

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-452-460

EDN: HUDNEG


УДК 504.06:625.122

Научная статья / Research article

Использование ресурсного потенциала шлама содового производства

К.Г. Пугин^{1,2}  , Р.Р. Салахов² 

¹ Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Российская Федерация

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация
 123zzz@rambler.ru

Аннотация. Шлам содового производства характеризуется мелкодисперсной структурой с высоким значением рН. Эти две характеристики шлама позволяют его эффективно использовать в качестве материала, угнетающего рост растительности. При эксплуатации противопожарные полосы могут зарастать растительностью, что снижает их противопожарные характеристики. Проведенный анализ фитотоксичности, формируемый шламом, позволил установить высокую эффективность предложенной технологии утилизации шлама содового производства. Технология не требует подготовки шлама к использованию, что позволяет рассмотреть ее в качестве наилучшей доступной технологии.

Ключевые слова: утилизация, противопожарные минерализованные полосы, фитотоксичность, ресурсный потенциал

Вклад авторов. Пугин К.Г. — концептуализация, разработка методологии исследования. Салахов Р.Р. — курирование данных, подготовка черновика рукописи, написание, рецензирование и редактирование рукописи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 01.08.2025; доработана после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 11.09.2025.


Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Пугин К.Г., Салахов Р.Р. Использование ресурсного потенциала шлама содового производства // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 452–460. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-452-460>

Use of the resource potential of soda production sludge

Konstantin G. Pugin^{1,2}, Rafael R. Salakhov¹

¹Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov,
Russian Federation, Perm, 123zzz@rambler.ru

²Perm National Research Polytechnic University, Russian Federation, Perm,
123zzz@rambler.ru

Abstract. Soda sludge is characterized by a finely dispersed structure with a high pH value. These two characteristics of the sludge allow it to be effectively used as a material that inhibits vegetation growth. During operation, firebreaks can become overgrown with vegetation, which reduces their fire-fighting characteristics. The conducted analysis of the phytotoxicity formed by the sludge allowed us to establish the high efficiency of the proposed technology for the utilization of soda sludge. The technology does not require sludge preparation for use, which allows us to consider it as the best available technology.

Keywords: soda sludge, utilization, mineralized firebreaks, phytotoxicity, resource potential

Authors' contribution. K.G. Pugin — conceptualization, development of research methodology; R.R. Salakhov — data curation, writing — preparation of a draft manuscript, writing-reviewing and editing the manuscript. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 01.08.2025; revised 25.08.2025; accepted 11.09.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Pugin KG, Salakhov RR. Use of the resource potential of soda production sludge. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):452–460. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-452-460>

Введение

На поверхностные и подземные воды, атмосферный воздух и почву большое антропогенное воздействие оказывают предприятия химической промышленности. Особенно их влияние заметно, если предприятие расположено на данной территории несколько десятилетий и при его работе образуются крупнотоннажные отходы, для которых в недостаточной степени разработаны технологии их обезвреживания и утилизации. Размещение промышленных отходов даже низкой опасности для окружающей среды (ОС) на длительной основе приводит к истощению возможности ОС самоочищаться, что будет формировать повышенные риски техногенного загрязнения. Для снижения негативного воздействия промышленных предприятий на объекты ОС в Российской Федерации приняты ряд государственных программ и постановлений («Охрана окружающей среды», «Экономика замкнутого цикла», «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации»), направленных на создание условий, которые позволили бы с минимальными экономичес-

кими издержками получить максимальный экологический эффект. Это достигается за счет научного анализа механизма техногенного воздействия промышленного производства на ОС и разработки технологий утилизации образующихся и накопленных ранее отходов, основанных на принципе максимального использования их ресурсного потенциала. В этой парадигме технологии, направленные на уничтожение отходов, не являются эффективными, так как они не подразумевают использование материального ресурса отходов для создания новых востребованных обществом материалов, при этом данный процесс требует энергетических затрат. В большинстве случаев крупнотоннажные отходы с низкой экологической опасностью можно использовать в качестве сырьевого материала, взяв за основу их физические или химические свойства.

Одним из таких крупнотоннажных отходов, для которого разработано большое количество технологий его утилизации, не нашедших использования ввиду сложности организации технологического процесса утилизации или требующих значительных экономических вложений, является шлам, образующийся при производстве кальцинированной соды.

В России примерно 70 % всего объема кальцинированной соды производится аммиачным способом двумя крупнейшими производителями АО «Башкирская содовая компания» (БСК) (расположен в городе Стерлитамак, Республика Башкортостан) и АО «Березниковский содовый завод» (БСЗ) (расположен в городе Березники, Пермский край). Шламонакопитель БСК занимает площадь около 460 га. Шламонакопитель БСЗ расположен на берегу реки Кама, имеет действующую карту площадью 155 га и закрытую площадью 89 га, ориентировочный накопленный объем шламов около 20–21 млн т [1–3].

Для утилизации шлама содового производства ранее были разработаны технологии утилизации, которые позволяют использовать шлам для получения строительных материалов [4–8], сорбентов [9–11], технологического сырья для получения различных материалов [12–14]. Данные технологии подразумевают стадию подготовки шлама к дальнейшему использованию, что требует значительных материальных и экономических издержек. Предлагаемые технологии получения целевых продуктов и строительных материалов, представленные в научных публикациях, не всегда охватывали весь спектр необходимых характеристик. В частности, нет исследований на морозостойкость, истираемость, долговечность, водостойкость, не рассмотрены вопросы последующей утилизации продукта полученного на основе шлама после завершения его использования. Отсутствие таких исследований повышает риски получить негативные результаты при внедрении предлагаемой технологии утилизации.

Анализ опубликованных ранее исследований физико-механических, химических свойств шлама содового производства позволил определить новое направление использования его ресурсного потенциала. Шлам характеризуется

высоким щелочным потенциалом и мелкодисперсной структурой минеральной части, что позволяет создать среду для предотвращения или значительного снижения возможности роста растений. Это возможно использовать для улучшения эксплуатационных характеристик противопожарных минерализованных полос (ПМП), используемых для защиты населенных пунктов, лесов и промышленных объектов от пожаров. При эксплуатации ПМП зарастают травой и другой растительностью, что нарушает их противопожарные функции [15]. Согласно ГОСТ Р 57972-2017 основным показателем качества ПМП является их минерализация (отсутствие органики). При устройстве ПМП для снижения плодородности верхнего слоя, создания условий для местного угнетения роста растений возможно использовать шлам содового производства.

Материалы и методы

В исследовании применяли шлам БСЗ, полученный из закрытого и действующего шламонакопителя.

Для оценки физико-механических свойств шлама использовали ГОСТ 12536-2014. Гранулометрический состав определяли по ГОСТ 12536-2014. Для оценки химических характеристик дистиллерной жидкости (жидкой фазы шлама) использовали методики по СанПиН 2.1.5.980-00; СанПиН 2.1.4.1074-01.

Оценка фитотоксичности смеси грунта и шлама проводилась согласно методу МР 2.1.7.2297-07, ФР.1.39.2006.02264 и ГОСТ Р 22030-2009 в лабораторных условиях. Данный метод позволяет оценить, угнетающее или стимулирующее действие оказывает вновь вводимый компонент. Эксперимент проводили с использованием семян овса. В качестве грунта был использован суглинок, по структуре и составу характерный для почвенного покрова Пермского края (дерново-подзолистая суглинистая почва на элювиально-делювиальных суглинках). Для эксперимента были использованы четыре композиции грунт/шлам: 1-й вариант — соотношение 0/1; 2-й вариант — 1/3; 3-й вариант — 1/2; 4-й вариант — контрольный образец (почвогрунт без шлама). По результатам измерения длины корней проростов рассчитывали эффект торможения по формуле $E_t = (L_k - L_{оп})/L_k \times 100$, где E_t — эффект торможения, %; L_k — средняя длина корней в контроле, мм; $L_{оп}$ — средняя длина корней в опыте, мм. Фитотоксичность считается доказанной если расчет превышает 20 %.

Для установления соответствия требований минерализованных полос использовали ГОСТ Р 57972-2017.

Результаты

Производство кальцинированной соды аммиачным способом сопровождается образование отхода в виде дистиллерной жидкости (пульпы), которая состоит из твердой (минеральной) и жидкой фазы. При длительном нахожде-

нии в шламонакопителе под действием сил гравитации происходит разделение твердой и жидкой фазы. Твердая фаза оседает на дно, а жидкая фаза сбрасывается в поверхностный водный объект.

Жидкая фаза пульпы из производственного цикла характеризуется сильно щелочной средой (до $\text{pH} = 12,4$) и минерализацией до 180 ± 10 г/л. В составе содержится значительное количество растворенных ионов — хлоридов, сульфатов, натрия и калия, аммония (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав жидкой фазы пульпы отходов БСЗ, г/л

Место отбора пробы	NH_4^+	Cl^-	Ca^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	HCO_3^- , мг/л	SO_4^{2-}	Общая минерализация	pH
Сброс с БСЗ	$190 \pm 0,5$	110 ± 5	$42 \pm 0,5$	27 ± 1	63 ± 2	$7,4 \pm 0,5$	180 ± 10	12,4
Противоположная от сброса с БСЗ часть действующей карты шламохранилища	$15,5 \pm 0,5$	$15 \pm 0,5$	$7 \pm 0,5$	$4,8 \pm 0,25$	39 ± 2	$1,9 \pm 0,1$	27 ± 3	11,5

Источник: составлено К.Г. Пугиным, Р.Р. Салаховым.

Химический состав высушенного шлама представляет собой смесь карбонатов магния и кальция, а также сульфата кальция.

Основные химические соединения в составе минеральной (твердой) части шлама: CaCO_3 от 49 до 64 %; MgCO_3 от 19 до 26 %; Ca(OH)_2 от 3 до 11 %; CaCl_2 от 5 до 10 %; $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ от 4 до 11 %; CaSO_4 от 3 до 10 %; SiO_2 до 4,7 %. Это указывает о высоком щелочном ресурсном потенциале шлама.

Для определения гранулометрического состава были использованы по два образца из закрытой карты шламохранилища (образцы 1 и 2) и действующей карты (образцы 3 и 4). Гранулометрический состав шлама представлен в табл. 2.

Таблица 2. Гранулометрический состав шламов

Размер ячеек сита, мм	Остаток на сите, % по массе			
	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
5	–	–	–	–
2	2,5	1,7	–	0,1
1	17,2	12,7	7,2	9,8
0,5	28	21,9	18,8	16,6
0,25	22,4	27,5	17,6	16,8
0,1	25,3	28,7	37,5	32,9
Прошло через сито 0,1 мм	4,6	7,5	18,9	23,8

Источник: составлено К.Г. Пугиным, Р.Р. Салаховым.

Анализ данных гранулометрического состава минеральной части шлама показал, что в составе образцов 1 и 2 имеются частицы размером более 2 мм, а преобладающий размер частиц от 1 до 0,1 мм. В образцах 3 и 4 преобладающий размер частиц лежит в интервале от 0,5 до менее 0,1 мм. При длительном нахождении шлама в шламохранилище происходит сегментация мелкодис-

персных частиц в более крупные. Результаты коррелируют с результатами, полученными ранее С.М. Блиновым с соавт. [4].

Результаты исследований фитотоксичности шлама позволили установить целесообразность использования шлама в качестве материала для создания условий местного угнетения растений. Ранее были получены результаты Е.В. Калининой и Л.В. Рудаковой всхожести семян гороха (рис. 1) при различной рН почвогрунта [16]. В первом варианте в качестве почвогрунта использовался шлам, во втором варианте — смесь шлама и почвы, третий вариант (контрольный) почва.



Рис. 1. Результаты эксперимента на фитотоксичность для разного состава почвогрунта:

а — рН — 12,8; б — рН — 8,6; в — рН — 7,0

Источник: составлено Е.В. Калининой [16].

Самый высокий фитотоксичный эффект 100 % в первом варианте, (рис. 1а). Прорастание семян происходило, но роста не было. Визуально можно определить, что высокий рН почвы (добавка шлама) создает условия для подавления роста семян гороха.

Дополнительно нами было проведено исследование фитотоксичности на примере семян овса. Результаты контактного фитотестирования с использованием композиций с различным сочетанием грунт/шлам представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты фитотестирования

Композиция грунт/шлам	Средняя длина корня, см	Средняя длина ростка, см	Эффект торможения, %
0/1	0,7	0,9	83
1/3	1,7	2,3	59
1/2	2,8	3,4	33
1/0 (контрольный)	4,2	5,5	0

Источник: составлено К.Г. Пугиным, Р.Р. Салаховым.

Проведенный эксперимент позволил подтвердить, что использование шлама содового производства позволяет создать условия для значительного торможения роста растений вплоть до прекращения их роста и гибели. При

высоком pH почвы кальций связывает соединения фосфора, делая его недоступным для растений, нарушается водный баланс, питательные вещества растениями усваиваются хуже.

По данным исследований Института леса им. В.Н. Сукачева, около 60 % крупных природных пожаров происходят именно из-за их зарастания травой и накопления горючих материалов на их поверхности.

В зависимости от применяемого рабочего органа (с помощью которого осуществляется разработка грунта) поперечное сечение противопожарной полосы может быть треугольным, трапециевидным или прямоугольным. Прямоугольная поперечная форма ПМП представлена на рис. 2.

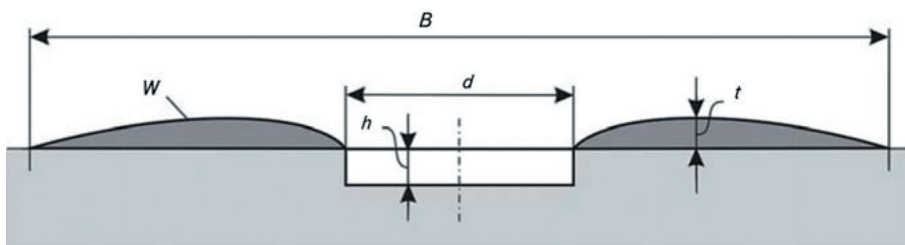


Рис. 2. Прямоугольное поперечное сечение ПМП: B — ширина полосы, d — ширина выемки, h — глубина выемки, W — грунт из выемки, t — толщина слоя грунта из выемки

Источник: составлено К.Г. Пугиным, Р.Р. Салаховым.

При устройстве ПМП формируется выемка шириной d , которая, с одной стороны, обеспечивает минеральный поверхностный слой, из которого удалена растительность и верхний плодородный слой. Глубина выемки h , как правило, достаточна для предотвращения распространения боковых подземных побегов травянистых растений, но выемка способствует накоплению на ее поверхности органики (листьев, хвои и др.), что создает условия для создания условий для прорастания семян травянистых растений. В этих условиях будет происходить быстрое зарастание минерализованной полосы с потерей противопожарных свойств.

Для увеличения времени эффективной эксплуатации ПМП предлагается выемку ПМП заполнять шламом, что предотвратит накопление органических остатков (листьев, хвои, веток и др.) на полосе.

Гранулометрический состав шлама позволяет вносить его в грунт при непосредственном устройстве ПМП и создавать более плотную структуру грунта ПМП. Так как шлам относится к 5-му классу опасности для окружающей среды, его возможно использовать в строительных технологиях без ограничения.

Введение шлама содового производства, который в своем составе содержит карбонат кальция, сформирует высокую степень pH почвы, что приведет к нарушению аборигенной структуры почвы, характерной для данной местности, а также сформирует неблагоприятные химическое и физическое действия на почвенные микроорганизмы.

Заключение

Шлам содового производства, имея мелкодисперсную структуру, с высоким рН способен создать на химическом и физическом уровне условия, снижающие рост растительности, что можно использовать для устройства ПМП.

Время эффективного использования ПМП можно увеличить за счет снижения содержания питательных веществ в поверхностном слое ПМП, повышения рН и увеличения плотности структуры, что снижает скорость роста и распространения растений. Для предотвращения накопления на поверхности ПМП горючих органических материалов предложено заполнять выемку минерализованной полосы на всю глубину шламом. Такое техническое решение позволит сохранить противопожарные свойства минерализованных полос на больший период времени, эффективно использовать ресурсный потенциал (высокую щелочность и мелкодисперсную минеральную структуру) отходов содового производства.

Технология утилизации шлама отвечает экологическим требованиям и может быть признана эффективной. Для ее реализации не требуется дополнительного технологического оборудования и дополнительных технологических переделов шлама.

Список литературы

- [1] Калинина Е.В., Глушанкова И.С., Сабиров Д.О. Сорбент для очистки воды от нефтепродуктов на основе шлама содового производства // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2017. №4(28). С. 37–49. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2017.04.03> EDN: YLDAJG
- [2] Глушанкова И.С., Докучаева Д.В., Калинина Е.В., Демина Е.Н. Применение сорбционных материалов на основе отходов производства кальцинированной соды для очистки поверхностных вод с автомагистралей // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 4. С. 64–75. <https://doi.org/10.15593/24111678/2017.04.05> EDN: YLBFDG
- [3] Кучерик Г.В., Гонтаренко Д.В., Омельчук Ю.А., Сытников Д.М., Флерко О.В. Оценка токсичности жидких отходов производства соды и перспективы их утилизации // Энергетические установки и технологии. 2021. Т. 7. № 3. С. 97–105. EDN: GYZZCT
- [4] 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. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-12-48-53> EDN: GJKISH
- [5] Zong Y., Gong J., Zhang J., Su Y., Hu C., Li T., Wu Y., Jiang M. Research status of soda residue in the field of environmental pollution control. *Royal Society of Chemistry Advances*. 2023. Vol. 13. P. 28975–28983. <https://doi.org/10.1039/D3RA04863B>
- [6] Zhao X., Liu C., Wang L., Zuo L., Zhu Q., Ma W. Physical and mechanical properties and micro characteristics of fly ash-based geopolymers incorporating soda residue. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 98, no. 7. P. 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.009>
- [7] Леонтьев С.В., Титова Л.Н. Использование отходов производства кальцинированной соды для получения строительных материалов // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т. 2. С. 315–324. EDN: MHDWGT

- [8] *Бадикова А.Д., Сахибгареев С.Р., Федина Р.А., Рахимов М.Н., Цадкин М.А.* Эффективная минеральная добавка на основе отходов нефтехимических производств для бетонной строительной смеси // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2020. Т. 12, № 1. С. 34–40. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-1-34-40> EDN: EWGXQT
- [9] *Боев Е.В., Исламудинова А.А., Аминова Э.К.* Получение строительного силиката кальция // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2021. Т. 13, № 6. С. 350–357. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-6-350-357> EDN: GQFWLZ
- [10] *Быковский Н.А., Пучкова Л.Н., Фанакова Н.Н.* Исследование токсичности дистиллерной жидкости аммиачно-содового производства различными тест-объектами // *Экология и промышленность России*. 2015. Т. 19. № 10. С. 48–51. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-10-48-51> EDN: UMKVFV
- [11] *Латыпова З.Б., Халиков Р.М., Глазачев А.О., Давлетбердин Д.Д.* Геоэкологические аспекты применения известьесодержащих крупнотоннажных отходов содового производства в Башкортостане // *Проблемы региональной экологии*. 2023. № 4. С. 68–72. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-4-68-72> EDN: ZFOTOL
- [12] *Глушанкова И.С., Калинина Е.В., Демина Е.Н.* Модифицированные сорбенты на основе шлама содового производства для извлечения ионов тяжёлых металлов из водных растворов и сточных вод // *Теоретическая и прикладная экология*. 2018. № 3. С. 100–108. EDN: YXSWHR
- [13] *Петросян В.С., Тихонова И.О., Епифанцев А.С.* Опыт создания промышленного симбиоза предприятий химической промышленности // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 8. С. 28–33. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-8-28-33> EDN: YSKVCS
- [14] *Кеймиров М.А., Хангелдиев А.Т.* Переработка отходов химических производств // *Вестник Технологического университета*. 2020. Т. 23. № 12. С. 85–88. EDN: SJTIRX
- [15] *Цветков И.В., Кульнев В.В., Кумани М.В., Насонов А.Н., Абдужаббаров Х.М., Трегубов О.В., Похваленко В.А., Ухтомский В.Г.* Использование фрактальных методов для оценки структуры почв после создания противопожарных минерализованных полос // *Лесохозяйственная информация*. 2024. № 3. С. 121–130. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2024.3.10> EDN: ZZAPXF
- [16] *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. EDN: SQPKJF

Сведения об авторах:

Пугин Константин Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры строительных технологий, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, д. 23; профессор кафедры автомобилей и технологических машин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29. ORCID: 0000-0002-1768-8177. eLIBRARY SPIN-код: 7972-1668. E-mail: 123zzz@rambler.ru

Салахов Рафаэль Рафисович, аспирант кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, г. Пермь; Комсомольский пр., д. 29. ORCID: 0009-0001-8934-8454; eLIBRARY SPIN-код: 8216-1809. E-mail: veronika815@inbox.ru