ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Обзорная статья
Геотехнология и инженерная геология

Перспективы использования отходов содового производства в различных отраслях

О.С.Кудряшова, Н.В.Митракова✉
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Кудряшова О.С., Митракова Н.В. Перспективы использования отходов содового производства в различных отраслях // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 1. С. 174-188. EDN QOVXKV

Аннотация
Представлен обзор и анализ научных статей и патентов, посвященных проблеме утилизации и переработки отходов содового производства. Приведены примеры способов снижения токсичности шламов, использования отходов в строительстве, включая дорожное, переработки в химические соединения. Особое внимание уделено вопросам использования шламов для рекультивации почв. Аммиачный способ получения кальцинированной соды является основным во всем мире. Существенный недостаток – это опасные отходы производства, поэтому необходимо соблюдать экологические требования и нормативы при хранении и переработке. Российский опыт обращения с отходами содового производства отстает от европейского из-за низких цен на первичное природное сырье, неоднородности состава и свойств отходов, необходимости предварительной обработки отходов, низкого уровня экологических платежей для предприятий за размещение отходов. Повышение требований норм экологической безопасности к отходам производства кальцинированной соды и дорогое обслуживание отстойников стимулируют развитие способов их переработки. Выбор метода переработки зависит от расположения завода, энергетических мощностей, финансового состояния компании. Использование шламов при производстве строительных материалов ограничено наличием хлорид-ионов, малым размером частиц, тиксотропными свойствами материала и изменчивостью состава шлама. Дорожное строительство является наиболее перспективным с точки зрения объемов утилизации и использования отходов без дополнительной санации. Использование отходов для рекультивации земель требует избирательного подхода к выбору объектов и проведения дополнительных исследований. Несмотря на широкой спектр возможностей применения отходов производства соды, проблема их утилизации остается актуальной. Это обусловлено объемами производства соды и образующихся отходов, а также необходимостью финансовых вложений на внедрение методов утилизации.

Ключевые слова
отходы производства кальцинированной соды; области рационального использования; способы утилизации; рекультивация почв; экологическая безопасность

Финансирование
Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект FSNF-2025-0011.

Поступила: 18.01.2026 ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 16.10.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

Аммиачный способ получения кальцинированной соды, разработанный бельгийским ученым-химиком и предпринимателем Э.Сольве в конце XIX в., широко используется во всем мире. В России на его долю приходится 80 % от всего произведенного объема соды.

Технологический процесс получения кальцинированной соды включает следующие стадии:

• Через насыщенный водный раствор хлорида натрия пропускают газообразный аммиак и диоксид углерода (реакция протекает при 30-40 °С):

$$NaCl + NH_3 + CO_2 + H_2O = NaHCO_3\downarrow + NH_4Cl.$$

• Выпавший осадок гидрокарбоната натрия (растворимость 9,6 г на 100 г воды при 20 °С) отфильтровывают и кальцинируют при 140-160 °С, в результате образуется карбонат натрия:

$$2NaHCO_3 = Na_2CO_3 + CO_2\uparrow + H_2O.$$

Образовавшийся CO_2 возвращают в производственный цикл.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• Раствор хлорида аммония обрабатывают гидроксидом кальция:

$$2NH_4Cl + Ca(OH)_2 = CaCl_2 + 2H_2O + 2NH_3\uparrow.$$

Полученный аммиак возвращают в производственный цикл.

В этом процессе на 1 т кальцинированной соды образуется большое количество отходов:

– около 9-10 м^3 дистиллерной жидкости состава: 110-120 г/л $CaCl_2$, 54-58 г/л NaCl, 21-26 г/л взвеси $Ca(OH)_2$, $CaSO_4$ и $CaCO_3$;

– около 50 кг шлама в результате получения известкового молока и золы топлива ($CaCO_3$, CaO);

– около 0,1 м^3 шлама в результате очистки рассола, который содержит 240-300 г/л взвеси $Mg(OH)_2$ и $CaCO_3$ [1].

Отходы содового производства могут быть опасны для окружающей среды, поэтому необходимо соблюдать экологические требования и нормативы при их обращении. В статье представлен обзор научных статьей и патентов, посвященных проблемам утилизации и переработки отходов содового производства.

Информационной базой исследования послужили научные электронные библиотеки: elibrary.ru, CyberLeninka, Академия Google, ScienceDirect, MDPI, Springer Nature Link, а также патентные базы данных ФИПС и Google Patents. Публикации отбирались по ключевым словам «кальцинированная сода», «отходы содового производства», «утилизация содовых отходов», «дорожное строительство», «рекультивация нарушенных земель». Использованы методы качественного анализа и сравнения.

Результаты исследования и обсуждение

Одним из первых зарубежных исследований по утилизации отходов содового производства является работа, опубликованная в материалах международного симпозиума, посвященного экологическим технологиям в развивающихся странах [2]. Отходы содового завода в г. Мерсин (Турция) предлагалось использовать в качестве строительного материала (известковое молоко, строительный раствор).

Рост публикаций о способах использования отходов производства соды начался в XXI в. Наиболее активно исследованиями в этой области занимаются ученые из Китая (более 700 работ), США (около 500), Индии (более 300) и Японии (более 200). Среди организаций в лидерах находятся: Государственный фонд естественных наук Китая, Департамент энергии США, Японское общество содействия науке и др. [3].

В Евросоюзе разработан Справочник (BREF) по наилучшим доступным технологиям (НДТ) для производства неорганических химических веществ в больших объемах[*], в котором описаны доступные технологии предотвращения и контроля загрязнения при производстве неорганических химических веществ в больших объемах с акцентом на твердые и другие сопутствующие продукты. BREF ориентирован на крупнотоннажное производство неорганических химических веществ, в результате которого получаются твердые продукты или используются другие процессы, не охватываемые другими BREF, такими как LVIC-AAF BREF (аммиак, кислоты и удобрения). Целью справочника является предоставление промышленным предприятиям основы для внедрения передовых методов минимизации воздействия своей деятельности на окружающую среду. НДТ – это наиболее эффективные и продвинутые технологии, которые являются принципиальной основой для оценки предельных значений выбросов или общего сокращения выбросов и воздействия на окружающую среду в целом.

Справочник содержит информацию:

• о конкретных процессах и технологиях, используемых при производстве различных неорганических твердых веществ;

• об экологических показателях существующих установок;

• о методах предотвращения и снижения воздействия на окружающую среду;

• об уровнях выбросов и потребления, связанных с НДТ;

[*] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Large Volumes Inorganic Chemicals – Solids and Others industry. URL: https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/lvic-s_bref_0907.pdf (дата обращения 16.03.2026).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• о требованиях к мониторингу;
• о влиянии на различные среды (воздух, вода, отходы).

В число примеров производимых химических веществ входит кальцинированная сода (карбонат натрия, включая бикарбонат натрия).

Справочник рекомендует предприятиям ряд процедур для снижения токсичности шламов перед их утилизацией или использованием. Промывка шлама водой приводит к понижению содержания растворимых солей, а сушка отходов облегчает их транспортировку и повторное использование. Перед сбросом дистиллерной жидкости в пресные водоемы рекомендуется ее первичная очистка с удалением крупных частиц. При сбросе в минерализованные водоемы (прежде всего в моря) осуществляется естественное разбавление и рассеяние взвешенных частиц. Кроме того, рекомендуется подземное захоронение отходов производства. К снижению токсичности отходов приводит выбор исходного сырья с низкой концентрацией тяжелых металлов.

Информационно-технический справочник по НДТ, изданный в России*, является документом по стандартизации, разработанным в результате анализа технологических, технических и управленческих решений, применяемых при производстве твердых и других неорганических химических веществ. В разделе 7 представлена информация по производству соды:

• описание технологического процесса, используемого в настоящее время;
• текущий уровень эмиссии в окружающую среду;
• определение наилучших доступных технологий;
• наилучшие доступные технологии;
• перспективные технологии.

Существенно новых технологий в производстве кальцинированной соды на основе аммиачно-содового метода с 1977 г. предложено не было, однако с учетом мирового опыта предложен ряд улучшений, направленных на снижение количества отходов:

• строительство отделения фильтрации дистиллерной жидкости, направленное на решение проблемы утилизации отходов содового производства;
• внедрение автоматизированной системы управления содовым производством для оптимизации управления технологическими процессами, экономии сырьевых и энергетических ресурсов;
• внедрение сушилки кипящего слоя для очищенного бикарбоната натрия, направленное на улучшение потребительских качеств пищевой соды;
• замена элементов колонного оборудования на модернизированное;
• расширение производства хлористого кальция с получением товарного продукта из стоков производства кальцинированной соды.

Российский опыт обращения с отходами содового производства, в том числе использование их ресурсного потенциала, отстает от европейского. Основные причины: относительно низкие цены на первичное природное сырье; неоднородность состава и свойств отходов; необходимость предварительной обработки отходов; низкий уровень экологических платежей для промышленных предприятий за размещение отходов [4]. Однако жесткие требования норм экологической безопасности к отходам производства кальцинированной соды и дорогое обслуживание отстойников стимулируют развитие способов их переработки. Выбор метода переработки дистиллерной жидкости зависит от ряда факторов: месторасположение завода, производственные площади, энергетические мощности, финансовое состояние компании [5].

В настоящей статье приведен обзор современных методов и технологий переработки и использования отходов содового производства.

Снижение токсичных свойств отходов

В статье [6] показаны исследования влияния способа обезвоживания на токсичность шламов. Обезвоживание шламов содового производства методом центрифугирования позволяет выделить мелкодисперсную фракцию (<0,5 мм; pH 8,3), которая обладает материальным потенциалом. Разделение обезвоженных шламов содового производства на различные фракционные группы позволяет подобрать способы для последующей переработки и утилизации. Например, обезвоженными шламами можно заменять до 3 % минерального порошка в составе горячих асфальтобетонных смесей.

* Производство твердых и других неорганических химических веществ. ИТС НДТ 19-2016. М.: Бюро НДТ, 2016. 314 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В статье [7] приведены результаты исследований процессов сорбции анионитом АВ-17-8: статическая сорбция хлорид-ионов из осветленной части дистиллерной жидкости и динамическая сорбция ионов кальция и хлора с последующей регенерацией анионита раствором гидроксида натрия. Полученные данные подтверждают возможность применения анионита для деминерализации дистиллерной жидкости, а также использование регенерирующих растворов для гашения извести.

Щелочные сточные воды, образующиеся в процессе производства соды, характеризуются высокой электролитической проводимостью и концентрацией ионов: хлоридов, сульфатов, фосфатов, кальция, натрия, магния, калия и аммония. В статье [8] приведены результаты исследования эффективности удаления ионов натрия, калия, кальция, магния и аммония из сточных вод тремя сорбентами: галосорбом, компактом и дамсорбом К. Процесс проводился динамическим методом с различным потоком сточных вод через колонну с сорбентом, что позволило снизить концентрации всех исследованных катионов. Установлено, что тип сорбента не оказывал существенного влияния на удаление каких-либо ионов, но осадочная нагрузка оказывала значительное влияние на удаление всех исследованных ионов

Технология переработки твердых отходов производства кальцинированной соды [9] предусматривает получение низкохлоридного шлама дистиллерной суспензии в процессе сгущения при карбонизации газом известковых печей с последующей обработкой содосодержащими растворами и фильтрацией. Полученную смесь дозируют, измельчают и сушат. Способ снимает все ограничения на применение шлама в производстве цемента.

В патенте [10] предложен способ переработки дистиллерной жидкости путем обработки соляной кислотой или хлороводородом при 20-100 °С, выделяющийся диоксид углерода возвращают в процесс. Изобретение позволяет получать соду без твердых отходов, а также дополнительное количество диоксида углерода, что снижает объем и щелочность дистиллерной жидкости, сбрасываемой в шламонакопители.

Использование отходов в строительной отрасли

Современные исследования показали, что использование шламов для получения строительных материалов ограничено наличием хлорид-ионов, малым размером частиц, тиксотропными свойствами материала и изменчивостью состава [6, 11, 12].

В статье [13] рассматривается опыт утилизации твердых и жидких отходов содового производства. Приведены результаты исследований и промышленного опыта производства: известково-белитового вяжущего и силикатного кирпича на его основе; известьсодержащего вяжущего и ячеистого бетона на его основе; тампонажного спеццемента; заполнителей для асфальтобетона; солевой композиции и других направлений.

Из отходов содового производства возможно получение геополимерного вяжущего, являющего экологически чистой альтернативой традиционным цементным вяжущим материалам [14]. Включение около 20 % отхода обеспечивает образцам максимальную прочность на сжатие при разработанных способах отверждения. Добавление отхода приводит к меньшей усадке, большему количеству макропор, более раннему набору прочности и более плотной микроструктуре геополимерного камня. Доказано, что улучшение физических, механических и микроструктурных характеристик геополимерных материалов путем включения отхода является осуществимым и эффективным, обеспечивает защиту окружающей среды за счет утилизации отходов.

Перспективно использование шламов дистиллерной жидкости в качестве добавки для получения алинитового цемента, индукционный период которого составлял около 15-20 мин, в отличие от портландцемента, гидратация практически не прекращается в течение этого периода [15].

Разработан тампонажный раствор, содержащий цемент, остаток от прокаленной при 550-650 °С дистиллерной жидкости, микросферы нерасклассифицированные при следующем содержании компонентов, мас.%: цемент – 43,5-62,5; дистиллерная жидкость – 0,7-6,2; микросферы – 6,5-19,9; вода – остальное. Тампонажный раствор обладает пониженной плотностью и водоотделением, а сформированный цементный камень характеризуется повышенной прочностью [16].

Для цементирования скважин в мерзлых породах месторождений Крайнего Севера предложена рецептура тампонажного раствора из безгипсового вяжущего, содержащего помимо клинкера CaO (отход содового производства, 10 % от содержания клинкера), нитрилметиленфосфоновую кислоту

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

(0,10-0,13 %) и Na_2CO_3 (3,8-5,0 %). Показано, что все важные с точки зрения практического применения характеристики камня, сформированного из этого тампонажного раствора, в 2-4 раза превышают характеристики вяжущих композиций на основе портландцемента с добавкой $CaCl_2$ [17].

В статье [18] приведены результаты исследований влияния тонкодисперсных твердых отходов содового производства (ТОСП) на свойства силикатного материала и получение вяжущего на их основе. Установлен состав цементирующего соединения автоклавных силикатных материалов на основе ТОСП. Кроме силикатного кирпича и ячеистого бетона, отходы производства соды можно использовать и для получения других видов строительных материалов в качестве минерального порошка для асфальтобетонных смесей, компонента комплексных добавок в производстве различных строительных материалов на цементной основе.

В Китае отходы производства соды после смешивания с другими материалами предлагается использовать в качестве отсыпки грунтового основания. Подробно изучены прочностные характеристики смесей и доказано, что зольная пыль и известь, смешанные с содовыми отходами в соотношении 3:7, в 6,5 раз повышают прочность исходного материала. Микроструктура содовых отходов аналогична почве, а гранулометрический состав хорошо подходит для смешивания с другими материалами, которые используются в качестве грунтового основания [19].

Для улучшения свойств сырья при изготовлении керамических изделий используются методы модификации, включая введение технологических добавок природного и антропогенного происхождения [20]. Показана возможность модификации глиняного сырья путем введения 5-10 % обезвоженного остатка отходов производства технической кальцинированной соды аммиачным методом, который содержит 7,49 % натрия, 0,17 % калия, 3,27 % магния, 25,95 % кальция, 13,08 % ионов хлора, 85 мг/кг ванадия. Минеральный состав глинистого материала, %: монтмориллонита – 13, хлорита – 10, каолинита – 8, кварца – 54, полевого шпата – 11, слюды – 4. Добавление обезвоженного остатка к глиняному сырью не меняет класс его чувствительности к сушке. Лабораторные образцы керамики, обожженной при 1000 °С, обладают улучшенными прочностными и теплоизоляционными характеристиками. Прочность на сжатие керамики на 8-26 % выше, средняя плотность на 0,16-0,31 г/см^3 ниже, а пористость на 5,7-7,8 % выше. Увеличение прочности керамики обусловлено ее структурными особенностями, связанными с образованием при обжиге анортитовой фазы (66 %). Техногенная добавка содержит много кальция, который участвует в процессах, происходящих при обжиге, включая образование анортита. Из модифицированного сырья можно производить стеновые керамические изделия (кирпич, камен) с эксплуатационными характеристиками, отвечающими требованиям научно-технической документации.

Авторами статьи [21] разработан новый экологически чистый и низкоуглеродистый цементный материал SR-GGBS-PG, полностью состоящий из твердых отходов содового производства (SR) и фосфогипса (PG) в качестве синергетических активаторов для молотого доменного шлака (GGBS). Исследовано влияние соотношение SR/GGBS и содержание PG на текучесть пасты, время схватывания, величину pH и прочность на сжатие. При массовом соотношении SR, GGBS и PG 10:81:9 прочность на сжатие через 28 дней достигла 46,15 МПа. Проведены исследования макроскопических свойств, минерального состава и продуктов гидратации. Обосновано эффективное использование различных твердых отходов для разработки экологически чистых строительных материалов.

На основе анализа условий образования и физико-химических свойств отхода содового производства представлен обзор способов его применения в строительных материалах, включая цементы, кирпич и материалы для дорожного основания [22]. Рассмотрены риски и проблемы, связанные с использованием отхода в строительных материалах. Установлено, что отход обладает высокими щелочностью и содержанием кальция, малым размером частиц и большой удельной поверхностью, что делает его перспективным сырьем в строительной отрасли. Ограничением в использовании отхода является высокая концентрация хлорид-ионов, которые могут снижать долговечность строительных материалов. В настоящее время отсутствуют эффективные и экологически безопасные методы удаления Cl^-. Изучение сочетания использования отхода с методами секвестрации углерода и компьютерными моделями является перспективным направлением исследований, которое ускорит разработку и внедрение этих материалов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Отход содового производства в основном состоит из $CaCO_3$, который является сырьем для производства портландцемента, составляет более 80 мас.%. Авторы [23] исследовали химический состав, физические свойства и механизм гидратации образцов портландцемента, полученных при использовании отхода с различным содержанием Cl^-. Результаты показали, что промывка водой приводит к снижению содержания Cl^- до 0,26 мас.%. Установлено, что портландцемент с содержанием твердого отхода 25,64 мас.% соответствует стандартным требованиям к цементу ЦЕМ I 52.5H по прочности на изгиб и сжатие. Коэффициент проницаемости увеличился от $186{,}27 \cdot 10^{-13}$ до $8{,}65 \cdot 10^{-13}$ м/с, а потери массы и прочности на сжатие снизились до 6,53 и 7,33 % соответственно. Доказано, что применение твердого отхода содового производства в качестве заменителя известняка выгодно для снижения объемов отходов и сокращения добычи известняка.

В работе [24] изучена возможность использования отхода содового производства для получения безклинкерного бетона путем смешения с металлургическими шлаками. Такой строительный материал может заменить традиционные бетоны, тем самым снижая выбросы CO_2 при производстве клинкера. В качестве цементирующих материалов использовали отход содового производства (ASR), молотый доменный шлак (GGBS), сталеплавильный шлак (SS) и гипс, образующийся при десульфуризации дымовых газов (FGD), в качестве заполнителей – отходы железорудных хвостов. Согласно результатам испытаний ASR может снизить текучесть бетона и сократить время начального и конечного схватывания. Кроме того, прочность на сжатие бесклинкерного бетона с цементным материалом, состоящим из 6 % ASR, 62 % GGBS, 20 % SS и 12 % FGD, достигала 36,29 и 66,31 МПа через 3 и 360 дней соответственно, увеличиваясь на 32 и 27 % по сравнению с контрольным образцом. Информация о теплоте гидратации и пористости полученных материалов подтвердила, что ASR ускоряет реакцию гидратации цементных материалов, уменьшая объем пор 20-50 нм в затвердевших пастах, но увеличивая объем пор > 50 нм. Концентрации Cl^- в бетоне с 6 % ASR в цементном материале составили $2{,}69 \cdot 10^{-3}$ и $1{,}24 \cdot 10^{-3}$ г/г через 3 и 360 дней соответственно. Бетоны с содержанием ASR менее 6 % пригодны для изготовления железобетонных конструкций, что подтверждается испытаниями на коррозию арматуры. Оценка механизмов гидратации и характеристик цементных материалов на основе ASR-GGBS-SS-FGD показала, что хлориды и карбонаты в ASR ускоряли процесс гидратации. Проведенные исследования являются основой для использования многокомпонентных твердых отходов.

Использование отходов в дорожном строительстве

Дорожное строительство является одним из наиболее перспективных с точки зрения объемов утилизации и использования отходов содового производства без дополнительной санации. Процесс переработки относительно недорогой и достаточно простой с технико-технологических позиций, однако отходы должны обладать необходимыми прочностными характеристиками [25]. Предложено использовать шлам без дополнительной очистки вместо глины для изготовления покрытий на грунтовых дорогах. Сравнение гранулометрических составов шлама и местной глины показало их идентичность по мелким фракциям. Анализ зависимости плотности образцов шлама от доли мелких частиц показал, что очистка слабо влияет на плотность шлама. При изучении влияния влажности на плотность образцов установлено, что максимальная плотность достигается при влажности ~19 %, что соответствует естественной влажности содовых шламов. Установлено, что использование полимерного стабилизатора M_{10+50} в количестве ~0,08 мас.% повышает плотность образцов шлама в ~1,4 раза. Исследование влияния минерального состава на прочность образцов показало, что если твердая фаза смеси состоит на ~50 % из содового шлама, ~25 % глины и ~25 % щебня, то при добавлении 0,08 мас.% стабилизатора M_{10+50} ее прочность достигает 11-12 МПа, что сопоставимо с прочностью бетонов марок М100/М150. Экономия от использования содовых шламов в дорожном строительстве может составить около 2 млн руб. на 1 км дороги шириной 8 м при толщине покрытия 10 см.

Для оценки экономической целесообразности использования отходов содового производства в дорожном строительстве в статье [26] сопоставлены затраты на возведение дорожных одежд для 1 км дороги шириной полотна 8 м и толщиной накладываемого покрытия 10 см по традиционной и предлагаемой технологиям. Сравнительный анализ смет на строительство дорог показал, что использование отходов позволяет получить экономию около 2 млн руб. на каждый километр

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

трассы в текущих ценах. Причем основная экономия приходится на материалы, применяемые в строительстве. Не менее значительным эффектом будет снижение темпов заполнения шламонакопителей. Использование отходов содового производства в дорожном строительстве технически возможно и экономически выгодно. Их применение в дорожном покрытии на грунтовых дорогах позволит не только оптимизировать расходование природных ресурсов, но и сократить крупные техногенные образования на территории Верхнекамья.

Отходы содовой промышленности могут применяться в качестве изолирующего материала при создании площадок складирования твердых бытовых отходов [27]. Механическое обезвоживание исходного отхода позволяет не только решить технологическую проблему его укладки, но и снижает класс опасности с 4 до 5. Получена грунтовая смесь (LSRSS) путем модификации глины добавлением обезвоженного отхода содового производства (ОС) и небольшого количества извести для дальнейшей стабилизации. Проведен комплекс исследований, включающий тестирование механических свойств в лабораторных условиях, изучение механизма и полевой проверки для оценки эксплуатационных характеристик. Результаты определения предела прочности при одноосном сжатии (UCS), калифорнийского коэффициента несущей способности (CBR) и модуля упругости (MR) показали, что с увеличением содержания ОС значения показателей сначала возрастали, а затем снижались, достигая пиковых значений 0,62 МПа, 65,0 % и 78,83 МПа соответственно при содержании ОС 30 %. Оптимальное соотношение компонентов в LSRSS: 6 % извести, 30 % ОС и 70 % глины. Значения UCS, CBR и MR увеличивались с повышением степени уплотнения, а затем снижались с увеличением содержания воды. Максимальные значения соответствовали 27 %, что является подходящим для применения LSRSS в реальных грунтовых основаниях. Результаты полевых испытаний показали, что значения UCS, CBR и MR составили 0,85 МПа, 86,5 % и 135,7 МПа соответственно; долговременные эксплуатационные характеристики дорожного покрытия были превосходными. Результаты подтверждают отличные эксплуатационные характеристики и закладывают прочную основу для широкого применения грунтовых оснований LSRSS.

Переработка отходов в химические соединения

В статье [28] предложено применение раствора на основе дистиллерной жидкости в качестве хладоносителя в системе теплообмена при производстве соды. Введение в систему дихромата калия предотвращает коррозию труб. Изучение фазовых равновесий в системе $CaCl_2 – K_2Cr_2O_7 – H_2O$ позволило разработать два состава хладоносителя:

- в интервале от –7 до 50 °С: $K_2Cr_2O_7$ – 3; $CaCl_2$ – 10,2; H_2O – 86,8 %;
- в интервале от 20 до 60 °С: $K_2Cr_2O_7$ – 6; $CaCl_2$ – 10; H_2O – 84 %.

В ряде работ показана возможность использования дистиллерной жидкости в качестве противогололедного материала [29, 30].

Исследование китайских ученых показало возможность получения ультратонкого карбоната кальция из дистиллерной жидкости [31]. Продукт можно использовать в качестве наполнителя в резиновой и лакокрасочной промышленности.

Из дистиллерной жидкости выпариванием можно получить гидроксид кальция и натрия, а также соляную кислоту [32, 33]. Процесс включает обработку дистиллерной жидкости гидроксидом натрия для осаждения нерастворимого гидроксида кальция. После отделения осадка фильтрат, содержащий в основном хлорид натрия, подвергают обработке в трехкамерном мембранном электролизере. Данный технологический процесс можно организовать без использования дополнительных химических реагентов.

Разработан процесс переработки дистиллерной жидкости в пероксид кальция (CaO_2), который используется в рыбоводстве, птицеводстве, аграрной промышленности и др. в качестве источника аэрации [34-36]. Установлены оптимальные условия процесса, позволяющие получать продукт с содержанием основного вещества 87,29-88,13 мас.%.

Разработан конверсионный процесс получения формиата кальция из формиата натрия, хлорида или нитрата кальция [37, 38]. Формиат натрия является побочным продуктом производства пентаэритрита [39, 40]. Доказана целесообразность использования отхода содового производства (32 % раствора хлорида кальция, ГОСТ 450-77 с изм. № 1-3). Максимальный выход формиата

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

кальция 77-79 %, содержание основного вещества не менее 99 %, что соответствует предлагаемому на рынке продукту (ТУ 6-09-11-1149-78). Возможное загрязнение формиата кальция хлоридом натрия не ограничивает его применение в пищевой и косметической отрасли. Одним из преимуществ разработанного технологического процесса является то, что конверсионный способ получения солей используется в промышленности, например, при производстве нитрата и дихромата калия.

В таблице показаны некоторые методы переработки дистиллерной жидкости в химические соединения [5].

Методы переработки дистиллерной жидкости в химические соединения

Способ переработки	Достоинства	Недостатки
Получение безводного пероксида кальция	Получение в виде товарного продукта пероксида кальция	Использование реагентов: пероксида водорода и раствора аммиака; образование сточных вод, содержащих хлориды аммония и натрия
Получение хлорида кальция	Получение в виде товарного продукта хлорида кальция	Многостадийность производства; сложное технологическое оборудование; большие энергозатраты
Получение гидроокиси кальция, гидроокиси натрия и хлора	Более простой способ переработки; снижение энергозатрат; получение гидроокиси кальция, гидроокиси натрия и хлора в виде товарных продуктов; получение воды, очищенной от хлорида кальция и натрия	Сложное технологическое оборудование
Получение формиата кальция	Получение формиата кальция в виде товарного продукта. Температурный режим процесса 22±2 °С; использование исходных солей в кристаллическом или растворенном виде	Утилизация маточного раствора после выделения целевого продукта

Использование отходов для рекультивации почв

Одним из перспективных методов защиты и очистки природных объектов от загрязнений является применение геохимических барьеров. Геохимические барьеры – это участки земной коры, в которых на коротком расстоянии происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрации [41]. В природе происходят процессы, приводящие к герметизации пористых горных пород, трещин и стыков грунтовых образований, что позволяет приостановить приток рассолов в шахты или изолировать особо загрязненные участки. Кристаллизация или осаждение играют главную роль в этих процессах. Образование карбоната и сульфата кальция (гипса), сульфата бария во многих случаях приводит к полной остановке притока воды и рассола. Проведенные исследования доказывают, что копирование природных процессов может быть успешно использовано при решении экологических проблем [42].

В патенте [43] предлагаются два состава для снижения водопроницаемости горных пород, включающие структурообразователь – водный раствор хлорида кальция и осадитель – водный раствор сульфата натрия плюс добавки. В качестве источника хлорида кальция использовался отход производства АО «Березниковский содовый завод». Способ тампонирования водопроницаемых участков или зон в соляных горных породах включает вскрытие зон повышенной водопроницаемости тампонажными скважинами, подготовку на поверхности соляных растворов, при необходимости их подогрев и закачку в зону тампонирования. В первом варианте закачку растворов солей ведут в два этапа, на первом закачивают осадитель, на втором – структурообразователь. Во втором варианте равные объемы растворов структурообразователя и осадителя смешивают и закачку ведут в один этап. Техническим результатом является расширение арсенала средств для тампонирования, повышение надежности и качества тампонирования зон повышенной водопроницаемости горных пород.

Рекультивация почв отходом содового производства для восстановления плодородия и улучшения свойств загрязненных или нарушенных почв включает технический этап – подготовка земель и внесение отходов, биологический этап – высаживание растений для восстановления растительного покрова. Шламы содового производства содержат соединения, которые могут выступать

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

в роли известковых мелиорантов и удобрений, улучшая структуру почвы и повышая ее плодородие. Этот подход помогает улучшить состояние почвы и устранить последствия ее загрязнения. Внесение отходов позволяет вернуть земли в состояние, пригодное для использования в сельскохозяйственных целях, и снизить затраты на рекультивацию.

Полевые опыты подтвердили, что внесение шлама в почву нормализует кислотность среды, положительно влияет на продуктивность зеленых насаждений на засоленных почвах [44]. При совместном использовании шламов и осадков сточных вод в соотношениях 1:2 и 1:1 получен материал, характеризующийся новыми физико-химическими свойствами, пригодный для биологической рекультивации [8].

В патенте [45] предложен материал для биологической рекультивации нарушенных земель, включающий шлам содового производства фракции менее 0,5 мм, полученной в результате центрифугирования водных вытяжек с pH 8,2-8,5, и обезвоженный активный ил или его смесь с осадком первичных отстойников городских хозяйственно-бытовых стоков, стабилизированный в естественных условиях от 1 до 10 лет, содержащий, мас.%: органические вещества 49-67; минеральные вещества 33-51, в том числе общий азот до 5,7, фосфор до 7,4. Массовое соотношение шлама и активного ила 2:1-1:1.

Использование отходов производств, в том числе содового, актуально для нейтрализации кислых шахтных вод (КШВ) и последствий их возникновения. Основными причинами образования кислоты является наличие сульфидных минералов, окислителя (кислород атмосферы и химические источники) и воды. Добыча нефти, металлургия и строительство туннелей чаще всего являются причиной возникновения КШВ [46, 47]. Разработка месторождений минералов, содержащих золото, медь, никель, другие металлы, и угля связана с проблемами кислотного дренажа, которые могут вызвать долгосрочное ухудшение состояния биогеоценозов, что приводит к снижению биоразнообразия, ухудшению здоровья человека [48], качества сельскохозяйственной продукции [49]. Воздействие на окружающую среду КШВ можно минимизировать контролем процесса образования кислоты и ее дальнейшей миграции, а также сбором и очисткой сточных вод [50-52].

Наиболее распространенным методом нейтрализации кислых стоков является их обработка известняком, гашеной известью, кальцинированной и каустической содой, аммиаком, перекисью кальция, печной пылью и летучей золой [53-55]. Нейтрализующие агенты повышают pH стоков, ускоряют окисление иона Fe^{2+} и обеспечивают выпадение осадка гидроксидов и карбонатов многих металлов [50, 56], что предотвращает дальнейшую миграцию. Образование буферного раствора при использовании известняка затрудняет повышение pH > 6. Он неэффективен в воде с высоким содержанием иона Fe^{2+}, процесс применения более сложен, чем при использовании извести.

Кислые шахтные воды являются причиной образования техногенных почв, которые характеризуются кислой реакцией среды и повышенным содержанием сульфатов и микроэлементов в поверхностном слое [57-59]. Рекультивация техногенных кислых почв возможна с применением пассивных или активных методов, включающих применение отходов содового производства [60]. Установлено, что соблюдение дозировок внесения не оказывает негативного влияния на сельскохозяйственную продукцию.

Отходы содового производства используются для рекультивации почв в Корее [61]. Известковый кек и кальцит вносят слоями между угольными отходами и верхним слоем почвы, либо смешивают с верхним слоем почвы и угольными отходами. Обработка известковым кекком повысила pH угольных отходов с 3,5 до 6, фильтрата угольных отходов с 4,3 до 6,7. Увеличение pH позволило обеспечить прорастание семян на нарушенной территории.

Использование шлама содового производства в качестве биологической добавки для рекультивации нарушенных земель успешно реализовано на территории Кизеловского угольного бассейна (Пермский край) [62, 63]. Использовалось 10-40 кг/м^2 шлама, после вспашки 4-5 кг/м^2 активного ила очистных сооружений химического завода с последующим посевом семян растений. Состав шлама, мас.%: кальцит 79-97, арагонит 1-2, доломит до 1, кварц 1-8, остальное – вода. Состав активного ила, мас.%: минеральные вещества 53-78, органические вещества 22-47, в том числе общий азот до 3,6, фосфор до 4,8. Для посева использовали канареечник тростниковидный, клевер луговой, люцерну посевную и пырей ползучий.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В статьях [64, 65] приведены данные о свойствах почвы на участке стока кислых шахтных вод, рекультивированном около 20 лет назад. В настоящее время на участке обнаружен устойчивый фитоценоз, представленный молодыми березами (род *Betula*), ивами (род *Salix*) и ольхой (род *Alnus*), а также травянистыми растениями семейств осоковые (род *Carex*), злаковыми *Poaceae*, кипрейными *Onagraceae*, гвоздичными *Caryophyllaceae*, а также мхами. Почва имеет pH 5,3-4,4, содержание органического углерода до 19 % в верхнем слое (10 см). В нерекультивированной почве органического углерода 8 % и pH 3,0. Формирование устойчивого фитоценоза на рекультивированном участке свидетельствует об эффективности использованного способа. Проведенные мероприятия позволили создать устойчивый растительный покров на нарушенных землях, нейтрализовать их токсичность и утилизировать отходы химического производства. Экономические расчеты показали, что вторичное использования отходов существенно снижает затраты на выполнение восстановительных работ.

Собственные исследования авторов, проведенные в летний период 2025 г., показали эффективность применения мелиоранта на основе отходов содового производства на почвах рекультивированных отвалов Кизеловского угольного бассейна. Почвы отвалов глинистые, без гумусового горизонта, малоплодородные, кислые, количество NPK указывает на низкую обеспеченность элементами питания, растительность отсутствует или развита фрагментарно [66]. Внесение содового мелиоранта в почвы отвалов способствовало снижению кислотности, увеличению количества кальция и активности ферментов (каталаза, инвертаза) относительно фонового участка.

В работе [67] приведены результаты использования отхода содового производства в качестве химического мелиоранта на слабокислых почвах. Установлено, что внесение известкового мелиоранта способствовало снижению гидролитической кислотности слабокислой дерново-подзолистой почвы на 1,4-1,7 мг-экв/100 г. Это обеспечило увеличение урожая ячменя и картофеля более чем на 20 %. Доказано, что применение мелиоранта снижает почвенную кислотность более эффективно, чем стандартные известковые реагенты.

Применение отходов содового производства показало их результативность в качестве мелиоранта для почв горнодобывающих ландшафтов. Однако их использование в сельском хозяйстве должно предваряться определением химических и токсикологических характеристик, а также подбором дозы внесения в зависимости от содержания основных компонентов.

В статье [68] приведены результаты разработки субстрата из отходов производства соды и марганца (SRMn) и оценена его эффективность для очистки сточных вод пресноводных рыбоводческих хозяйств в искусственном водно-болотном комплексе (SRMn-CW). Основное внимание уделено проблеме удаления тетрациклина (TC) и общего фосфора (TP), а также влиянию субстрата на ряд факторов и динамику микробного сообщества. SRMn-CW эффективно обеспечивал одновременное и стабильное удаление TC и TP с эффективностью 80,27 и 91,12 % соответственно. Даже при высокой концентрации загрязняющих веществ и изменяющихся условиях pH SRMn-CW эффективность удаления TP выше 86,63 %, а TC – 71,42 %. Полученные результаты расширяют области применения отходов содового производства для очистки сточных вод пресноводных аквакультурных хозяйств.

Искусственные водно-болотные угодья (ИВУ) представляют собой перспективные объекты для очистки кислых шахтных стоков [69]. Экстремальная кислотность и высокая концентрация тяжелых металлов в КШВ могут привести к разрушению ИВУ без их предварительной обработки. Для улучшения субстрата ИВУ использовали композиты из аттапульгита и отхода содового производства (ОСС). По сравнению с заполненными гравием (ИВУ-Г) эффективность удаления сульфатов и Fe, Mn, Cu, Zn, Cd и Pb в ИВУ, заполненных композитами ОСС (ИВУ-ОСС), увеличилась на 30 и 10-70 % соответственно. Металлы удерживались в субстрате в виде карбонатов, Fe/Mn (оксидов) гидроксидов и сульфидов. В ИВУ-ОСС наблюдался более высокий уровень фотосинтетических пигментов и активности антиоксидантных ферментов в растениях, а также более богатое микробное сообщество, чем в ИВУ-Г. Применение композитов из аттапульгита и отхода содового производства смягчило неблагоприятное воздействие стресса, вызванного кислотными дренажными водами, на болотные растения и микроорганизмы. В свою очередь, увеличение численности бактерий, особенно сульфатредуцирующих родов (*Thermodesulfovibrionia* и *Desulfobacca*), способствовало образованию сульфидов металлов, что позволило ООС регенерировать и улавливать

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

тяжелые металлы. Синергетическая адсорбция композитов ОСС и микробное восстановление сульфатов поддерживали стабильную и эффективную работу ИВУ. Таким образом, подтверждена возможность использования промышленных отходов и создание новых недорогих и пассивных систем очистки.

Комплексная переработка отходов

В статье [70] представлен обзор свойств отхода производства соды, включая его опасность, применение в экологическом менеджменте (очистка сточных вод, десульфурация дымовых газов и рекультивация почв), а также связанные с этим риски. Проанализированы ограничения использования отхода в технологиях «отходы в отходы». На основе проведенного анализа предложена разработка комплексных технологий, включающих безопасную утилизацию и извлечение ресурсов из загрязненного металлами шлама, эффективное дехлорирование и использование шлама для рекультивации загрязненной почвы, контроль загрязнения с помощью экологически чистых способов переработки, а также оценки долгосрочного риска.

В статье [71] рассмотрены потенциальные преимущества, ограничения и перспективы технологий переработки отходов содового производства. Инновационная технология направлена на разделение, очистку и повторное использование твердых, жидких и газообразных побочных продуктов, обеспечивая более устойчивый и экономически эффективный подход. Внедрение этой технологии может значительно снизить воздействие производства кальцинированной соды на окружающую среду, способствуя при этом развитию экономики замкнутого цикла. Однако сохраняются такие проблемы, как высокие первоначальные затраты и технические барьеры для интеграции.

Результаты пилотных испытаний демонстрируют потенциал технологии в сокращении образования отходов, извлечении ценных ресурсов и минимизации вредных выбросов при одновременном повышении экономической эффективности производства кальцинированной соды. Ключевые достижения технологии:

- сокращение общего количества промышленных отходов на 70 %;
- эффективная переработка твердых, жидких и газообразных побочных продуктов;
- высокий уровень извлечения ресурсов, особенно оксида кальция, аммиака и бикарбоната натрия;
- сокращение потребления воды на 60 % благодаря эффективной очистке;
- сокращение потребления энергии на 25 %.

Для переработки твердых отходов рассматривались такие процессы, как пиролиз, термическое разложение и химическая нейтрализация. Для очистки сточных вод – сочетание методов фильтрации, нейтрализации и ионного обмена. Для улавливания и нейтрализации вредных газообразных выбросов – современные скрубберы и каталитические нейтрализаторы. Разработанная система позволяет восстанавливать такие ценные ресурсы, как аммиак, бикарбонат натрия и карбонат кальция.

В статье [72] рассмотрена эволюция методов производства кальцинированной соды. Анализируются экологические и экономические проблемы традиционных методов, включая высокое энергопотребление, загрязнение окружающей среды и образование отходов. Рассматриваются перспективные альтернативы, такие как модифицированные методы Э.Сольве с использованием внешних источников CO_2, и многообещающее новое производство с использованием микроорганизмов. Подробно показаны методы повторного использования отходов (CaO, гидроксиды и CO_2), хотя в результате может образовываться соляная кислота как побочный продукт. Основное внимание уделяется потенциалу инновационных методов, основанных на физических и биологических процессах, для повышения эффективности, снижения воздействия на окружающую среду и снижения энерго- и ресурсопотребления.

В работе [73] оцениваются шесть электрохимических альтернатив процессу Э.Сольве с упором на их энергоэффективность и экономическую целесообразность. Процессы включают стадию производства NaOH путем хлорщелочного электролиза или электродиализа с биполярными мембранами, стадию концентрирования с механической компрессией пара, карбонизацию NaOH с помощью CO_2 в барботажной колонне, кристаллизацию $NaHCO_3$ или $Na_2CO_3 \cdot H_2O$ и прокалку солей до Na_2CO_3. Результаты указывают на снижение энергозатрат на 14-45 % для пяти исследованных

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

конфигураций по сравнению с традиционным процессом. Установлено, что электроэнергия может заменить ископаемое топливо в качестве основного источника для производства соды. При 25-летнем сроке службы установки с производительностью 1000 т Na_2CO_3 в сутки процессы, основанные на электролизе, демонстрируют экономическую эффективность при чистых производственных затратах от 0,31 до 0,37 евро/кг Na_2CO_3. Процессы, включающие электродиализ, как правило характеризуются значительно более высокими производственными затратами. Однако проведенный анализ показывает, что экономическая эффективность может быть достигнута при снижении затрат на электроэнергию и валоризации низкоконцентрированного побочного продукта – соляной кислоты.

В работе [74] описан высокоэффективный электрохимический метод утилизации дистиллерной жидкости с получением $Ca(OH)_2$, NaOH и HCl. Предложен процесс, состоящий из двух стадий. На первой стадии производится обработка дистиллерной жидкости щелочью с получением $Ca(OH)_2$ и фильтрата, содержащего NaCl. На второй стадии фильтрат перерабатывается в мембранном электролизере с получением растворов NaOH и HCl. Показано, что процесс обработки дистиллерной жидкости щелочью необходимо осуществлять при мольном отношении $CaCl_2$: NaOH, равном 1:1,25. Переработка фильтрата в мембранном электролизере позволяет получить NaOH с концентрацией до 4320 г/л и HCl с концентрацией 148 г/л.

В настоящее время существуют товарные продукты, полученные путем переработки дистиллерной жидкости, отвечающие требованиям государственных стандартов: мелиорант для известкования кислых и солонцовых почв (ТУ 6-18-37-85); комплексные минеральные добавки для балансирования рационов сельскохозяйственных животных (ТУ 6-18-3-80) и сельскохозяйственной птицы (ТУ 6-18-25-079); силикатный кирпич на основе белитового вяжущего; хлористый кальций технический (ГОСТ 450-77).

Заключение

Аммиачный способ получения кальцинированной соды является основным во всем мире. Существенный недостаток – отходы производства, опасные для окружающей среды. Несмотря на широкой спектр возможностей применения отходов, проблема их утилизации остается актуальной. Это обусловлено объемами производства соды и образующихся отходов, а также необходимостью финансовых вложений на внедрение способов утилизации. Повышение требований норм экологической безопасности к отходам и дорогое обслуживание отстойников стимулируют развитие способов их переработки, зависящих от месторасположения завода, производственных площадей, энергетических мощностей, финансового состояния компании.

В литературе описаны способы снижения токсичности шламов, использования отходов в строительстве, включая дорожное, переработки в химические соединения. Перспективным направлением является использование шламов для рекультивации почв. Практически в каждом случае существуют определенные ограничения при внедрении разработанных решений. Например, применение шламов в строительных материалах ограничено наличием хлорид-ионов, малым размером частиц, тиксотропными свойствами материала и изменчивостью состава шлама. Дорожное строительство является наиболее перспективным с точки зрения объемов утилизации отходов без дополнительной санации. Применение отходов для рекультивации земель требует избирательного подхода к выбору объектов и проведения дополнительных исследований. Публикации показывают, что отходы содового производства представляют ценное сырье для восстановления поврежденных земель, а также для повышения плодородия и устойчивости почв, в том числе сельскохозяйственных. При этом важно учитывать их химические характеристики и подбор оптимальных дозировок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зайцев И.Д., Ткач Г.А., Стоев Н.Д.* Производство соды. М.: Химия, 1986. 312 с.
2. *Yeginobali A.* Studies on the Possible Uses of Soda Industry Waste as a Construction Material // Appropriate Waste Management for Developing Countries. Springer, 1985. P. 101-109. DOI: 10.1007/978-1-4613-2457-7_8
3. *Красильникова С.А., Блинов С.М., Красильников П.А., Белкин П.А.* Мировой опыт использования отходов производства соды // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 12. С. 48-53. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-12-48-53
4. *Пугин К.Г., Пугина В.К.* Особенности использования ресурсного потенциала отходов производства для получения строительных конструкций и материалов // Фундаментальные исследования. 2016. № 9. С. 289-293.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

5. *Касьянов В.К., Аверина Ю.М., Меньшиков В.В., Стрельникова А.С.* Методы переработки дистиллерной жидкости как отхода производства кальцинированной соды аммиачным способом // Sciences of Europe. 2018. № 28. С. 12-15.

6. *Калинина Е.В., Рудакова Л.В.* Снижение токсичных свойств шламов содового производства с последующей их утилизацией // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 6. С. 85-96.

7. *Курбангалеева Л.Р., Даминев Р.Р.* Использование ионнообменных смол при деминерализации жидких отходов производства кальцинированной соды // Вестник Башкирского университета. 2010. Т. 15. № 4. С. 1150-1152.

8. *Gołub A., Piekutin J.* Removal of inorganic impurities from wastewater after production of soda ash on selected sorbents // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. № 4624. DOI: 10.1038/s41598-020-61429-w

9. *Сабитов К.Б., Воронин А.В.* Перспективы использования твердых отходов производства кальцинированной соды АО «БСК» в качестве карбонатной составляющей сырья для производства цемента // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2016. Т. 21. № 3 (83). С. 86-95.

10. *Загидуллин Р.Н., Загидуллина Г.Р., Мухаметов А.А.* Патент № 2589483 РФ. Способ переработки дистиллерной жидкости содового производства аммиачным методом. Опубл. 10.07.2016. Бюл. № 19.

11. *Лотош В.Е.* Безобжиговое окускование тонкодисперсных материалов и мелочи полезных ископаемых. Екатеринбург: Филантроп, 2009. 525 с.

12. *Латыпова З.Б., Халиков Р.М., Глазачев А.О., Давлетбердин Д.Д.* Геоэкологические аспекты применения известьсодержащих крупнотоннажных отходов содового производства в Башкортостане // Проблемы региональной экологии. 2023. № 4. С. 68-72. DOI: 10.24412/1728-323X-2023-4-68-72

13. *Серпичев А.С., Сычева Л.И.* Использование техногенных отходов при получении белитсульфоалюминатного цемента // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 34. № 3. С. 130-133.

14. *Xianhui Zhao, Chunyuan Liu, Li Wang et al.* Physical and mechanical properties and micro characteristics of fly ash-based geopolymers incorporating soda residue // Cement and Concrete Composites. 2019. Vol. 98. P. 125-136. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.02.009

15. *Uçal G.O., Mahyar M., Tokyay M.* Hydration of alinite cement produced from soda waste sludge // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 164. P. 178-184. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.196

16. *Каримов Н.Х., Агзамов Ф.А., Акчурин Х.И. и др.* Патент № 2136845 РФ. Тампонажный раствор. Опубл. 10.09.1999.

17. *Шатов А.А., Дрямина М.А.* Специальные тампонажные композиции для низкотемпературных скважин на основе вторичных материальных ресурсов соды // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. Т. 13. № 5. С. 663-667.

18. *Джандуллаева М.С., Атакузиев Т.А.* Физико-механические свойства силикатных материалов на основе твердых отходов содового производства // Химическая промышленность. 2017. Т. 94. № 1. С. 31-33.

19. *Hai-lei Kou, Wen-gang Zhang.* Strength Characteristics of Soda Waste Treated with Fly Ash and Lime // Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 49. № 3. P. 1-3. DOI: 10.14456/seagj.2018.17

20. *Мингазова Г.Г., Корнилов А.В., Хацринов А.И.* Применение отхода производства кальцинированной соды для получения керамических материалов // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26. № 11. С. 87-91. DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_11_87

21. *Jiang Q., Zhan QW, Hu H.T., Wang X.Y.* Solid waste-based cementitious material for ground granulated blast furnace slag based on soda residue activation: Preparation, properties and mechanism // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. Iss. 6. № 120302. DOI: 10.1016/j.jece.2025.120302

22. *Zaihua Yang, Yongliang Chen, Quan Wang et al.* The utilization of ammonia soda residue in building materials: A review // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 98. № 111122. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111122

23. *Qiang Wang, Xianjun Lyu, Qing Liu et al.* Recycle of soda waste sludge as the limestone material for Portland cement: Chemical composition, physical properties and hydration mechanism // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 422. № 135790. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135790

24. *Dong Xu, Wen Ni, Qunhui Wang et al.* Ammonia-soda residue and metallurgical slags from iron and steel industries as cementitious materials for clinker-free concretes // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 307. № 127262. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127262

25. *Козлов С.Г., Вязовикова И.В., Черный С.А., Крепышева И.В.* Использование отходов содового производства в дорожном строительстве // Фундаментальные исследования. 2013. № 10. С. 2604-2611.

26. *Калинина Е.В.* Наилучшие доступные технологии утилизации шламов содового производства // Экология и промышленность России. 2013. № 11. С. 43-47. DOI: 10.18412/1816-0395-2013-11-43-47

27. *Xiaoqing Zhao, Tianfeng Yang, Jianzhuang Xiao et al.* Mechanical properties and field test of lime-soda residue stabilized soil for subgrade // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 419. № 135489. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135489

28. *Плотникова С.Е., Перегудов Ю.С., Горбунова Е.М., Нифталиев С.И.* Перспективы применения жидких отходов производства кальцинированной соды в качестве хладоносителя на основе тройной системы $CaCl_2$-$K_2Cr_2O_7$-H_2O // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 3. С. 233-238. DOI: 10.20914/2310-1202-2020-3-233-238

29. *Титов В.М., Воронин А.В., Шатов А.А. и др.* Патент № 2243248 РФ. Антигололедный состав. Опубл. 27.12.2004.

30. *Константинова М.С., Калинина Е.В.* Исследование возможности использования дистиллерной жидкости в качестве жидкого противогололедного материала // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. 2013. № 4. С. 134-143.

31. *Canzhu Gao, Yuan Dong, Hongjuan Zhang, Jiaming Zhang.* Utilization of distiller waste and residual mother liquor to prepare precipitated calcium carbonate // Journal of Cleaner Production. 2007. Vol. 15. Iss. 15. P. 1419-1425. DOI: 10.1016/j.jclepro.2006.06.024

32. *Курбангалеева Л.Р., Быковский Н.А., Даминев Р.Р.* Получение гидроксида кальция и соляной кислоты из дистиллерной жидкости // Башкирский химический журнал. 2012. Т. 19. № 2. С. 36-39.

33. *Быковский Н.А., Курбангалеева Л.Р., Даминев Р.Р.* Переработка дистиллерной жидкости с получением товарных продуктов // Фундаментальные исследования. 2012. № 6. С. 209-213.

34. *Бикбулатов И.Х., Насыров Р.Р., Даминев Р.Р., Бакиев А.Ю.* Способ утилизации основного отхода производства кальцинированной соды // Нефтегазовое дело. 2007. № 2. 9 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

35. *Насыров Р.Р., Даминев Р.Р.* Метод переработки основного отхода производства кальцинированной соды // Башкирский химический журнал. 2008. Т. 15. № 3. С. 95-100.

36. *Даминев Р.Р., Насыров Р.Р., Шарипов А.К.* Повышение экологической безопасности производства кальцинированной соды // Башкирский химический журнал. 2008. Т. 15. № 4. С. 28-30.

37. *Горденчук А.Д., Елохов А.М., Кудряшова О.С., Поляков А.Ю.* Патент № 2665469 РФ. Способ получения формиата кальция. Опубл. 30.08.2018. Бюл. № 25.

38. *Горденчук А.Д., Кудряшова О.С.* Конверсионный способ получения формиата кальция // Химическая технология. 2017. Т. 18. № 7. С. 291-295.

39. *Загидуллин С.Х., Даут В.А., Майер В.В. и др.* Патент № 2078758 РФ. Способ получения формиата натрия. Опубл. 10.05.1997.

40. *Самохвалов И.И., Авраменко Э.В., Бибакова Т.А., Кудряшова О.С.* Патент № 2440168 РФ. Способ переработки технического пентаэритрито-формиатного маточного раствора. Опубл. 20.01.2012. Бюл. № 2.

41. *Баюрова Ю.Л., Нестеров Д.П., Корнева Е.А. и др.* Искусственные геохимические барьеры для решения экологических и технологических задач // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16. № 3. С. 536-541.

42. Экологическая безопасность освоения месторождений полезных ископаемых / Под общ. ред. Е.А.Хайрулиной. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. 175 с.

43. *Кудряшова О.С., Хайрулина Е.А.* Патент № 2743977 РФ. Состав для снижения водопроницаемости горных пород (варианты) и способ тампонирования водопроницаемости участков горных пород. Опубл. 01.03.2021. Бюл. № 7.

44. *Манойло Е.В., Манойло Ю.А., Моисеев В.Ф.* Применение отходов содового производства // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 6. № 6 (48). С. 13-17.

45. *Калинина Е.В., Вайсман Я.И., Рудакова Л.В.* Патент № 2546155 РФ. Материал для биологической рекультивации нарушенных земель. Опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.

46. *Yu Yang, Bo Li, Tao Li et al.* A review of treatment technologies for acid mine drainage and sustainability assessment // Journal of Water Process Engineering. 2023. Vol. 55. № 104213. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104213

47. *Нуреев Р.Р., Пашкевич М.А., Харько П.А.* Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды // Геология и геофизика Юга России. 2022. Т. 12. № 4. С. 169-179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013

48. *Johnson D.B., Hallberg K.B.* Acid mine drainage remediation options: a review // Science of the Total Environment. 2005. Vol. 338. Iss. 1-2. P. 3-14. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.09.002

49. *Jianbo Liao, Zewei Wen, Xuan Ru et al.* Distribution and migration of heavy metals in soil and crops affected by acid mine drainage: Public health implications in Guangdong Province, China // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2016. Vol. 124. P. 460-469. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.11.023

50. *Akcil A., Koldas S.* Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies // Journal of Cleaner Production. 2006. Vol. 14. Iss. 12-13. P. 1139-1145. DOI: 10.1016/j.jclepro.2004.09.006

51. *Пашкевич М.А., Харько П.А.* Применение композитной смеси для очистки кислых дренажных вод хвостового хозяйства от металлов // Обогащение руд. 2022. № 4. С. 40-47. DOI: 10.17580/or.2022.04.07

52. *Яковлев Н.М., Смирнов Ю.Д., Матвеева В.А.* Разработка рецептуры сорбента на основе сапропеля для глубокой очистки кислых дренажных вод // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2026. № 3. С. 32-48. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_0_32

53. *Alakangas L., Andersson E., Mueller S.* Neutralization/prevention of acid rock drainage using mixtures of alkaline by-products and sulfidic mine wastes // Environmental Science and Pollution Research. 2013. Vol. 20. Iss. P. 7907-7916. DOI: 10.1007/s11356-013-1838-z

54. *Kefeni K.K., Msagati T.A.M., Mamba B.B.* Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 151. P. 475-493. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.082

55. *Hongping Chen, Yulu Ai, Yufei Jia et al.* Effective and simultaneous removal of heavy metals and neutralization of acid mine drainage using an attapulgite-soda residue based adsorbent // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 843. № 157120. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157120

56. *Tolonen E.-T., Sarpola A., Hu T. et al.* Acid mine drainage treatment using by-products from quicklime manufacturing as neutralization chemicals // Chemosphere. 2014. Vol. 117. P. 419-424. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.07.090

57. *Kostin A.S., Krechetov P.P., Chernitsova O.V., Terskaya E.V.* Data on physico-chemical characteristics and elemental composition of gray forest soils (Greyzemic Phaeozems) in natural-technogenic landscapes of Moscow brown coal basin // Data in Brief. 2021. Vol. 35. № 106817. DOI: 10.1016/j.dib.2021.106817

58. *Fernández-Caliani J.C., Barba-Brioso C., González I., Galán E.* Heavy Metal Pollution in Soils Around the Abandoned Mine Sites of the Iberian Pyrite Belt (Southwest Spain) // Water, Air, and Soil Pollution. 2009. Vol. 200. Iss. 1-4. P. 211-226. DOI: 10.1007/s11270-008-9905-7

59. *Mitrakova N.V., Khayrulina E.A., Poroshina N.V. et al.* Formation of Acid Sulfate Soils under the Influence of Acid Mine Waste in the Taiga Zone // Eurasian Soil Science. 2023. Vol. 56. Iss. 2 (Suppl.). P. S183-S193. DOI: 10.1134/S106422932360152X

60. *Xiao-bin Wang, Xiang Yan, Xiu-ying Li.* Environmental risk for application of ammonia-soda white mud in soils in China // Journal of Integrative Agriculture. 2020. Vol. 19. Iss. 3. P. 601-611. DOI: 10.1016/S2095-3119(19)62745-0

61. *Jae E. Yang, Skousen J.G., Yong-Sik Ok et al.* Reclamation of Abandoned Coal Mine Waste in Korea using Lime Cake By-Products // Mine Water and the Environment. 2006. Vol. 25. Iss. 4. P. 227-232. DOI: 10.1007/s10230-006-0137-z

62. *Блинов С.М., Хозяйкин А.И., Усольцева С.П., Доможирова С.А.* Патент № 2336684 РФ. Способ рекультивации нарушенных земель. Опубл. 27.10.2008. Бюл. № 30.

63. *Максимович Н.Г., Крюкова О.С.* Разработка процессов взаимной нейтрализации производственных отходов содового производства, кислых шахтных вод и шахтных отвалов для защиты окружающей среды региона // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 1. 8 с.

64. *Максимович Н.Г., Пьянков С.В.* Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь: Раритет-Пермь, 2018. 288 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

65. *Митракова Н.В., Хайрулина Е.А., Блинов С.М., Перевощикова А.А.* Эффективность рекультивации кислых сульфатных почв в районах угледобычи // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 266-278. DOI: 10.31897/PMI.2023.31

66. *Митракова Н.В., Хайрулина Е.А., Перевощикова А.А. и др.* Химико-экологические свойства почв и индекс NDVI на рекультивированных сернистоугольных отвалах бореальной зоны // Горные науки и технологии. 2024. Т. 9. № 4. С. 406-419. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-04-206

67. *Аканова Н.И., Орлов П.М., Недосеко И.В., Зинатуллин Р.Р.* Агроэкологическая оценка эффективности отхода содового производства в качестве химического мелиоранта для известкования кислых почв // Международный сельскохозяйственный журнал. 2023. Т. 66. № 3 (393). С. 301-305. DOI: 10.55186/25876740_2023_66_3_301

68. *Ye Yang, Binxiong Hu, Tao Li et al.* Application of soda residue based material in a vertical flow constructed wetland for the simultaneous removal of tetracycline and phosphorus from freshwater aquaculture effluent // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. Iss. 6. № 120119. DOI: 10.1016/j.jece.2025.120119

69. *Hongping Chen, Yufei Jia, Jing Li et al.* Enhanced efficiencies on purifying acid mine drainage in constructed wetlands based on synergistic adsorption of attapulgite-soda residue composites and microbial sulfate reduction // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 470. № 134221. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134221

70. *Yonglan Zong, Jiantao Gong, Jilai Zhang et al.* Research status of soda residue in the field of environmental pollution control // RSC Advances. 2023. Vol. 13. Iss. 41. P. 28975-28983. DOI: 10.1039/d3ra04863b

71. *Atamuratov T.J.* Creation of complex processing technology for industrial waste from soda ash production // Science and innovation. 2024. Vol. 3. Iss. 9. P. 39-46. DOI: 10.5281/zenodo.13828038

72. *Rahimpour H., Fahmi A., Zinatloo-Ajabshir S.* Toward sustainable soda ash production: A critical review on eco-impacts, modifications, and innovative approaches // Results in Engineering. 2024. Vol. 23. № 102399. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102399

73. *Wenzel T., Fogel S., Kryk H., Hampel U.* Cleaner soda ash production: A techno-economic assessment of electrochemically-based alternatives to the Solvay process // Energy Conversion and Management. 2026. Vol. 348. Part C. № 120757. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.120757

74. *Мешалкин В.П., Шулаев Н.С., Быковский Н.А., Аристов В.М.* Физико-химические основы комбинированной энергоресурсоэффективной технологии переработки стоков производства кальцинированной соды // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. 2020. Т. 494. С. 45-49. DOI: 10.31857/S268695352005009X

***Авторы*: Ольга Станиславовна Кудряшова,** *д-р хим. наук, главный научный сотрудник* (*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-4915-7562*, **Наталья Васильевна Митракова,** *канд. биол. наук, старший научный сотрудник* (*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*), *mitrakovanatalya@mail.ru*, *https://orcid.org/0000-0002-5571-7725*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0