

ИЗВЛЕЧЕНИЕ СОЛЯНОЙ КИСЛОТЫ ИЗ ОТРАБОТАННОГО ТРАВильНОГО РАСТВОРА МЕТОДОМ ЭКСТРАКТИВНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ

М.В. Кротова, А.А. Поворов, А.Г. Липин, А.А. Липин

Кротова Мария Витальевна, Поворов Александр Александрович
ООО «Баромембранная технология»,
г. Владимир, Россия. 600033, Владимирская область, г. Владимир, ул. Элеваторная, 6
E-mail: sec02@vladbmt.ru, vladimir@vladbmt.ru
Липин Александр Геннадьевич, Липин Андрей Александрович*
Ивановский государственный химико-технологический университет,
г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7
E-mail: 157lipin@mail.ru, lipin.a@mail.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса дистилляции отработанного солянокислого травильного раствора. Процесс осуществлялся на лабораторной установке. Отработанный травильный раствор (ОТР), содержит кроме непрореагировавшей соляной кислоты хлористое железо. Перед дистилляцией в ОТР вводилась серная кислота. В результате образуется сульфат железа и высвобождается соляная кислота. Средняя концентрация соляной кислоты, полученной при дистилляции исходного ОТР составила 18,9 %. При введении серной кислоты концентрация увеличилась до 29,2 %. Показано влияние технологических параметров на процесс дистилляции ОТР. При увеличении избытка серной кислоты по сравнению со стехиометрическим количеством средняя концентрация HCl в дистилляте возрастает. Увеличивается также и степень выделения соляной кислоты из ОТР. Снижение давления в системе приводит к смещению равновесной линии на диаграмме составов вправо, аналогично системе HCl - H₂O.

Ключевые слова: соляная кислота, травильный раствор, серная кислота, регенерация, дистилляция

REGENERATION HYDROCHLORIC ACID OF SPENT PICKLING SOLUTION BY EXTRACTIVE DISTILLATION

M.V. Krotova, A.A. Povorov, A.G. Lipin, A.A. Lipin

Mariya V. Krotova, Aleksandr A. Povorov
LLC "Baromembrane technology",
Vladimir, Russia. 600033, Vladimir region, Vladimir, Elevatoraya str., 6
E-mail: sec02@vladbmt.ru, vladimir@vladbmt.ru
Aleksandr G. Lipin, Andrey A. Lipin*
Ivanovo State University of Chemistry and Technology,
Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7
E-mail: 157lipin@mail.ru, lipin.a@mail.ru*

The results of experimental studies of the distillation process of spent hydrochloric acid pickling solution are presented. The process was carried out on a laboratory installation. The spent pickling solution (SPS) contains, in addition to unreacted hydrochloric acid, iron chloride. Sulfuric acid was added into the SPS before distillation. As a result, iron sulfate is produced and hydrochloric acid is released. The average concentration of hydrochloric acid obtained by distilla-

tion of the initial SPS was 18.9%. When the sulfuric acid was added, the concentration increased to 29.2%. The influence of technological parameters on the distillation process of SPS is shown. As the excess of sulfuric acid increases compared to the stoichiometric amount, the average HCl concentration in the distillate increases. The degree of hydrochloric acid release from the SPS also increases. A decrease in pressure in the system leads to a shift of the equilibrium line on the phase diagram to the right, similar to the HCl - H₂O system.

Keywords: hydrochloric acid, pickling solution, sulfuric acid, regeneration, distillation

Для цитирования:

Кротова М.В., Поворов А.А., Липин А.Г., Липин А.А. Извлечение соляной кислоты из отработанного травильного раствора методом экстрактивной дистилляции. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*. 2026. № 2. С. 100-105. DOI: 10.6060/snt.20268602.11

For citation:

Krotova M.V., Povorov A.A., Lipin A.G., Lipin A.A. Extraction of hydrochloric acid from a spent pickling solution using the method of extractive distillation. *Modern high technology. Regional application*. 2026. N 2. P. 100-105. DOI: 10.6060/snt.20268602.11

ВВЕДЕНИЕ

Травление металлов – это технологический процесс управляемого удаления поверхностного слоя металлических изделий с помощью химических реагентов. Метод применяется для очистки поверхности от окалины, ржавчины, оксидных пленок, а также для создания декоративных узоров и подготовки деталей к дальнейшей обработке. Процесс широко используется в металлургии, машиностроении, электронной промышленности и художественной обработке металлов. При травлении происходит растворение металла и образование солей, которые переходят в раствор. Известно, что при травлении не удается полностью использовать активные компоненты травильного раствора. Снизить эксплуатационные расходы путем многократного использования реагентов позволяет регенерация отработанных травильных растворов (ОТР) [1-4]. С этой целью используется электролиз [5, 6], диффузионный диализ [7], ионный обмен [8, 16], мембранные технологии [9].

При солянокислом травлении углеродистых сталей происходит накопление отработанного травильного раствора, содержащего хлорид железа FeCl₂ и непрореагировавшую соляную кислоту HCl [1, 10]. Существует несколько способов регенерации соляной кислоты. Это пиролиз, кристаллизация, дистилляция, гидролитическое осаждение, экстракция растворителем, мембранные процессы [10-12].

В работе [13] была рассмотрена технологическая система, позволяющая вернуть соляную кислоту в технологический цикл и получить товарный сульфат двухвалентного железа, удовлетворяющий требованиям ГОСТ. Соляную

кислоту извлекают путем дистилляции. Из кубового остатка выделяют сульфат железа путем кристаллизации.

Хлористый водород с водой образует азеотропную смесь, состав которой зависит от температуры кипения и давления. Азеотропная смесь, кипящая при 110°C под давлением 10⁵Па содержит 20,24% HCl [14]. Эффективным методом разделения азеотропных смесей является экстрактивная дистилляция [15], характерной особенностью которой является введение разделяющего агента, неодинаково влияющего на летучесть компонентов смеси. Система HCl-H₂O хорошо изучена. Однако в отработанном травильном растворе в воде кроме хлористого водорода растворены еще соли железа, поэтому его дистилляция имеет свои особенности.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование процесса дистилляции ОТР проводилось на лабораторной установке, которая включала в себя: колбонагреватель, куб-испаритель, термометры для определения температуры кипящего раствора и паров соляной кислоты, холодильник для конденсации и охлаждения паров кислоты, емкость для приема дистиллята. В качестве куба-испарителя использовалась двугорлая стеклянная колба. С целью проведения процесса дистилляции под вакуумом емкость для приема дистиллята подключалась к вакуум-насосу, клапаном регулировалось разрежение в системе.

В процессе дистилляции происходит испарение HCl, пары которой вместе с парами воды поступают в конденсатор-холодильник. При проведении процесса концентрация соляной кислоты в дистилляте изменяется вследствие изменения

содержания кислоты в перегоняемом растворе. Дистиллят отбирался фракционно с целью определения закономерностей изменения концентрации соляной кислоты в дистилляте.

В процессе дистилляции замерялись объем и масса конденсата паров соляной кислоты (для определения доли отгона), а также количество раствора, оставшегося в испарителе после окончания процесса. Каждая фракция дистиллята анализировалась на содержание соляной кислоты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На графике (рис.1) представлены зависимости массовой концентрации соляной кислоты в дистилляте x_D от доли отгона D . Под долей отгона понимается отношение объема дистиллята к объему исходного ОТР.

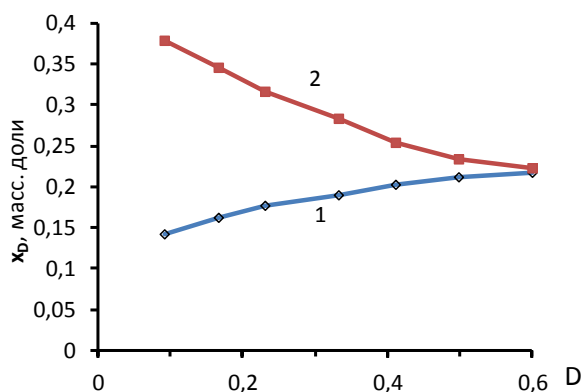


Рис. 1. Зависимость концентрации дистиллята от доли отгона: 1 – без введения H_2SO_4 , 2 – с введением H_2SO_4

Fig. 1. Dependence of the distillate concentration on the distillation fraction: 1 – without the adding of H_2SO_4 , 2 – with the adding of H_2SO_4

Дистилляции подвергался ОТР с содержанием ионов Fe^{2+} 100 г/л и ионов Cl^- 312 г/л. Концентрация свободной HCl составляла 20,3%. Характер изменения концентрации HCl в дистилляте в ходе процесса зависит от начальной концентрации свободной HCl в исходном растворе. В случае дистилляции исходного ОТР (кривая 1 на рис.1) концентрация HCl в дистилляте в начале процесса составила 14,2 %, а при доле отгона $S=0,6$ увеличилась до 21,8 %. Степень выделения HCl составила 58% от количества свободной кислоты в ОТР и 44% от суммарного количества свободной и связанной кислоты в ОТР.

Кривая 2 на рис.1 характеризует изменение концентрации HCl в дистилляте при предварительном введении в ОТР серной кислоты с избытком 5% относительно стехиометрического количества. При этом протекает реакция образования сульфата железа и соляной кислоты



Концентрация свободной кислоты в растворе и парциальное давление паров HCl увеличивается, и как следствие возрастает концентрация HCl в дистилляте в начале процесса до 37,9%. В дальнейшем концентрация кислоты в дистилляте уменьшается и при доле отгона $D=0,6$ составила 22,3%. Средняя концентрация кислоты, полученной при дистилляции исходного ОТР составила 18,9%. Средняя концентрация дистиллята при введении серной кислоты увеличилась до 29,2%. Степень выделения HCl составила 68,6%.

Анализ процесса дистилляции удобно проводить, используя изображение процесса на диаграмме составов. Поскольку при проведении опытов осуществлялась полная конденсация выходящих из куба паров, состав паровой фазы равен составу фракций дистиллята ($y=x_D$). Средняя за время отбора каждой фракции концентрация HCl в испарительной колбе рассчитывалась на основе уравнений материального баланса процесса разделения. Исходными данными для расчета являются масса исходного раствора m_F и концентрация в нем соляной кислоты $x_{k,0}$, массы фракций дистиллята $m_{D,i}$, концентрация HCl в i -ой фракции дистиллята $x_{D,i}$.

Масса соляной кислоты в i -ой фракции дистиллята

$$m_{k,i} = m_{D,i} \cdot x_{D,i}, \quad (2)$$

Масса кубового остатка после отбора i -ой фракции дистиллята

$$m_{w,i} = m_{w,i-1} - m_{D,i}, \quad (3)$$

где $m_{w,0} = m_F$, $i=1,2,\dots,N$, N – число фракций дистиллята.

Концентрация HCl в кубовом остатке после отбора i -ой фракции дистиллята

$$x_{k,i} = \left(m_F \cdot x_{k,0} - \sum_{j=1}^i m_{k,j} \right) / m_{w,i}, \quad (4)$$

Средняя концентрация HCl в кубовом остатке во время отбора i -ой фракции дистиллята

$$x_{kcp,i} = 0,5(x_{k,i-1} + x_{k,i}). \quad (5)$$

Средняя концентрация HCl в дистилляте

$$x_{Dcp} = \sum_{i=1}^N m_{k,i} / \sum_{i=1}^N m_{D,i}. \quad (6)$$

Степень извлечения соляной кислоты из ОТР

$$\phi = \sum_{i=1}^N m_{k,i} / (m_F \cdot x_{k,0}). \quad (3)$$

Таким образом, получены координаты точек, принадлежащих линии, характеризующей ход процесса дистилляции на диаграмме составов

(рис. 2). Кроме того, на диаграмму нанесены линия равных составов ($y=x$) и равновесная линия для системы $\text{HCl-H}_2\text{O}$ по данным [14].

При дистилляции исходного ОТП рабочая линия процесса (линия 2 на рис. 2) расположена ниже линии равных составов паровой и жидкой фаз. Концентрация HCl в парах меньше, чем в жидкой фазе. Вследствие этого уменьшается содержание воды в растворе и увеличивается концентрация HCl . Это приводит к увеличению концентрации HCl в паровой фазе, а значит и в получаемом дистилляте. При достижении рабочей линией линии равных концентраций рост концентрации HCl в дистилляте прекращается (верхняя точка линии 2).

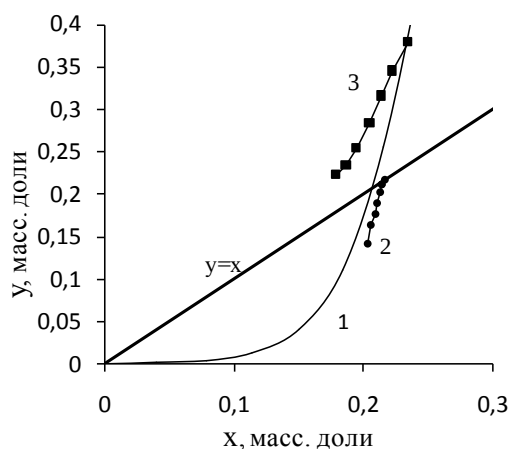


Рис. 2. Диаграмма составов при давлении в системе $P=0,5$ атм: 1 – равновесная линия для системы $\text{HCl-H}_2\text{O}$, 2 – процесс без введения H_2SO_4 , 3 – процесс с введением H_2SO_4
Fig. 2. Diagram of compositions at system pressure $P=0.5$ atm: 1 - is the equilibrium line for the $\text{HCl-H}_2\text{O}$ system, 2 - is the process without the adding of H_2SO_4 , 3 - is the process with the adding of H_2SO_4

При введении в ОТП перед дистилляцией серной кислоты с избытком 5% относительно стехиометрического количества в реакции (1) рабочая линия процесса лежит выше линии равных составов $y=x$. В начале процесса достигается максимальная концентрация HCl в парах и в дистилляте. Концентрация HCl в парах выше, чем в жидкой фазе. Это приводит к уменьшению концентрации соляной кислоты в жидкой фазе и в получаемом дистилляте. При доле отгона $D=0.6$ содержание HCl в кубовой жидкости составило 17,9% а в дистилляте 22,3%. Этот процесс отображает линия 3 (рис. 2).

Графики (рис. 3) характеризуют взаимосвязь составов паровой и жидкой фаз при различных количествах серной кислоты, вводимой в ОТП перед дистилляцией.

Давление в системе $P=0,5$ атм для всех трех опытов. Анализ графиков показывает, что с увеличением количества введенной серной кисло-

ты концентрация соляной кислоты в парах возрастает при одинаковом содержании HCl в растворе. Это объясняется тем, что избыток серной кислоты относительно ее стехиометрического количества в реакции (1) играет роль экстрагирующего агента, понижающего парциальное давление паров воды над раствором. При этом относительная летучесть HCl возрастает.

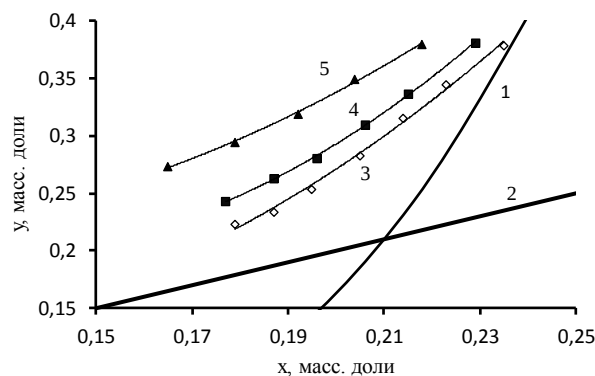


Рис. 3. Изменение составов фаз при введении H_2SO_4 в ОТП: 1 - равновесная линия для системы $\text{HCl-H}_2\text{O}$; 2 – линия равных концентраций; количество серной кислоты, кг $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{кг}$ ОТП: 3 – 0,153; 4 – 0,16; 5 – 0,219

Fig. 3. Changes in phase compositions with the adding of H_2SO_4 into the SPS: 1 - is the equilibrium line for the $\text{HCl-H}_2\text{O}$ system; 2 - is the line of equal concentrations; the amount of sulfuric acid, kg $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{kg}$ SPS: 3 – 0,153; 4 – 0,16; 5 – 0,219

При снижении давления в системе до $P=0,3$ атм характер зависимостей концентрации HCl в паровой фазе от ее концентрации в жидкой фазе не изменяется (рис. 4). Положительным моментом является уменьшение температуры кипения ОТП с $86,4^\circ\text{C}$ при $P=0,5$ атм до $74,1^\circ\text{C}$ при $P=0,3$ атм.

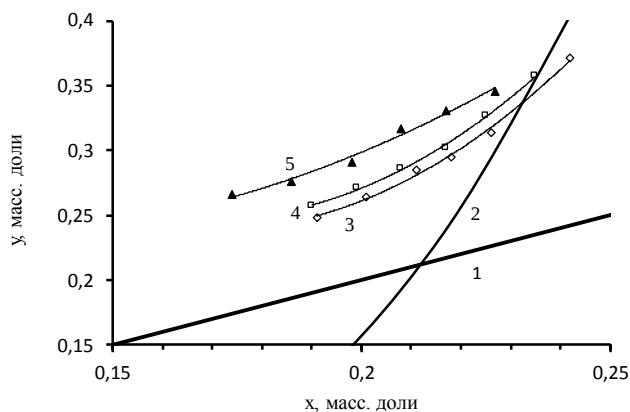


Рис. 4. Диаграмма составов при давлении в системе $P=0,3$ атм 1 - линия равных концентраций; 2 – равновесная линия для системы $\text{HCl-H}_2\text{O}$; количество серной кислоты, кг $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{кг}$ ОТП: 3 – 0,153; 4 – 0,16; 5 – 0,219

Fig. 4. Diagram of compositions at system pressure $P=0.3$ atm: 1 - is the line of equal concentrations; 2 - is the equilibrium line for the $\text{HCl-H}_2\text{O}$ system; the amount of sulfuric acid, kg $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{kg}$ SPS: 3 – 0,153; 4 – 0,16; 5 – 0,219

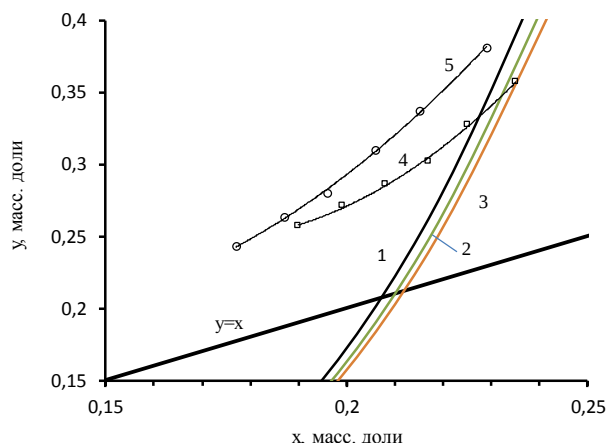


Рис. 5. Диаграмма составов при различных давлениях в системе. 1, 2, 3 – система HCl – H₂O; 4, 5 – система HCl – ОТП; давление в системе, кПа: 1 – 100; 2, 5 – 50; 3, 4 – 30
Fig. 5. Diagram of compositions at different pressures in the system. 1, 2, 3 – HCl – H₂O system; 4, 5 – HCl – SPS system; pressure in the system, kPa: 1 – 100; 2, 5 – 50; 3, 4 – 30

На рис. 5 приведены линии, характеризующие взаимосвязь составов паровой и жидкой фаз при различных значениях давления в системе. Для системы HCl – H₂O с уменьшением давления равновесная линия смещается вправо (линии 1, 2, 3). Аналогично ведет себя система HCl – ОТП (линии 5, 4). Экспериментальные точки соответствуют опытам, в которых в ОТП предварительно вводилась серная кислота в количестве 0,16 кг H₂SO₄/кг ОТП.

Данные табл. 1 характеризуют влияние количества введенной в ОТП перед дистилляцией серной кислоты на степень извлечения и концентрацию регенерированной соляной кислоты. В строке «Избыток H₂SO₄» указан избыток серной кислоты в процентах от ее стехиометрического количества в реакции (1) взаимодействия с хлоридом железа. Доля отгона во всех опытах составляла D=0,6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов В.И. Травильно-регенерационные комплексы. М.: Теплотехник, 2006. 237 с.
2. Быковский Н.А., Пучкова Л.Н., Фанакова Н.Н. Регенерация травильного раствора, используемого в производстве печатных плат. *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2023. № 6(146). С. 137-145.
3. Тураев Д.Ю. Новый метод регенерации солянокислых медно-хлоридных растворов травления меди. *Успехи в химии и химической технологии*. 2020. № 4. С. 150-152.
4. Быковский Н.А., Кантор Е.А., Шулаев Н.С., Фанак В.С. Комбинированный метод переработки отработанного кислого травильного раствора производства изделий из титана. *Записки Горного института*. 2025. Т. 272. № 16446. С. 51-58.
5. Дорофеев Ю.Г., Корчагина М.В., Наumenко А.А., Радикайнен Л.М. Утилизация отходов травления металлургической окалины электролизом. *Известия*

Таблица 1

Параметры процесса извлечения соляной кислоты
Table 1. Parameters of the hydrochloric acid extraction process

Количество кислоты, кг H ₂ SO ₄ /кг ОТП	0	0,153	0,16	0,219
Избыток H ₂ SO ₄ , %	-	5	10	50
Степень извлечения HCl, %	44	68,6	71,7	76,1
Средняя концентрация HCl в дистилляте, %	18,9	29,2	30	30,7

Анализ данных табл. 1 показывает, что с увеличением количества введенной в ОТП серной кислоты степень извлечения и концентрация регенерированной соляной кислоты возрастают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследован процесс экстрактивной дистилляции отработанного солянокислого травильного раствора. Установлено что, при регенерации соляной кислоты путем дистилляции в отработанный травильный раствор целесообразно вводить серную кислоту. Это повышает концентрацию регенерированной соляной кислоты с 18,9 % до 29,2 % при избытке серной кислоты 5% и до 30,7% при избытке H₂SO₄ 50%. Степень извлечения соляной кислоты увеличивается с 44 до 68,6% при избытке серной кислоты 5% и до 76,1% при избытке H₂SO₄ 50%.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. Aksenov V.I. Pickling and regeneration complexes. M.: Teplotekhnika, 2006. 237 p.
2. Bykovskij N.A., Puchkova L.N., Fanakova N.N. Regeneration of the etching solution used in the production of printed circuit boards. *Problems of collection, preparation and transport of oil and petroleum products*. 2023. N 6(146). P. 137-145.
3. Turaev D.Yu. A new method for the regeneration of hydrochloric acid copper chloride solutions of copper etching. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2020. N 4. P. 150-152.
4. Bykovskij N.A., Kantor E.A., Shulaev N.S., Fanakov V.S. Combined method of processing spent acidic pickling solution for the production of titanium products. *Notes of the Mining Institute*. 2025. T. 272. N 16446. P. 51-58.
5. Dorofeev Yu. G., Korchagina M.V., Naumenko A.A., Radikajnen L.M. Disposal of waste from etching of metallurgical scale by electrolysis. *News from universi-*

- вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2007. № 2. С. 77-81.
6. **Рогов В.М., Корчик Н.М., Нестер А.А.** Восстановление травильных растворов в четырех-камерном электролизере. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2013. № 6. Ч.1. С. 75-83.
7. **Козадерова О.А., Чернова В.Ю.** Выделение кислоты из отработанного травильного раствора методом диффузионного диализа с анионообменной мембраной. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2024. № 3. С. 217-222. DOI: 10.20914/2310-1202-2024-3-217-222
8. **Крачак А.Н., Груздева А.Н., Хамизов Р.Х., Долгонос А.А.** Переработка отработанного сульфатного травильного раствора методом удерживания кислоты на сильноосновном анионите. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 22. № 5. С. 684-693. DOI:10.17308/sorpchrom.2022.22/10721
9. **Сердюк В.А., Большанина С.Б., Воробьева И.Г., Ивченко В.Д.** Установка мембранной регенерации соляной кислоты. Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии - 2018: материалы международной научно-практической конференции. Юго-Зап. гос. ун-т., Изд-во ЗАО «Университетская книга», Курск, 2018. С. 186-188.
10. **Agrawal A., Naman N., Dubey S.K.** A review on regeneration process of waste pickling acid at steel industries. *International Journal of Engineering Research and Reviews*. 2014. Vol. 2. Issue 4. P. 70-73.
11. **Козадерова О.А., Ляпина Т.И.** Диффузионный диализ водного солянокислого раствора хлорида железа (III) с применением гетерогенной анионо-обменной мембраны Ralex AMH-PP. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024 Т. 24. №5. С. 775-785. DOI: 10.17308/sorpchrom. 2024.24/12516
12. **Шебаршова И.М., Левашова Е.В., Таранин И.В., Ласьков С.А., Клещев Е.Г.** Опыт освоения технологии регенерации соляной кислоты в псевдоожиженном слое. *Сталь*. 2013. № 9. С. 96-98.
13. **Кротова В.М., Поворов А.А., Липин А.Г., Липин А.А.** Регенерация отработанного травильного раствора. Повышение энергоресурсоэффективности, экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности: сборник научных трудов международного научно-технического симпозиума, посвящённого 120-летию со дня рождения П. Г. Романкова (ISTS «EESTE-2024»); Т. 2. М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2024. С. 132-134.
14. **Левинский М.И., Мазанко А.Ф., Новиков И.Н.** Хлористый водород и соляная кислота. М.: Химия, 1985. 160 с.
15. **Санап П.П., Махаджан И.С.** Разделение смеси этилового спирта с водой путем экстрактивной дистилляции: моделирование с использованием Aspen Plus™ и экспериментальное подтверждение. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 3. С. 86-93. DOI: 10.6060/ivkkt.20246703.6914
16. **Протасова Н.М., Поворов А.А., Липин А.А., Липин А.Г.** Исследование сорбции ионов аммония на смешанном слое ионитов в статических условиях. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2025. № 4. С. 137-142. DOI:10.6060/snt.20258404.00018.
- ties. North Caucasus region. Series: Technical Sciences. 2007. N 2. P. 77-81.
6. **Rogov V.M., Korchik N.M., Nester A.A.** Recovery of etching solutions in a four-chamber electrolyzer. *News of Tula State University. Technical Sciences*. 2013. N 6. Ch.1. P. 75-83.
7. **Kozaderova O.A., Chernova V.Yu.** Acid extraction from spent etching solution by diffusion dialysis with anion exchange membrane. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2024. N 3. P. 217-222. DOI: 10.20914/2310-1202-2024-3-217-222
8. **Krachak A.N., Gruzdeva A.N., Khamizov R.Kh., Dolgonosov A.A.** Processing of spent sulfate pickling solution by acid retention on a strongly basic anionite. *Sorption and chromatographic processes*. 2023. T.22. N 5. P. 684-693. DOI:10.17308/sorpchrom.2022.22/10721
9. **Serdyuk V.A., Bol'shanina S.B., Vorob'yova I.G., Ivchenko V.D.** Installation of membrane regeneration of hydrochloric acid. Fundamental and applied research in the field of chemistry and ecology - 2018: materials of the international scientific and practical conference. South-West state univ., Publishing House of ZAO "University Book", Kursk, 2018. P. 186-188.
10. **Agrawal A., Naman N., Dubey S.K.** A review on regeneration process of waste pickling acid at steel industries. *International Journal of Engineering Research and Reviews*. 2014. Vol. 2. Issue 4. P. 70-73.
11. **Kozaderova O.A., Lyapina T.I.** Diffusion dialysis of an aqueous hydrochloric acid solution of ferric (III) chloride using a heterogeneous Ralex AMH-PP anion exchange membrane. *Sorption and chromatographic processes*. 2024 T.24. N 5. P. 775-785. DOI: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12516
12. **Shebarshova I.M., Levashova E.V., Taranin I.V., Las'kov S.A., Kleshchev E.G.** Experience in mastering the technology of hydrochloric acid regeneration in a fluidized bed. *Steel*. 2013. N 9. P. 96-98.
13. **Krotova V.M., Povorov A.A., Lipin A.G., Lipin A.A.** Regeneration of the spent pickling solution. Increasing energy and resource efficiency, environmental and technological safety of processes and devices in chemical and related industries: a collection of scientific papers of the international scientific and technical symposium dedicated to the 120th anniversary of the birth of P. G. Romankov (ISTS "EESTE-2024"); T. 2. M.: FGBOU VO "RSU im. A. N. Kosygina", 2024. P. 132-134.
14. **Levinskij M.I., Mazanko A.F., Novikov I.N.** Hydrogen chloride and hydrochloric acid. M.: Khimiya, 1985. 160 p.
15. **Sanap P.P., Mahajan Y.S.** Ethyl alcohol - water separation by extractive distillation: Simulation using Aspen Plus™ and experimental validation. *Chem-Chem Tech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 3. P. 86-93. DOI: 10.6060/ivkkt.20246703.6914.
16. **Protasova N.M., Povorov A.A., Lipin A.A., Lipin A.G.** Study of sorption of ammonium ions on a mixed layer of ion exchangers under static conditions. *Modern high technology. Regional application*. 2025. N 4. P. 137-142. DOI:10.6060/snt.20258404.00018.

Поступила в редакцию (Received) 17.003.2026

Принята к опубликованию (Accepted) 18.05.2026