



Научно-исследовательский журнал «Chemical Bulletin»

<https://cb-journal.ru>

2026, Том 9, № 3 / 2026, Vol. 9, Iss. 3 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 628.3

DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-3-5

Разработка технологических решений по нейтрализации кислотных сточных вод

¹ Опарина Ф.Р.,

¹ Янбердин А.З. *

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,

* Ответственный автор E-mail: arturamir353@gmail.com

Аннотация: в статье рассмотрена проблема нейтрализации кислых сточных вод, образующихся при регенерации катионитных фильтров на Ново-Салаватской ТЭЦ. Исходные стоки имеют pH 1,3 и содержание сульфатов 11,6 г/дм³. Цель работы – разработка технологической схемы и режимов нейтрализации, позволяющих получить два побочных продукта: алебастр и марганцевый концентрат. В качестве методов использованы потенциометрическое определение pH, комплексометрическое титрование для кальция и турбидиметрия для сульфатов. Эксперимент включал две стадии: осаждение сульфата кальция 10%-ным раствором CaCl₂ и последующую нейтрализацию фильтрата на колонне с карбонатной марганцевой рудой. Установлено, что оптимальная скорость подачи раствора через колонну составляет 4,57 см³/мин, при этом pH повышается до 6,75, а содержание сульфатов снижается до 2,15 г/дм³. Осадок CaSO₄ после прокаливании при 170–180 °С превращается в алебастр с выходом 4,6 г с 1 дм³ стока. Нерастворимый остаток руды обогащается MnO₂ до 34–36% и может использоваться как марганцевый концентрат. Сделан вывод, что предложенная двухстадийная схема позволяет отказаться от дорогостоящих щелочных реагентов и получить два товарных продукта.

Ключевые слова: кислые сточные воды, сульфат кальция, алебастр, хлорид кальция, карбонатная марганцевая руда, марганцевый концентрат, катионитные фильтры, ТЭЦ

Для цитирования: Опарина Ф.Р., Янбердин А.З. Разработка технологических решений по нейтрализации кислотных сточных вод // Chemical Bulletin. 2026. Том 9. № 3. 5. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-3-5

Поступила в редакцию: 10 апреля 2026 г.; Одобрена после рецензирования: 12 июня 2026 г.; Принята к публикации: 10 июля 2026 г.

Development of technological solutions for neutralization of acidic wastewater

¹ Oparina F.R.,

¹ Yanberdin A.Z.,

¹ Ufa State Petroleum Technological University,

* Corresponding author E-mail: arturamir353@gmail.com

Abstract: the article considers the problem of neutralization of acidic wastewater generated during the regeneration of cation exchange filters at the Novo-Salavatskaya CHPP. The initial wastewater has a pH of 1.3 and a sulfate content of 11.6 g/dm³. The aim of the work is to develop a technological scheme and neutralization modes that allow obtaining two by-products: alabaster and manganese concentrate. The methods used include potentiometric pH determination, complexometric titration for calcium, and turbidimetry for sulfates. The experiment included two stages: precipitation of calcium sulfate with a 10% CaCl₂ solution and subsequent neutralization of the filtrate in a column packed with carbonate manganese ore. It was found that the optimal solution feed rate through the column is 4.57 cm³/min, at which the pH rises to 6.75 and the sulfate content decreases to 2.15 g/dm³. The CaSO₄ precipitate after calcination at 170–180 °C is converted into alabaster with a yield of 4.6 g per 1 dm³ of

wastewater. The insoluble residue of the ore is enriched in MnO_2 up to 34–36% and can be used as a manganese concentrate. It is concluded that the proposed two-stage scheme makes it possible to abandon expensive alkaline reagents and obtain two marketable products.

Keywords: acidic wastewater, calcium sulfate, alabaster, calcium chloride, carbonate manganese ore, manganese concentrate, cation exchange filters, CHPP

For citation: Oparina F.R., Yanberdin A.Z. Development of technological solutions for neutralization of acidic wastewater. Chemical Bulletin. 2026. 9 (3). 5. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-3-5

The article was submitted: April 10, 2026; Approved after reviewing: June 12, 2026; Accepted for publication: July 10, 2026.

Введение

На Ново-Салаватской теплоэлектроцентрали (далее – ТЭЦ) при регенерации катионитных фильтров образуются кислые сточные воды. Водородный показатель этих вод составляет 1,3. Концентрация сульфатов достигает 11,6 г/дм³.

Прямой сброс таких вод в системы канализации или в поверхностные водоемы запрещен действующими нормативами [1, с. 92]. На большинстве ТЭЦ применяется усреднение стоков путем смешения кислых и щелочных вод. Однако этот способ не обеспечивает стабильной нейтрализации до требуемых значений pH и не снижает содержание сульфат-ионов [2-4].

На Ново-Салаватской ТЭЦ организован отдельный сбор кислых и щелочных стоков [5, с. 72]. Щелочные воды не содержат ионов жесткости, а используемые щелочные реагенты характеризуются высокой стоимостью. В связи с этим их применение для нейтрализации больших объемов кислых стоков экономически нецелесообразно [6, с. 120].

Традиционный способ нейтрализации кислых стоков с использованием извести ($Ca(OH)_2$) приводит к образованию большого количества гипсового шлама, который трудно утилизировать [7]. Кроме того, известь не дает возможности выделить сульфат кальция в виде товарного продукта [9, с. 2653]. В данной работе вместо извести используется хлорид кальция, а для доочистки от кислоты применяется карбонатная марганцевая руда. Такая руда выбрана потому, что она доступна по цене, содержит одновременно карбонат кальция для нейтрализации HCl и диоксид марганца, который после выщелачивания карбонатов накапливается в виде концентрата [8], пригодного для дальнейшего использования.

Анализ современных подходов к нейтрализации кислых сточных вод показывает, что наряду с классическими реагентными методами активно развиваются альтернативные технологии, основанные на использовании природных минералов и отходов производств [9; 12; 17]. Значительное внимание уделяется процессам с участием карбонатных пород, способных одновременно нейтрализовать кислоту и осаждают ионы тяжёлых металлов [10; 11; 19]. Перспективным направлением является применение марганецсодержащих руд, которые после выщелачивания карбонатной составляющей могут служить источником вторичного сырья [15; 20]. Эффективность таких процессов во многом определяется кинетикой взаимодействия твёрдой фазы с кислым раствором, а также гидродинамическими условиями в реакторе [9; 13]. Отдельное внимание в литературе уделяется проблеме удаления сульфат-ионов, которая остаётся нерешённой при использовании большинства известных схем [5; 16]. В работах последних лет предлагаются комбинированные схемы, включающие осаждение, мембранное разделение и сорбционную доочистку [14; 18]. Вместе с тем, многие из этих решений характеризуются высокой стоимостью реагентов или сложностью аппаратного оформления, что ограничивает их промышленное применение на ТЭЦ и водоочистных станциях [6; 8].

Цель настоящей работы – разработка технологической схемы и режимов нейтрализации кислых стоков, обеспечивающих получение двух побочных продуктов. На первой стадии выделяется сульфат кальция, который после обжига переводится в алебастр. На второй стадии получается раствор хлорида кальция. Для проведения второй стадии используется карбонатная марганцевая руда, обладающая доступностью и достаточной реакционной способностью.

Материалы и методы исследований

Отбор проб проводили из коллектора кислых стоков до смешения с другими потоками. Пробы отбирали в полиэтиленовые бутылки объемом 5 л, хранили при комнатной температуре не более 7 суток.

Исходный химический состав приведен в табл. 1. Основной вклад в кислотность вносит серная кислота (остаточная концентрация около 0,3% масс.).

Таблица 1

Химический состав стоков регенерации ионитных фильтров.

Table 1

Chemical composition of regeneration wastewater from ion exchange filters.

Наименование про- бы	Показатели качества			
	pH	[Ca], г/дм ³	[Mg], г/дм ³	[SO ₄], г/дм ³
кислотные стоки	1,33	0,61	0,33	11,6
щелочные стоки	12,6	-	-	-

Использованы следующие реагенты и материалы:

- Хлорид кальция (CaCl₂) – технический, 10%-ный водный раствор. Готовили растворением 100 г безводного CaCl₂ (ч.д.а., Химмед) в дистиллированной воде до 1 л.
- Карбонатная марганцевая руда – фракция менее 10 мм. Химический состав приведен в табл. 2. Руду перед загрузкой в колонку не промывали, не сушили.
- Вода дистиллированная по ГОСТ 6709-72.

Таблица 2

Состав руды.

Table 2

Ore composition.

№	Название руды	Содержание компонентов, % масс			
		CaCO ₃	Ca	MnO ₂	Mn
1	Карбонатная руда	59,4	23,75	12,0	7,6

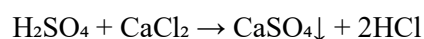
Методика анализов включала в себя три основных определения. Водородный показатель измеряли потенциометрическим методом по ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97. Использовали pH-метр-иономер «Эксперт-001» российского производства. Перед каждым измерением прибор калибровали по буферным растворам с pH 4,01 и 6,86.

Концентрацию кальция определяли методом комплексонометрического титрования. Аликвота пробы составляла 10 см³. В качестве индикатора применяли мурексид, титрантом служил 0,05 М раствор трилона Б. Точность метода оценивали как ±0,02 г/дм³.

Сульфат-ионы определяли турбидиметрическим методом по ПНД Ф 14.1:2.159-2000. Оптическую плотность измеряли на фотоколориметре КФК-3 при длине волны 520 нм в кювете толщиной 10 мм. Калибровочную кривую строили по растворам сульфата натрия. Рабочий диапазон измерений составлял 0,1-5,0 г/дм³. Пробы с более высокой концентрацией сульфатов перед измерением разбавляли в 2-5 раз дистиллированной водой.

Эксперимент проводили в две стадии. На первой стадии в стеклянный стакан вместимостью 1 л помещали 1 дм³ кислого стока. При непрерывном перемешивании магнитной мешалкой с частотой вращения 300 об/мин добавляли 10-процентный раствор хлорида кальция. Количество реагента рассчитывали из стехиометрического соотношения: количество добавленного хлорида кальция должно равняться сумме количеств серной кислоты и сульфат-ионов, присутствующих в стоке. Фактический расход раствора CaCl₂ составил 32 мл на 1 л стока. После добавления реагента смесь перемешивали в течение 15 минут, затем оставляли на отстаивание на 2 часа. Выпавший осадок сульфата кальция отфильтровывали на воронке Бюхнера с использованием бумажного фильтра «синяя лента». Полученный фильтрат, представляющий собой разбавленный раствор соляной кислоты, направляли на вторую стадию обработки.

Процесс на первой и второй стадиях описывается следующими химическими реакциями. При добавлении хлорида кальция к кислому стоку, содержащему серную кислоту, протекает реакция (1):



На второй стадии соляная кислота, образовавшаяся в первой реакции, взаимодействует с карбонатом кальция, содержащимся в руде. В результате протекает реакция (2):



Вторая стадия заключалась в нейтрализации соляной кислоты на карбонатной марганцевой руде [10]. Для этого использовали стеклянную колонку высотой 50 см и внутренним диаметром 3 см. На нижнюю перфорированную пластину загружали руду фракцией менее 10 мм. Масса навески составляла 28,92 г, высота слоя руды в колонке – около 18 см. Раствор соляной кислоты (фильтрат после первой стадии) подавали снизу-вверх с помощью перистальтического насоса Masterflex. Скорость подачи регулировали в диапазоне от 4 до 20 см³ в минуту.

Отбор проб выходящего раствора проводили после каждых 100 см³ пропущенного через колонку объема. В каждой пробе измеряли водородный показатель, концентрацию кальция и сульфат-ионов. Оптимальную скорость подачи раствора определяли по критерию стабилизации pH выше 6,5 при минимальном расходе руды. Скорость снижали ступенчато: 19,6, затем 13,7, далее 10,9, затем 7,8 и в конце 4,6 см³/мин.

Принципиальная схема установки для нейтрализации кислотных сточных вод представлена на рис. 1.

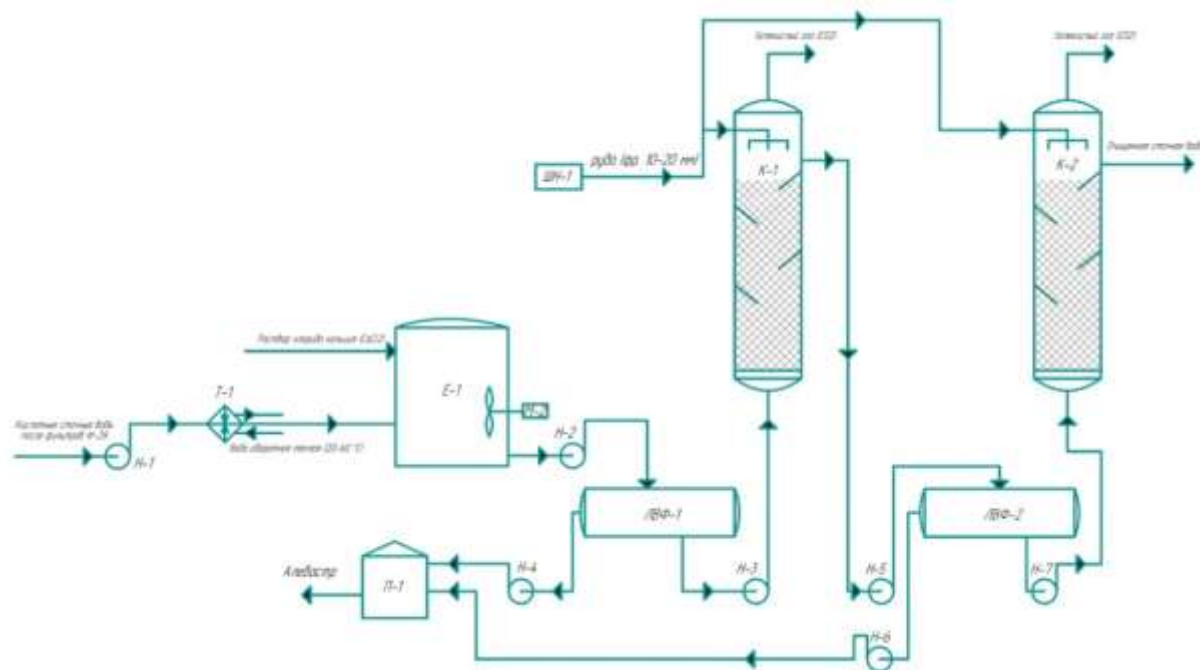


Рис. 1. Принципиальная схема установки для нейтрализации кислотных сточных вод.

Fig. 1. Schematic diagram of the installation for acidic wastewater neutralization.

Осадок сульфата кальция, полученный после первой стадии фильтрации, сушили в сушильном шкафу при 105 °С до постоянной массы. Затем его прокаливали в муфельной печи SNOL 8,2/1100 при температуре 170-180 °С в течение 3,5 часов. Полученный после прокаливания продукт идентифицировали как алебастр (CaSO₄·0,5H₂O) по потере массы при прокаливании и по времени схватывания при затворении водой. Время схватывания ориентировочно составило 5-7 минут.

Результаты и обсуждения

На первой стадии эксперимента к кислому стоку объемом 1 дм³ добавляли 10%-ный раствор хлорида кальция. Расход реагента составил 32 мл, что соответствовало стехиометрическому соотношению по серной кислоте и сульфат-ионам. Сразу после добавления CaCl₂ наблюдалось образование мелкокристаллического осадка белого цвета. После отстаивания в течение 2 часов осадок хорошо отделялся фильтрованием. Масса высушенного осадка сульфата кальция составила 4,6 г с 1 дм³ стока. Химический анализ осадка показал, что основным компонентом является CaSO₄ с примесью не более 3% механически увлеченных солей.

Фильтрат после первой стадии имел pH около 1,8-2,0 и содержал соляную кислоту, образовавшуюся по реакции (1). Концентрация сульфатов в фильтрате снизилась до 4,0-4,2 г/дм³, то есть примерно на 65% от исходного значения. Такое снижение объясняется тем, что основная масса сульфат-ионов перешла в осадок в виде CaSO₄ (рис. 2). Остаточное содержание сульфатов связано с растворимостью гипса в кислой среде.

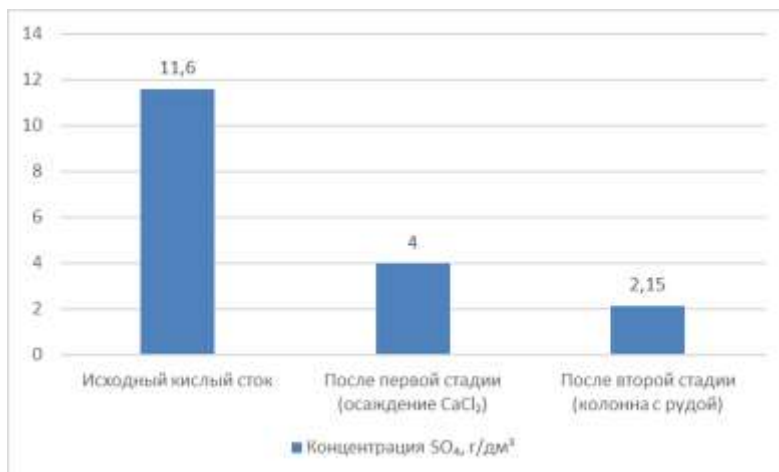


Рис. 2. Снижение концентрации сульфат-ионов по стадиям обработки кислых сточных вод.

Fig. 2. Reduction of sulfate ion concentration by treatment stages of acidic wastewater.

В табл. 3 представлены усредненные показатели качества фильтрата до и после первой стадии обработки.

Таблица 3

Показатели кислого стока до и после осаждения сульфата кальция.

Table 3

Acid runoff values before and after calcium sulfate precipitation.

Показатель	Исходный сток	Фильтрат после первой стадии
pH	1,33	1,9±0,1
[Ca ²⁺], г/дм ³	0,61	0,55±0,05
[SO ₄ ²⁻], г/дм ³	11,6	4,1±0,2

Вторая стадия проводилась в колонне, загруженной карбонатной марганцевой рудой. Фильтрат после первой стадии подавали снизу-вверх с различной скоростью. Результаты анализов проб, отобранных после каждых 100 см³ выходящего раствора, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Анализ проб сточной воды после второй стадии.

Table 4

Analysis of wastewater samples after the second stage.

Объем раствора V, см ³	Расход сточной воды, см ³ /мин	Водородный показатель pH	Концентрация иона кальция Ca, г/дм ³	Концентрация сульфат-иона SO ₄ , г/дм ³
0	—	1,5	0,5	4,00
100	19,66	3,09	1,3	3,78
200	13,7	4,9	1,7	2,00
300	10,91	5,93	1,5	2,19
400	10,91	6,32	1,7	2,41
500	7,83	6,42	1,7	—
600	7,83	6,62	1,7	3,05
700	4,57	6,75	1,8	2,15

Примечание: в строке «0» приведены показатели фильтрата после первой стадии перед подачей в колонну. Расход сточной воды – объемная скорость подачи раствора через колонну, установленная на каждом этапе отбора пробы.

Note: Row "0" shows the filtrate values after the first stage before entering the column. Wastewater flow rate is the volumetric flow rate of the solution through the column, determined at each sampling stage.

Как видно из таблицы 4, исходный фильтрат после первой стадии имел $\text{pH} = 1,5$, концентрацию кальция $0,5 \text{ г/дм}^3$ и сульфатов $4,00 \text{ г/дм}^3$. При подаче раствора в колонну с максимальной скоростью $19,66 \text{ см}^3/\text{мин}$ уже после 100 см^3 обработанного объема pH повысился до $3,09$, а концентрация сульфатов незначительно снизилась до $3,78 \text{ г/дм}^3$. Содержание кальция при этом выросло до $1,3 \text{ г/дм}^3$, что объясняется частичным растворением карбоната кальция из руды (рис. 3).

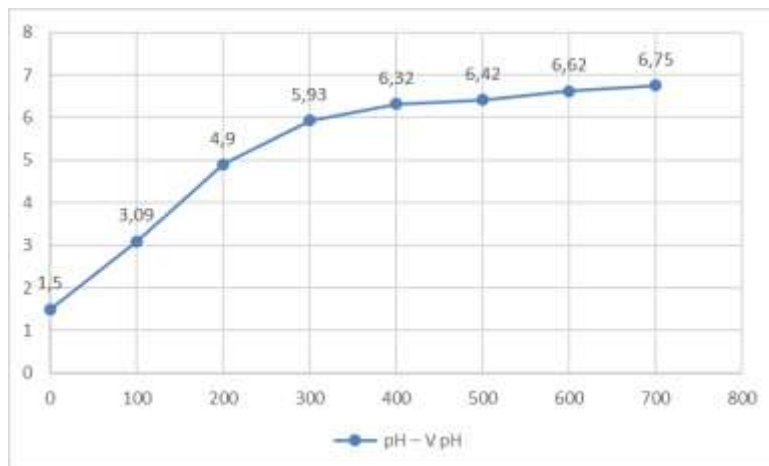


Рис. 3. Зависимость водородного показателя фильтрата от объема пропущенного через колонну раствора.
Fig. 3. Dependence of the hydrogen index of the filtrate on the volume of the solution passed through the column.

Дальнейшее снижение скорости подачи (с $19,66$ до $13,7 \text{ см}^3/\text{мин}$, затем до $10,91 \text{ см}^3/\text{мин}$) привело к закономерному росту pH . При отборе пробы объемом 200 см^3 (скорость $13,7 \text{ см}^3/\text{мин}$) pH достиг $4,9$. При объеме 300 и 400 см^3 (скорость $10,91 \text{ см}^3/\text{мин}$) pH составил $5,93$ и $6,32$ соответственно. Таким образом, для достижения pH выше $6,0$ потребовалось снизить скорость до $10,91 \text{ см}^3/\text{мин}$.

Наиболее высокое значение $\text{pH} - 6,75$ – зафиксировано при скорости подачи $4,57 \text{ см}^3/\text{мин}$ и пропущенном объеме 700 см^3 . При этой же скорости наблюдалось и наименьшее содержание сульфатов – $2,15 \text{ г/дм}^3$.

Для оценки эффективности нейтрализации в зависимости от режимных параметров были рассчитаны значения кислотности и степени удаления сульфатов (табл. 5).

Таблица 5

Эффективность очистки на второй стадии при различных скоростях подачи.

Table 5

Cleaning efficiency in the second stage at different feed rates.

Скорость подачи, $\text{см}^3/\text{мин}$	pH на выходе	Остаточная кислотность, мг-экв/дм^3	Степень удаления SO_4^{2-} , %
19,66	3,09	0,81	5,5
13,70	4,90	0,13	50,0
10,91 (среднее)	6,12	0,008	42,5
7,83 (среднее)	6,52	0,003	23,8**
4,57	6,75	0,002	46,2

Примечание: ** – для скорости $7,83 \text{ см}^3/\text{мин}$ значение степени удаления рассчитано по единственному измерению (проба 600 см^3), так как для пробы 500 см^3 данные отсутствуют.

Note: ** – for a speed of $7.83 \text{ cm}^3/\text{min}$, the removal rate value is calculated based on a single measurement (600 cm^3 sample), since there is no data for a 500 cm^3 sample.

Из табл. 5 следует, что минимальная остаточная кислотность достигается при скорости $4,57 \text{ см}^3/\text{мин}$ ($0,002 \text{ мг-экв/дм}^3$), что соответствует практически полной нейтрализации свободных ионов водорода. Наибольшая степень удаления сульфатов ($50,0\%$) зафиксирована при скорости $13,70 \text{ см}^3/\text{мин}$, однако в этом случае pH остаётся ниже нормативных значений ($4,90$). При скорости $4,57 \text{ см}^3/\text{мин}$ степень удаления сульфатов составляет $46,2\%$, что несколько ниже, но достигается требуемый уровень pH .

На рис. 4 показано изменение водородного показателя в зависимости от объема пропущенного через колонну раствора.

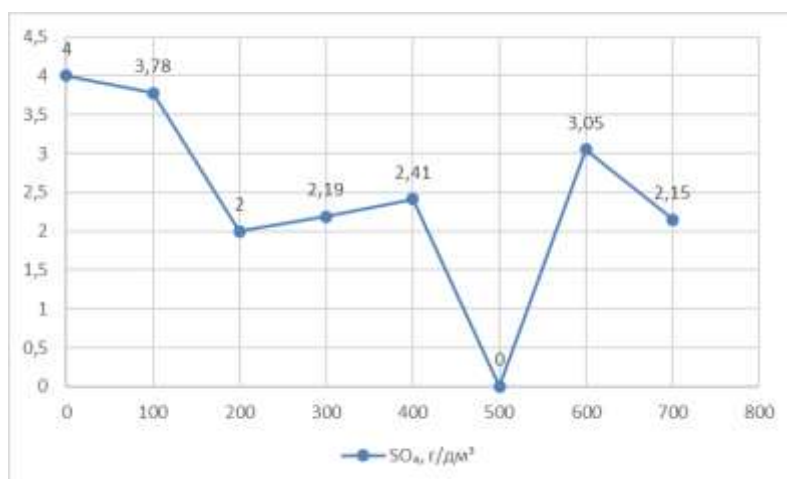


Рис. 4. Изменение водородного показателя pH в процессе нейтрализации.

Fig. 4. Change in pH during neutralization.

Из рис. 4 видно, что в начальный период (первые 100-200 см³) pH растет быстро – с 1,5 до 4,9. Это связано с высокой концентрацией ионов водорода в растворе и доступной поверхностью свежей руды. На участке от 200 до 700 см³ скорость роста pH замедляется. Причина – снижение концентрации кислоты в растворе и частичное покрытие поверхности зерен руды продуктами реакции, что затрудняет диффузию. Такой характер кривой характерен для гетерогенных процессов, лимитируемых внутренней диффузией.

Что касается сульфатов, то их концентрация в обработанном растворе колеблется в пределах 2,0–3,8 г/дм³. Это значительно ниже исходного содержания в кислом стоке (11,6 г/дм³), но все еще превышает норматив для сброса в водоемы (500 мг/дм³). Причина в том, что на второй стадии сульфаты не удаляются целенаправленно.

Согласно СанПиН 2.1.3684-21, предельно допустимая концентрация сульфатов для воды в местах хозяйственно-питьевого водопользования составляет 500 мг/дм³. Для водоемов рыбохозяйственного значения норматив жестче – 100 мг/дм³. Полученная после двух стадий концентрация сульфатов (2,15 г/дм³, то есть 2150 мг/дм³) почти в 4 раза выше норматива для хозяйственных водоемов и в 20 раз выше рыбохозяйственного. Это означает, что предложенная схема не решает проблему сульфатов полностью. Она снижает их содержание на 81% от исходного уровня, но не до нормы. Для окончательной очистки требуется дополнительная стадия, например, обратный осмос, нанофильтрация или вымораживание.

Из практической точки зрения важным результатом является получение алебаstra. Осадок сульфата кальция после сушки и прокаливании при 170-180°C в течение 3,5 часов превратился в $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Потеря массы при прокаливании составила 15,7%, что близко к теоретическому значению для полугидрата. Время схватывания затворенного водой образца не превышало 7 минут, что характерно для строительного алебаstra. Следовательно, отход первой стадии можно использовать как товарный продукт.

Также следует отметить поведение марганца, содержащегося в руде. Исходная карбонатная руда содержала 12,0% MnO_2 (7,6% Mn). В ходе нейтрализации соляной кислотой карбонатная часть растворилась, а диоксид марганца как нерастворимый компонент накапливался в колонне. После завершения эксперимента остаток в колонне был выгружен, высушен и проанализирован. Содержание Mn в нем повысилось до 34–36% за счет выщелачивания карбонатов. Этот остаток представляет собой марганцевый концентрат, который может быть переработан металлургическими или химическими предприятиями. Патентные данные [8,9] подтверждают, что такие концентраты востребованы в производстве ферромарганца и химических реагентов. Ориентировочная стоимость реагентов (CaCl_2 и карбонатная руда) ниже, чем щелочных реагентов, используемых при традиционной схеме. Однако для точного расчета экономической эффективности требуется технико-экономическое обоснование с учетом цен на конкретном предприятии.

Расчет материального баланса по второй стадии показал, что для полного удаления карбоната кальция из 1 кг руды требуется пропустить 1,97 м³ фильтрата с концентрацией HCl, соответствующей исходному кислому стоку. При этом объемный коэффициент использования руды составляет примерно 0,5 кг на 1 м³ стока.

Таким образом, экспериментальные данные подтверждают принципиальную реализуемость двухстадийной схемы. Она позволяет не только нейтрализовать кислые стоки, но и получить два вида продукции: алебастр и марганцевый концентрат.

Выводы

По результатам выполненной работы сформулированы следующие выводы. Разработана двухстадийная технологическая схема нейтрализации кислых сточных вод, образующихся при регенерации катионитных фильтров на Ново-Салаватской ТЭЦ. Первая стадия включает осаждение сульфата кальция хлоридом кальция, вторая – нейтрализацию соляной кислоты на карбонатной марганцевой руде.

Экспериментально установлено, что при добавлении 10%-ного раствора CaCl_2 в количестве 32 мл на 1 дм^3 кислого стока концентрация сульфатов снижается с 11,6 г/ дм^3 до 4,0 г/ дм^3 , а pH повышается с 1,3 до 1,8-2,0. Выделяющийся осадок CaSO_4 после фильтрации и прокаливании при 170-180°C превращается в алебастр ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) с выходом 4,6 г с 1 дм^3 стока.

На второй стадии при пропускании фильтрата через колонну с карбонатной рудой (фракция менее 10 мм, масса навески 28,92 г) достигается повышение pH до 6,75. Оптимальная скорость подачи раствора составляет 4,57 $\text{см}^3/\text{мин}$. При этой скорости обеспечивается наиболее полная нейтрализация и минимальное содержание сульфатов в очищенной воде (2,15 г/ дм^3).

В процессе нейтрализации соляной кислоты рудой происходит растворение карбонатной части и накопление нерастворимого диоксида марганца. Полученный твердый остаток содержит 34-36% марганца и может быть использован в качестве марганцевого концентрата в металлургии и химической промышленности.

Установлено, что для полного удаления карбонатов из 1 кг руды требуется 1,97 м^3 фильтрата, что позволяет рассчитать загрузку руды в промышленную колонну. Предложенная двухстадийная схема имеет преимущества перед традиционным смешением кислых и щелочных стоков. Она позволяет не только привести pH воды к нормативным значениям, но и получить два товарных продукта – алебастр и марганцевый концентрат. Кроме того, исключается расход дорогостоящих щелочных реагентов.

Список источников

1. Ибоян Д.Л., Косоплеткин М.В., Беловодский Е.А. Современные методы очистки сточных вод // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология. 2021. С. 92 – 97.
2. Петрушенко В. В. Анализ показателей работы блока пгу-410т Ново-Салаватской ТЭЦ при переменных режимах // Science in modern society: regularities and development trends: Collection. 2022. С. 79 – 84.
3. Яцков М. Разработка технологии сбережения ресурсов для очистки сточных вод, содержащих железо, при травлении // Восточноевропейский журнал предпринимательских технологий. 2022. Т. 6. № 10. С. 120 – 125.
4. Bao H., Meng X., Wu M., Sun W. A review of technologies and mechanisms for the removal and recovery of manganese from mining and metallurgical wastewater // Journal of Water Process Engineering. 2025. Vol. 72. Art. No. 107894. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107894
5. Chatla A., Almanassra I.W., Abushawish A., Laoui T., Alawadhi H., Atieh M. A., Ghaffour N. Sulphate removal from aqueous solutions: State-of-the-art technologies and future research trends // Desalination. 2023. Vol. 558. Art. No. 116615.
6. Dagan-Jaldety C., Lahav O., Ben-Asher R., Saller G., Oz S., Nativ P. Innovative ammonia harvesting from wastewater: A controlled closed-loop process at high pH for enhanced nutrient recovery // Chemical Engineering Journal. 2025. Vol. 503. Art. No. 158201.
7. Deng L., Zhang Y., Chen F., Cao S., You S., Liu Y., Zhang Y. Reactive Crystallization of Calcium Sulfate Dihydrate from Acidic Wastewater and Lime // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2013. Vol. 21. No. 11. P. 1303 – 1312.
8. Dube V., Phiri Z., Kuvarega A. T., Mamba B. B., de Kock L.-A. Exploring acid mine drainage treatment through adsorption: a bibliometric analysis // Environmental Science and Pollution Research. 2024. Vol. 31. No. 50. P. 59659 – 59680.
9. Ekawati E., Pradipta J., Yulia E. Automation system architecture of pH neutralization process in batik wastewater treatment plant // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2023. Vol. 2673. № 1. P. 012020.
10. Holtman G.A., Haldenwang R., Welz P. J. Calcite dissolution and bionutralization of acidic wastewater in biosand reactors // Water. 2022. Vol. 14. No. 21. P. 3482.
11. Huang X., Chen T., Pan M. Treatment of coking wastewater by using manganese and magnesium ores // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 168. No. 2-3. P. 843 – 847.

12. Jarnerud T., Karasev A.V., Jönsson P.G. Neutralization of acidic wastewater from a steel plant by using CaO-containing waste materials from pulp and paper industries // *Materials*. 2021. Vol. 14. № 10. P. 2653 – 2658.
13. Kharko P.A., Danilov A. S. Evaluation of the effectiveness of neutralization and purification of acidic waters from metals with ash when using alternative fuels from municipal waste // *Записки Горного института*. 2025. № 274 P. 167 – 176.
14. Kim J.-E., Ji W. H. Evaluation of characteristics of sludge generated from active treatment system of mine drainage // *Economic and Environmental Geology*. 2023. Vol. 56. No. 4. P. 409 – 419.
15. Li B., Shu J., Wu Y., Su P., Yang Y., Chen M., Liu R., Liu Z. Enhanced removal of Mn^{2+} and NH_4^+-N in electrolytic manganese residue leachate by electrochemical and modified phosphate ore flotation tailings // *Separation and Purification Technology*. 2022. Vol. 291. Art. No. 120959.
16. Monat L., Zhang W., Jarošíková A., Haung H., Bernstein R., Nir O. Circular process for phosphoric acid plant wastewater facilitated by selective electrodialysis // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2022. Vol. 10. No. 35. P. 11567 – 11576.
17. Roulia M., Alexopoulos D., Itskos G., Vasilatos C. Lignite fly ash utilization for acid mine drainage neutralization and clean-up // *Cleaner Materials*. 2022. Vol. 6. Art. No. 100142.
18. Virpiranta H., Leiviskä T., Taskila S., Tanskanen J. Bioregeneration of sulfate-laden anion exchange resin // *Water Research*. 2022. Vol. 224. P. 119110.
19. Weber P., Thomas J., Skinner W., Smart R. A methodology to determine the acid-neutralization capacity of rock samples // *Canadian Mineralogist*. 2005. Vol. 43. No. 4. P. 1183 – 1192.
20. Zhang C., Du R., Wang R., Sun W., Luo Y., Yu Z. Technological advances and sustainable strategies for electrolytic manganese wastewater treatment: A critical review // *Process Safety and Environmental Protection*. 2025. Vol. 197. Art. No. 107274.

References

1. Iboyan D.L., Kosopletkin M.V., Belovodsky E.A. Modern methods of wastewater treatment. Rational use of natural resources and processing of technogenic raw materials: fundamental problems of science, materials science, chemistry and biotechnology. 2021. P. 92 – 97.
2. Petrushchenko V.V. Analysis of the performance indicators of the PGU-410t unit of the Novo-Salavatskaya CHPP under variable conditions. Science in modern society: regularities and development trends: Collection. 2022. P. 79 – 84.
3. Yatskov M. Development of a resource-saving technology for the treatment of wastewater containing iron during etching. *East European Journal of Entrepreneurial Technologies*. 2022. T. 6. No. 10. P. 120 – 125.
4. Bao H., Meng X., Wu M., Sun W. A review of technologies and mechanisms for the removal and recovery of manganese from mining and metallurgical wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 2025. Vol. 72. Art. No. 107894. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107894
5. Chatla A., Almanassra I.W., Abushawish A., Laoui T., Alawadhi H., Atieh M. A., Ghaffour N. Sulphate removal from aqueous solutions: State-of-the-art technologies and future research trends. *Desalination*. 2023. Vol. 558. Art. No. 116615.
6. Dagan-Jaldety C., Lahav O., Ben-Asher R., Saller G., Oz S., Nativ P. Innovative ammonia harvesting from wastewater: A controlled closed-loop process at high pH for enhanced nutrient recovery. *Chemical Engineering Journal*. 2025. Vol. 503. Art. No. 158201.
7. Deng L., Zhang Y., Chen F., Cao S., You S., Liu Y., Zhang Y. Reactive Crystallization of Calcium Sulfate Dihydrate from Acidic Wastewater and Lime. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2013. Vol. 21. No. 11. P. 1303 – 1312.
8. Dube V., Phiri Z., Kuvarega A.T., Mamba B.B., de Kock L.-A. Exploring acid mine drainage treatment through adsorption: a bibliometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. Vol. 31. No. 50. P. 59659 – 59680.
9. Ekawati E., Pradipta J., Yulia E. Automation system architecture of pH neutralization process in batik wastewater treatment plant. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2023. Vol. 2673. No. 1. P. 012020.
10. Holtman G.A., Haldenwang R., Welz P.J. Calcite dissolution and bionutralization of acidic wastewater in biosand reactors. *Water*. 2022. Vol. 14. No. 21. P. 3482.
11. Huang X., Chen T., Pan M. Treatment of coking wastewater using manganese and magnesium ores. *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 168. No. 2-3. P. 843 – 847.

12. Jarnerud T., Karasev A.V., Jönsson P.G. Neutralization of acidic wastewater from a steel plant by using CaO-containing waste materials from pulp and paper industries. *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 10. P. 2653 – 2658.
13. Kharko P.A., Danilov A.S. Evaluation of the effectiveness of neutralization and purification of acid-ic waters from metals with ash when using alternative fuels from municipal waste. *Notes of the Mining Institute*. 2025. No. 274 P. 167 – 176.
14. Kim J.-E., Ji W. H. Evaluation of characteristics of sludge generated from active treatment system of mine drainage. *Economic and Environmental Geology*. 2023. Vol. 56.No. 4. P. 409 – 419.
15. Li B., Shu J., Wu Y., Su P., Yang Y., Chen M., Liu R., Liu Z. Enhanced removal of Mn^{2+} and NH_4^+-N in electrolytic manganese residue leachate by electrochemical and modified phosphate ore flotation tailings. *Separation and Purification Technology*. 2022. Vol. 291. Art. No. 120959.
16. Monat L., Zhang W., Jarošíková A., Haung H., Bernstein R., Nir O. Circular process for phosphoric acid plant wastewater facilitated by selective electrodialysis. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2022. Vol. 10.No. 35. P. 11567 – 11576.
17. Roulia M., Alexopoulos D., Itskos G., Vasilatos C. Lignite fly ash utilization for acid mine drainage neutralization and clean-up. *Cleaner Materials*. 2022. Vol. 6. Art. No. 100142.
18. Virpiranta H., Leiviskä T., Taskila S., Tanskanen J. Bioregeneration of sulfate-laden anion exchange resin. *Water Research*. 2022. Vol. 224. P. 119110.
19. Weber P., Thomas J., Skinner W., Smart R. A methodology to determine the acid-neutralization capacity of rock samples. *Canadian Mineralogist*. 2005. Vol. 43.No. 4. P. 1183 – 1192.
20. Zhang C., Du R., Wang R., Sun W., Luo Y., Yu Z. Technological advances and sustainable strategies for electrolytic manganese wastewater treatment: A critical review. *Process Safety and Environmental Protection*. 2025. Vol. 197. Art. No. 107274.

Информация об авторах

Опарина Ф.Р., кандидат технических наук, доцент, преподаватель, Уфимский государственный нефтяной технический университет, ofr1952@mail.ru

Янбердин А.З., Институт нефтепереработки и нефтехимии, Уфимский государственный нефтяной технический университет, arturamir353@gmail.com

© Опарина Ф.Р., Янбердин А.З., 2026

Information about the authors

Oparina F.R., PhD in Engineering, Associate Professor, Lecturer, Ufa State Petroleum Technological University, ofr1952@mail.ru

Yanberdin A.Z., Institute of Oil Refining and Petrochemistry, Ufa State Petroleum Technological University, arturamir353@gmail.com

© Oparina F.R., Yanberdin A.Z., 2026