НЕЙТРАЛЬНОЙ И ЩЕЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗОКСИДНЫХ ПУЛЬПАХ

В.А. Шелонцев¹

И.Г. Горичев²

А.В. Кузин²

И.В. Герасимова³

Е.А. Елисеева⁴

89139617129@list.ru

gorichevig@gmail.com

av.kuzin@mpgu.su

i_gerassimova@mail.ru

yakusheva@bmstu.ru

¹ ОмГА, Омск, Российская Федерация

² МПГУ, Москва, Российская Федерация

³ ОмГПУ, Омск, Российская Федерация

⁴ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проведено исследование по выявлению и теоретическому обоснованию закономерностей коррозии стали в водной пульпе железорудного концентрата. Рассмотрено влияние на коррозионные потери стали 20 содержания растворенного кислорода (P_{O_2}), pH, концентрации хлорид-ионов (C_{Cl^-}) и скорости движения железоксидной пульпы ω . Сравнительный анализ значений скорости коррозии, полученных гравиметрическим методом и методом поляризационного сопротивления, показал, что обратная величина поляризационного сопротивления и скорость коррозии с увеличением pH изменяются симбатно, значения скорости коррозии количественно хорошо согласуются между собой. Для выявления закономерностей коррозии использован метод поляризационного сопротивления. На зависимости скорости коррозии от pH выявлено два характерных участка: на первом не наблюдается зависимость скорости от pH (6,5–9,0); на втором происходит резкое снижение коррозионных потерь при переходе pH от 9,0 до 12,5. Для pH = 6,5–9,0 скорость коррозии линейно возрастает с повышением парциального давления кислорода и коррозионные потери в пульпе выше, чем в фоновом растворе. Зависимость $\rho(\sqrt{\omega})$ линейна на всем интервале pH (6,0–9,0), что свидетельствует о диффузионном контроле процесса коррозии. Результаты

Ключевые слова

Коррозия, железоксидная пульпа, поляризационное сопротивление, защита

проведенного исследования показывают, что для защиты углеродистой стали от коррозии в железоксидной пульпе необходимо учитывать рН и концентрацию O_2 . Оптимальное снижение уровня коррозионных потерь можно проводить защелачиванием пульпы и удалением растворенного кислорода

Поступила 15.06.2021

Принята 09.08.2021

© Автор(ы), 2021

Введение. Трубопроводный гидротранспорт широко используется для транспортировки твердых и сыпучих материалов. По прогнозам в ближайшее время его применение будет еще больше расширяться за счет строительства новых трубопроводных линий [1].

Следует отметить, что большая часть исследований посвящена решению чисто технологических задач: снижение себестоимости за счет уменьшения доли энергозатрат при гидротранспортировке; снижение гидродинамического сопротивления турбулентного трения (ГСТТ) добавками растворимых высокомолекулярных полимеров (эффект Томаса) в суспензиях твердых частиц (гидротранспорт сыпучих материалов), а также снижение влияния внешних факторов на реологические свойства суспензий [2–8] и др. Работ, в которых опубликованы систематические исследования по коррозии и защите внутренней поверхности пульпопроводов от коррозионных разрушений, немного.

Одной из отличительных особенностей гидротранспортировки твердых материалов по трубопроводам является наличие в агрессивной среде твердых частиц. Средние значения некоторых физико-химических характеристик твердых материалов, которые чаще всего транспортируются по действующим трубопроводам, следующие: уголь — плотность $1,4 \text{ т} \cdot \text{м}^{-3}$, размер частиц 2,4 мм, массовая концентрация 50 %; железорудный концентрат — $5,0 \text{ т} \cdot \text{м}^{-3}$, размер частиц 0,15 мм, массовая концентрация 50...60 % [9]. Как правило, жидкой фазой пульпы является природная вода.

Изучение влияния твердых частиц на соотношение коррозионного и эрозионного факторов при различных внешних условиях стало предметом многих исследований, например, [10–13]. Установлено, что коррозионный фактор значительно преобладает над механическим даже при очень сильном воздействии, причем в области устойчивого пассивного состояния [10]. В этом случае доля коррозионного фактора в общем износе составляет 70 %. Поэтому важно изучать влияние внешних факторов на коррозионные потери стали.

Цель работы — изучить влияние рН, содержания растворенного кислорода, концентрации хлорид-ионов и скорости движения железоксидной пульпы на коррозионные потери углеродистой стали.

Материалы и методы. Использованы следующие реактивы: NaCl; NaOH; Ca(OH)₂ марки «х.ч.»; Na₂SO₄ марки «ч.д.а.»; все растворы приготовлены на дистиллированной воде. В экспериментах фоновым служил раствор, содержащий 1 г/л Na₂SO₄ + 0,5 г/л NaCl. Массовая доля твердой фазы пульпы 50 %, концентрация других составляющих рассчитывалась в процентных долях от массы железорудного концентрата.

Необходимое значение pH создавали гидроксидом кальция. Поскольку магнетит и железорудный концентрат поглощают щелочь, для экспериментов использовали пульпу, предварительно выдержанную (в течение 1 сут) с установившимся значением pH.

Необходимое содержание кислорода в реакционной смеси создавалось путем барботаж через ячейку смеси воздуха и гелия в определенных соотношениях. Контроль за содержанием кислорода проводили с использованием кислородомера *Orbispher Lab-2714*. Газовые смеси и чистый гелий барботировали в течение 2 ч до помещения образцов и электродов в раствор и далее на протяжении всего эксперимента.

Гравиметрические эксперименты выполнены на дисковых стальных образцах, укрепленных на оси с использованием фторопластовых прокладок и шайб. Скорость вращения контролировалась тахометром.

Возможность применения метода поляризационного сопротивления для оценки скорости коррозии углеродистой стали в железооксидных пульпах показана в [14]. Поляризационное сопротивление (R_n) измеряли на вращающемся дисковом электроде в трехэлектродной ячейке. Равномерное распределение частиц твердой фазы пульпы обеспечивалось механическим перемешиванием пульпы с использованием мешалки. Магнитную мешалку не применяли вследствие того, что железооксидная руда и магнетит, обладая магнитными свойствами, блокируют поверхность рабочего электрода. Это приводит к очень плохой воспроизводимости результатов и неправильной оценке величины R_n . В качестве рабочего служил электрод из стали 20, впрессованный во фторопластовую оправку. Площадь поверхности электрода 0,29 см². Электродом сравнения был насыщенный хлорсеребряный электрод (номинальный потенциал по водородной шкале 0,201 ± 0,002 В), вспомогательным — платиновый.

Поляризацию рабочего электрода проводили с использованием потенциостата П-5827М в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки 0,2 мВ · с⁻¹. Отклонение потенциала (ΔE) при поляризации составляло 15...20 мВ от стационарного в катодную и анодную области.

Результаты исследований и их обсуждение. В целях выявления закономерностей коррозионного процесса в железооксидной пульпе про-

ведены исследования по влиянию содержания растворенного кислорода, рН, угловой скорости вращения образца и концентрации хлорид-ионов. Зависимости обратной величины поляризационного сопротивления и скорости коррозии (весовые данные) от рН приведены на рис. 1.

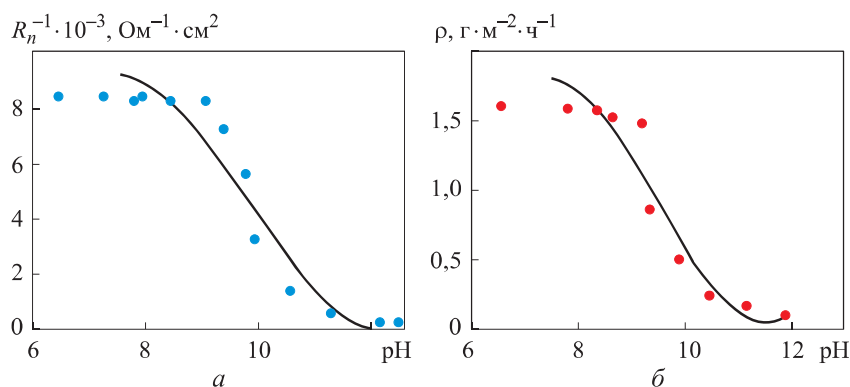


Рис. 1. Зависимости обратной величины поляризационного сопротивления (а) и массового показателя скорости коррозии (б) стали 20 в пульпе железорудного концентрата от рН ($\omega = 24,5 \text{ с}^{-1}$; $P_{\text{O}_2} = 21,28 \text{ кПа}$)

Эти результаты показывают, что при $\text{pH} < 0,9$ скорость коррозии практически не зависит от рН. При дальнейшем повышении концентрации OH^- -ионов наблюдается значительное замедление коррозии.

Для получения массового показателя коррозии, $\text{А} \cdot \text{см}^{-2}$, по данным поляризационного сопротивления использовали уравнения

$$i_{\text{кор}} = \frac{B}{R_n}, \quad (1)$$

$$i_{\text{кор}} = \frac{\rho}{10\,420}. \quad (2)$$

Здесь B — постоянная величина, зависящая от констант в уравнении Тафеля,

$$B = \frac{b_a b_k}{2,3(b_a + b_k)};$$

R_n — линейное поляризационное сопротивление.

Решая совместно (1) и (2) относительно ρ , получаем

$$\lg \rho = 4,02 + \lg B - \lg \bar{R}_n. \quad (3)$$

При расчете значения ρ для $\text{pH} = 6,0\text{--}9,0$ значение B принимали равным 18 мВ [14]. Подставив это значение в (3), получим уравнение пересчета \bar{R}_n в массовый показатель скорости коррозии:

$$\lg \rho = 2,28 - \lg \bar{R}_n. \quad (4)$$

Для области рН 9,0–12,5 константа B зависит от рН и определяется уравнением [14]:

$$B = -1,49 + 0,2(\text{pH} - 9). \quad (5)$$

Чтобы рассчитать значения скорости коррозии в интервале рН 9,0–12,5 по \bar{R}_n , необходимо решить совместно уравнения (3) и (5). Такое решение дает

$$\lg \rho = 0,73 + 0,2\text{pH} - \lg \bar{R}_n. \quad (6)$$

Сравнение рассчитанных по уравнениям (3), (6) и экспериментальных (по результатам гравиметрических экспериментов) данных во всей исследованной области рН показывает, что относительное отклонение рассчитанных величин от экспериментальных не превышает 5 %. Поэтому здесь будут приведены значения ρ , рассчитанные по \bar{R}_n . Представляет интерес рассмотреть закономерности коррозионного процесса для нейтральной и щелочной сред.

Экспериментальные данные по влиянию парциального давления кислорода, угловой скорости вращения образца и концентрации хлорид-ионов на массовый показатель коррозии углеродистой стали приведены на рис. 2. Существенное влияние на ρ стали в нейтральной пульпе оказывает растворенный кислород (рис. 2, а). Скорость коррозии линейно возрастает с повышением парциального давления кислорода. Коррозионные потери в пульпе выше, чем в фоновом растворе (рис. 2, б). Зависимость $\rho(\sqrt{\omega})$ линейна во всем интервале рН (6,0–9,0). В фоновом растворе $\rho(\sqrt{\omega})$ -прямая при экстраполяции на $\omega \rightarrow 0$ проходит через начало координат, что свидетельствует о диффузионном контроле процесса коррозии. В пульпе характер зависимости не изменяется, однако в этом случае прямая не проходит через начало координат. Это связано со специфическим действием твердых частиц оксидов железа, которые могут выступать деполяризаторами катодного процесса. Наличие в коррозионной среде Cl^- -ионов влияет на скорость коррозии в нейтральной пульпе (рис. 2, в).

Коррозионный процесс в области рН 6,0–9,0 как в фоновых растворах, так и в железорудной пульпе можно охарактеризовать следующими параметрами (рис. 3):

$$\frac{\partial \lg \rho}{\partial \lg P_{\text{O}_2}} = 1; \quad \frac{\partial \lg \rho}{\partial \lg \omega} = 0,5; \quad \frac{\partial \lg \rho}{\partial \lg C_{\text{Cl}^-}} = 0,4; \quad \frac{\partial \lg \rho}{\partial \text{pH}} = 0.$$

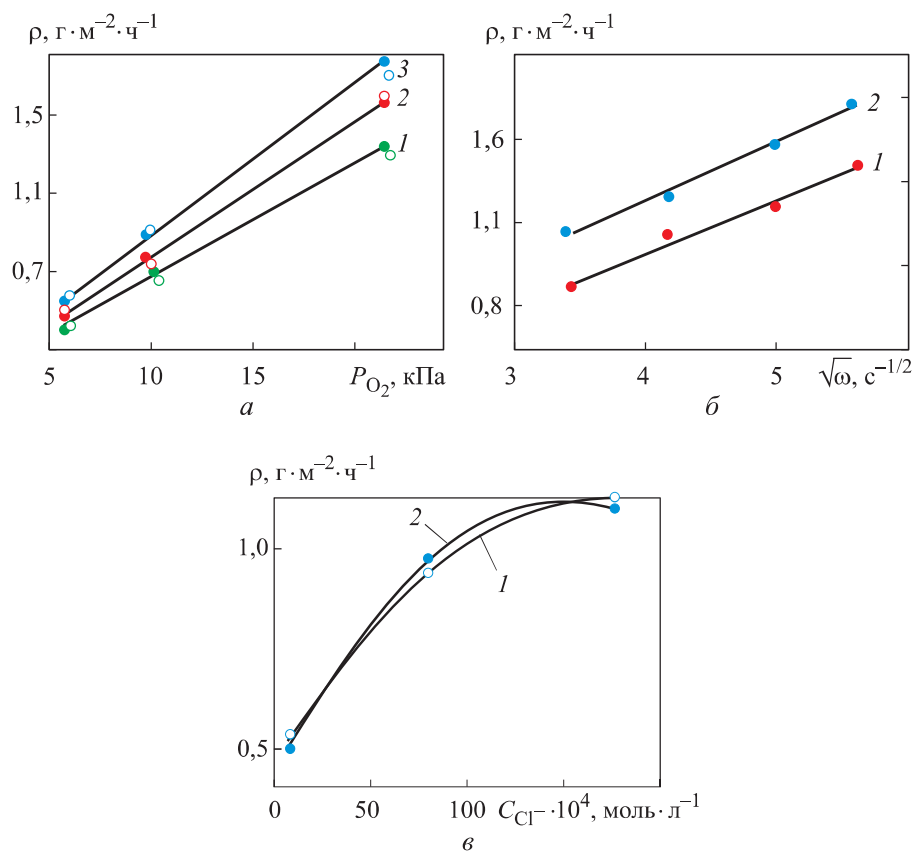


Рис. 2. Экспериментальные данные по влиянию параметров на массовый показатель коррозии углеродистой стали:

a — зависимость скорости коррозии ρ стали 20 в пульпе железорудного концентрата от парциального давления кислорода P_{O_2} при рН (○ — 6,8; ● — 8,2) и $\omega = 18,33$ (1), 24,5 (2) и 31,3 с^{-1} (3); *б* — зависимость $\rho(\sqrt{\omega})$ в фоновом растворе (1) и железоксидной пульпе (2) при рН = 7,3 ± 0,2 и $P_{\text{O}_2} = 21,28$ кПа; *в* — зависимость скорости коррозии ρ стали 20 в фоновом растворе (1) и железоксидной пульпе (2) от концентрации хлорид-ионов C_{Cl^-} при рН = 7,2 ± 0,2 ($\omega = 18,33$ с^{-1} ; $P_{\text{O}_2} = 21,28$ кПа)

Результаты анализа зависимостей (см. рис. 3) позволяют получить эмпирическое выражение скорости коррозии от изученных факторов, которое можно представить в виде приближенного уравнения:

$$\lg \rho = -0,59 + \lg P_{\text{O}_2} + 0,5 \lg \omega + 0,4 \lg C_{\text{Cl}^-},$$

где интервалы изменения параметров следующие: $P_{\text{O}_2} = 0,01 \dots 0,21$ атм; $\omega = 500 \dots 2000$ с^{-1} ; $C_{\text{Cl}^-} = 0,05 \dots 1,00$ $\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$.

При изучении влияния рН и P_{O_2} на коррозию стали в щелочной пульпе железорудного концентрата (рН = 10,0–12,5) получены эксперимен-

тальные данные, которые после соответствующей математической обработки представлены на рис. 4. Из полученных результатов следует, что повышение pH приводит к значительному снижению скорости коррозии. Парциальное давление кислорода влияет на ход $\lg \rho$ –pH-зависимостей. С повышением pH кислород на коррозию влияет в меньшей степени. Так, $(\partial \lg \rho / \partial \lg P_{O_2})_{pH=10} \approx 0,7$, а $(\partial \lg \rho / \partial \lg P_{O_2})_{pH=12,5} \approx 0,2$.

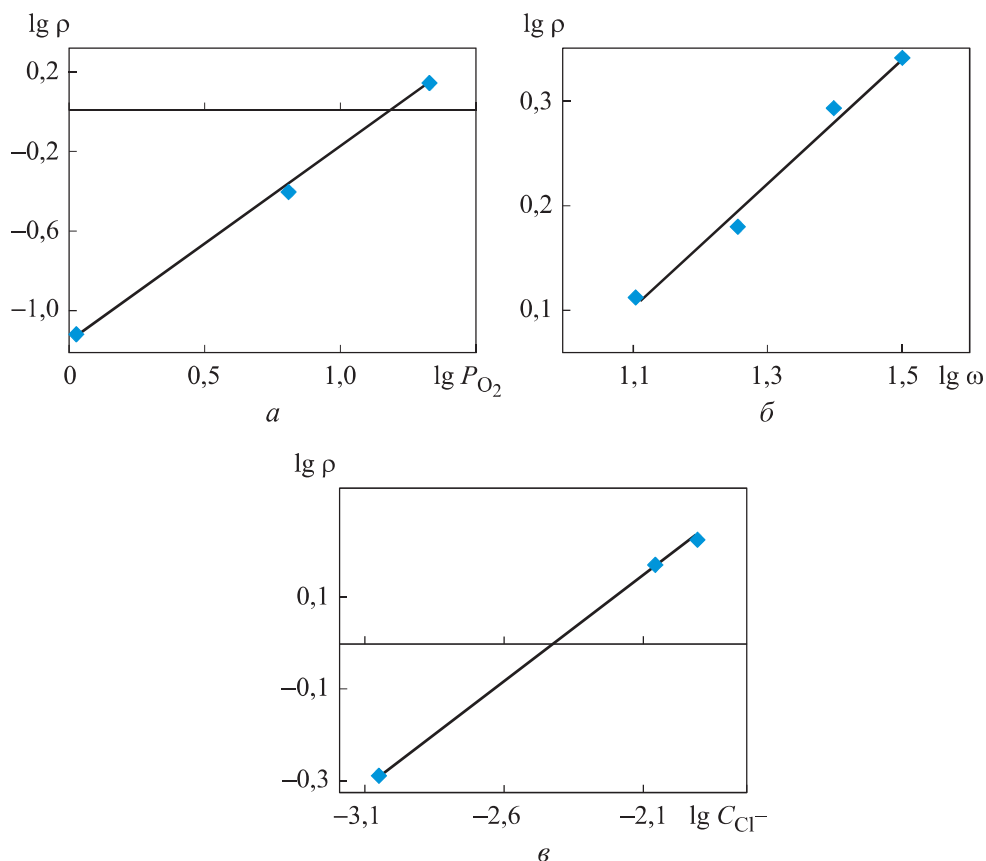


Рис. 3. Графическое определение параметров коррозионного процесса для интервала pH = 6,0–9,0 по кислороду (а), скорости потока пульпы (б) и хлорид-ионам (в)

Следовательно, порядок скорости коррозии по кислороду зависит от концентрации OH^- -ионов, а порядок по ионам H^+ зависит от содержания растворенного кислорода [15]. Зависимость порядка скорости коррозии по pH и кислороду приведена на рис. 5. Результаты анализа этих данных показывают, что коррозионный процесс в щелочной пульпе железорудного концентрата можно охарактеризовать частными производными:

$$\begin{aligned} \partial \lg \rho / \partial \lg P_{O_2} &= 2,7 - 0,2 \text{ pH}; \\ \partial \lg \rho / \partial \lg \text{pH} &= -0,2(2,2 + \lg P_{O_2}); \\ \partial \lg \rho / \partial \lg \omega &= 0; \\ \partial \lg \rho / \partial \lg C_{Cl^-} &= 0. \end{aligned}$$

В этом случае эмпирическая зависимость скорости коррозии от рассмотренных факторов может быть выражена приближенным уравнением:

$$\lg \rho = 5,01 - 0,50 \text{ pH} + 2,70 \lg P_{O_2} - 0,20 \text{ pH} \lg P_{O_2}, \quad (7)$$

где интервалы изменения $P_{O_2} = 0,01 \dots 0,21$ атм; $\text{pH} = 10,0 - 12,5$.

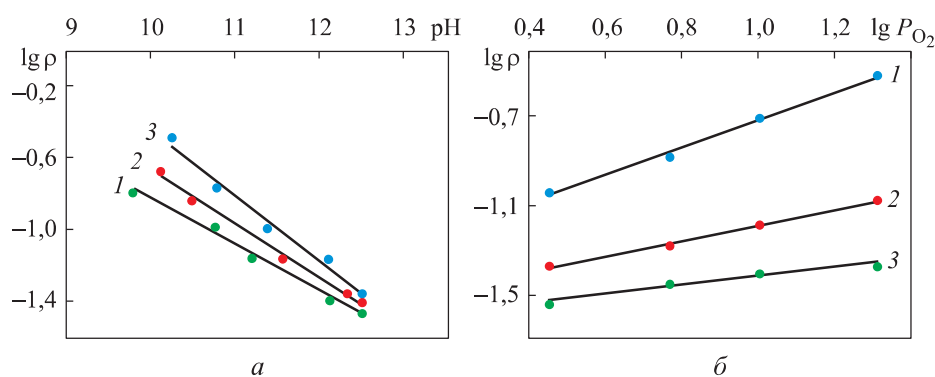


Рис. 4. Математически обработанные экспериментальные данные:

a — зависимость $\lg \rho(\text{pH})$ стали 20 в железорудной пульпе при значениях парциального давления кислорода 6,08 (1), 11,10 (2) и 21,28 кПа (3); *б* — зависимость $\lg \rho(P_{O_2})$ при значениях $\text{pH} = 10,02 \pm 0,2$ (1), $11,7 \pm 0,02$ (2) и 12,5 (3) железоксидной пульпы

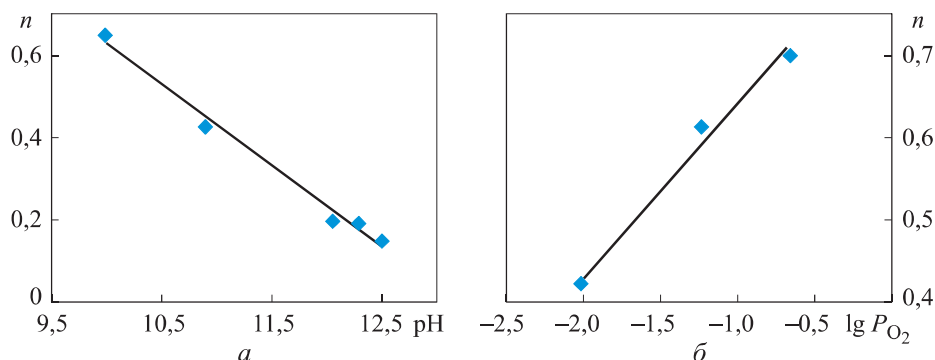


Рис. 5. Зависимость порядка скорости коррозии стали 20 в железоксидной пульпе при $n_{O_2} = f(\text{pH})$ (*a*) и $n_{\text{pH}} = f(P_{O_2})$ (*б*)

Согласно результатам анализа уравнения (7), для снижения коррозии в пульпе необходимо повышать pH до 12,0–12,5. При этом присутствие в системе кислорода практически не влияет на значение pH. Если удалить

растворенный кислород до значений $\approx 0,4 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$, то рН может принимать любые значения от 10,0 до 12,5, и это не будет в большой степени влиять на коррозионные потери стали.

Заключение. Изучение влияния внешних факторов на коррозионные потери стали 20 в пульпе железорудного концентрата позволило получить математические модели зависимости массового показателя коррозии от изученных факторов.

Для интервала рН = 6,0–9,0 имеем

$$\lg \rho = -0,59 + \lg P_{\text{O}_2} + 0,50 \lg \omega + 0,40 \lg C_{\text{Cl}^-}.$$

Для области рН = 10,0–12,5 уравнение можно записать в виде

$$\lg \rho = 5,01 - 0,50 \text{ рН} + 2,70 \lg P_{\text{O}_2} - 0,20 \text{ рН} \lg P_{\text{O}_2}.$$

Для создания условий, способствующих защите углеродистой стали от коррозии в железооксидной пульпе, необходимо учитывать рН и концентрацию O_2 .

Для снижения уровня коррозионных потерь можно проводить не только защелачивание пульпы, но и удалять растворенный кислород, используя для этого восстановители.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Докукин В.П. Формирование системы трубопроводного гидротранспорта горных предприятий на основе метода динамической оптимизации ее параметров. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., СПГИ(ТУ), 2005.
- [2] Докукин В.П. Повышение эффективности эксплуатации систем трубопроводного гидротранспорта. СПб., СПГИ(ТУ), 2005.
- [3] Александров В.И., Тимухин С.А., Махараткин П.Н. Энергетическая эффективность гидравлического транспорта хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОКе. *Записки Горного института*, 2017, т. 225, с. 330–337. DOI: <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.3.330>
- [4] Александров В.И. Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании смесей высокой концентрации. СПб., СПГИ(ТУ), 2000.
- [5] Симоненко А.П., Артемова И.А. Перспективы применения эффекта Томаса для повышения эффективности работы гидравлических систем гидротранспорта сыпучих материалов, канализации и отведения сточных вод. *Вестник ДонНУ. Сер. Г: Технические науки*, 2018, № 4, с. 94–111.
- [6] Ходаков Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование. *Российский химический журнал*, 2003, т. 47, № 2, с. 33–44.

- [7] Савицкий Д.П., Макарова К.В., Макаров А.С. Реологические свойства высококонцентрированных суспензий угля разной степени метаморфизма в присутствии триполифосфата натрия. *Украинский химический журнал*, 2011, т. 77, № 4, с. 79–83.
- [8] Воробьев А.С. Повышение эффективности гидротранспорта полидисперсных смесей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2015, № 1, с. 377–380.
- [9] Агапкин В.М. Трубопроводный транспорт в странах мира. М., ВИНТИ, 1982.
- [10] Розенфельд И.Л., Лазарев Г.Е., Харламова Т.Л. О роли коррозионного фактора в условиях абразивного изнашивания сталей и сплавов в коррозионно-активных средах. *Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Гидротранспорт-81»*. М., 1981, с. 164.
- [11] Лебедев А.Н., Щербаков О.К., Балашов Г.В. Коррозионно-эрозионный износ стали в условиях работы рудоразмольного оборудования. *Защита металлов*, 1980, т. 16, №3, с. 327.
- [12] Киянский А.Ф., Мельников В.И., Разливаев В.Н. Исследование коррозионного износа пульпопроводов. *Матер. Всесоюз. науч. конф.* Тбилиси, Мецниербера, 1981, с. 117.
- [13] Erlings J.G., Gee A.W.J.De., Mens J.W.M. Corrosie en erosie door kolenslurries. *Ingenieur*, 1984, vol. 96, no. 10, pp. 12–17.
- [14] Шелонцев В.А., Герасимова И.В., Гилязова И.Б. Экспериментальное обоснование применения метода поляризационного сопротивления для оценки скорости коррозии стали в железоксидной пульпе. *Познание и деятельность: от прошлого к настоящему. Матер. I Всерос. междисциплин. науч. конф.* Омск, ОмГПУ, 2019, с. 382–386.
- [15] Шелонцев В.А., Горичев И.Г., Кузин А.В. и др. Влияние технических лигносульфанатов на коррозию сварных швов в водоугольной суспензии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 5 (86), с. 89–98.
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2019-5-89-98>

Шелонцев Владимир Александрович — канд. хим. наук, доцент, заведующий отделом магистратуры ОмГА (Российская Федерация, 644105, Омск, 4-я Челюскинцев ул., д. 2А).

Горичев Игорь Георгиевич — д-р хим. наук, профессор кафедры общей химии МПГУ (Российская Федерация, 119991, Москва, Малая Пироговская ул., д. 1, стр. 1).

Кузин Александр Васильевич — ассистент, ведущий инженер кафедры общей химии МПГУ (Российская Федерация, 119991, Москва, Малая Пироговская ул., д. 1, стр. 1).

Герасимова Ирина Владимировна — канд. пед. наук, доцент кафедры химии и методики преподавания химии ОмГПУ (Российская Федерация, 644099, Омск, набережная им. Тухачевского, д. 14).

Елисеева Елена Анатольевна — канд. хим. наук, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шелонцев В.А., Горичев И.Г., Кузин А.В. и др. Закономерности коррозии стали в нейтральной и щелочной железоксидных пульпах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2021, № 5 (98), с. 142–155.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-5-142-155>

STEEL CORROSION PATTERNS IN NEUTRAL AND ALKALINE IRON OXIDE SLURRY

V.A. Shelontsev¹

89139617129@list.ru

I.G. Gorichev²

gorichevig@gmail.com

A.V. Kuzin²

av.kuzin@mpgu.su

I.V. Gerasimova³

i_gerassimova@mail.ru

E.A. Eliseeva⁴

yakusheva@bmstu.ru

¹ **Omsk Humanitarian Academy, Omsk, Russian Federation**

² **Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russian Federation**

³ **Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russian Federation**

⁴ **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

Abstract

The study identifies and theoretically substantiates the steel corrosion patterns in aqueous slurry of iron-ore concentrate. The purpose of the study was to examine the effect that the content of dissolved oxygen (P_{O_2}), pH, the concentration of chloride ions (C_{Cl^-}) and the rate of movement of the iron oxide slurry (ω) produce on the corrosion losses of steel 20. Comparative analysis of the corrosion rate values obtained by the gravimetric method and the polarization resistance method showed that the reciprocal of the polarization resistance and the corrosion rate change symbatically with increasing pH, the corrosion rate values are quantitatively well consistent with each other. To identify the corrosion patterns, the method of polarization resistance was used. The dependence of the corrosion rate (ρ) on pH revealed two characteristic areas: in the first one, there is no dependence of the rate on pH (6.5–9.0); in the second one, there is a sharp decrease in corrosion losses

Keywords

Corrosion, iron oxide slurry, polarization resistance, corrosion protection

when the pH goes from 9.0 to 12.5. For pH = 6.5–9.0, the corrosion rate increases linearly with an increase in the partial pressure of oxygen, and corrosion losses in the slurry are higher than in the background solution. The dependence $\rho(\sqrt{\omega})$ is linear over the entire pH range (6.0–9.0), which indicates the diffusion control of the corrosion process. Findings of research show that in order to protect carbon steel from corrosion in the iron oxide slurry, it is necessary to take into account the pH and O₂ concentration. Optimal reduction of corrosion losses can be achieved by alkalizing the slurry and removing dissolved oxygen

Received 15.06.2021

Accepted 09.08.2021

© Author(s), 2021

REFERENCES

- [1] Dokukin V.P. Formirovanie sistemy truboprovodnogo gidrotransporta gornykh predpriyatiy na osnove metoda dinamicheskoy optimizatsii ee parametrov. Avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk. [Formation of pipeline hydraulic transport system for mining enterprises based on the method of parameters dynamic optimization. Abs. Dr. Eng. Sc. Diss.]. St. Petersburg, SPGGI(TU) Publ., 2005 (in Russ.).
- [2] Dokukin V.P. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii sistem truboprovodnogo gidrotransporta [Improving efficiency of pipeline hydraulic transport systems]. St. Petersburg, SPGGI(TU) Publ., 2005.
- [3] Aleksandrov V.I., Timukhin S.A., Makharatkin P.N. Energy efficiency of hydraulic transportation of iron ore processing tailings at Kachkanarsky MPP. *Journal of Mining Institute*, 2017, vol. 225, pp. 330–337 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.3.330>
- [4] Aleksandrov V.I. Metody snizheniya energozatrat pri gidravlicheskom transportirovaniy smesey vysokoy kontsentratsii [Methods for energy consumption reduction during hydraulic transportation of high concentration mixtures]. St. Petersburg, SPGGI(TU) Publ., 2000.
- [5] Simonenko A.P., Artemova I.A. Prospects of the application of the Toms effect to improve effectiveness of hydraulic systems of hydro transportation of bulk materials, sewage and disposal of wastewater. *Vestnik DonNU. Ser. G: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences], 2018, no. 4, pp. 94–111 (in Russ.).
- [6] Khodakov G.S. Reology of suspensions. Phase flow theory of and its experimental justification. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2003, vol. 47, no. 2, pp. 33–44 (in Russ.).
- [7] Savitskiy D.P., Makarova K.V., Makarov A.S. Rheological properties of highly concentrated coal suspensions of varying degrees of metamorphism in the presence of sodium tripolyphosphate. *Ukrainskiy khimicheskiy zhurnal* [Ukrainian Chemical Journal], 2011, vol. 77, no. 4, pp. 79–83 (in Russ.).

- [8] Vorob'yev A.S. Improving efficiency hydrotransport polydisperse mixtures. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2015, no. 1, pp. 377–380 (in Russ.).
- [9] Agapkin V.M. *Truboprovodnyy transport v stranakh mira* [Pipeline transport in countries of the world]. Moscow, VINITI Publ., 1982.
- [10] Rozenfel'd I.L., Lazarev G.E., Kharlamova T.L. [On the role of corrosion factor in conditions of steels and alloys abrasive wear in corrosive-active media]. *Tez. dokl. Vsesoyuz. nauch.-tekh. konf. "Gidrotransport-81"* [Abs. USSR Sc.-Tech. Conf. "Gidrotransport-81"]. Moscow, 1981, p. 164 (in Russ.).
- [11] Lebedev A.N., Shcherbakov O.K., Balashov G.V. Corrosion and erosion wear of steel under operating conditions of ore-mill equipment. *Zashchita metallov*, 1980, vol. 16, no. 3, p. 327 (in Russ.).
- [12] Kiyanskiy A.F., Mel'nikov V.I., Razlivaev V.N. [Study on corrosion wear of pulp pipes]. *Mater. Vsesoyuz. nauch. konf.* [Proc. USSR Sc. Conf.]. Tbilisi, Metsnierbera Publ., 1981, p. 117 (in Russ.).
- [13] Erlings J.G., Gee A.W.J.De., Mens J.W.M. Corrosie en erosie door kolenslurries. *Ingenieur*, 1984, vol. 96, no. 10, pp. 12–17.
- [14] Shelontsev V.A., Gerasimova I.V., Gilyazova I.B. [Experimental justification for the use of a polarization resistance method to assess the corrosion rate of steel in iron oxide pulp]. *Poznanie i deyatelnost': ot proshlogo k nastoyashchemu. Mater. I Vseros. mezhdistsiplin. nauch. konf.* [Knowledge and Activity: from the Past to the Present. Proc. 1st Russ. Interdisciplinary Sc. Conf.]. Omsk, OSPU Publ., 2019, pp. 382–386 (in Russ.).
- [15] Shelontsev V.A., Gorichev I.G., Kuzin A.V., et al. Technical lignosulfonates effect on weld corrosion in a coal-water slurry. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 5 (86), pp. 89–98 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2019-5-89-98>

Shelontsev V.A. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Head of the Department of Magistracy, Omsk Humanitarian Academy (4-ya Chelyuskintsev ul. 2A, Omsk, 644105 Russian Federation).

Gorichev I.G. — Dr. Sc. (Chem.), Professor, Department of General Chemistry, Institute of Biology and Chemistry, Moscow Pedagogical State University (Malaya Pirogovskaya ul. 1, str. 1, Moscow, 119991 Russian Federation).

Kuzin A.V. — Assistant, Leading Engineer, Department of General Chemistry, Institute of Biology and Chemistry, Moscow Pedagogical State University (Malaya Pirogovskaya ul. 1, str. 1, Moscow, 119991 Russian Federation).

Gerasimova I.V. — Cand. Sc. (Ped.), Assoc. Professor, Department of Chemistry and Methods of Teaching Chemistry, Omsk State Pedagogical University (Naberezhnaya im. Tukhachevskogo 14, Omsk, 644099 Russian Federation).

Eliseeva E.A. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Shelontsev V.A., Gorichev I.G., Kuzin A.V., et al. Steel corrosion patterns in neutral and alkaline iron oxide slurry. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, no. 5 (98), pp. 142–155 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-5-142-155>