

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 542.464, 544.558

ПЛАЗМЕННАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД

Ксения Алексеевна Жидоморова¹, Дмитрий Игоревич Субботин^{1,2}¹ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), кафедра физической химии² Институт электрофизики и электроэнергетики РАН**Автор, ответственный за переписку:** Ксения Алексеевна Жидоморова, zhidomorovak@gmail.com

Аннотация. В статье приведен метод плазменной переработки золы после сжигания осадка сточных вод, основанный на полном расплавлении золы и ее дальнейшем быстром охлаждении. Исследован химический состав остеклованного шлака, образующийся в результате плазменного воздействия. Отмечено, что выщелачивание с предварительной активацией измельчением значительно снижает содержание оксидов металлов в шлаке, что является реальным способом охраны окружающей среды.

Ключевые слова: плазменная обработка, остеклованный шлак, выщелачивание, оксиды металлов

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2025-66-6-502-505

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Рег. № НИОКТР 122041900222-9.

Для цитирования: Жидоморова К.А., Субботин Д. И. Плазменная переработка осадка сточных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2025. Т. 66. № 6. С. 502–505.

ORIGINAL ARTICLE

PLASMA TREATMENT OF SEWAGE SLUDGE

Ksenia A. Zhidomorova¹, Dmitriy I. Subbotin^{1,2}¹ St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Department of Physical Chemistry² Institute of Electrophysics and Electric Power Engineering of the Russian Academy of Sciences**Corresponding author:** Ksenia A. Zhidomorova, zhidomorovak@gmail.com

Abstract. The paper describes a method for processing ash from sewage sludge incineration using plasma technology. The process involves completely melting the ash and then rapidly cooling it. The resulting vitrified bottom ash is analyzed for its chemical composition. The study shows that pre-activating the ash by grinding and then leaching it significantly reduces the amount of metal oxides in the slag, which is an effective way to protect the environment.

Keywords: plasma treatment, vitrified slag, leaching, metal oxides

Financial Support. The work was performed within the framework of the state assignment Reg. No. NIOCTR 122041900222-9.

For citation: Zhidomorova K.A., Subbotin D.I. Plasma treatment of sewage sludge // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya. 2025. T. 66. № 6. S. 502–505.

В результате применения системы очистки городских сточных вод образуются отходы, основными из которых являются осадки сточных вод (ОСВ). Получение вторичного продукта из ОСВ затрудняют следующие факторы:

наличие тяжелых металлов и связанные с ними процессы биоаккумуляции и биомagniфикации,

присутствие патогенной микрофлоры, устойчивой к длительной обработке и ответственной за распространение инфекционных болезней [1–3],

избыточное количество нитратов.

Очевидно, что применение ОСВ в качестве удобрений или кормовых продуктов невозможно. А основное направление утилизации через захоронение или хранение на полигонах является серьезной экологической проблемой [4].

Рациональные пути утилизации отходов следующие: получение материалов для строительной промышленности (в качестве компонента шихты [5] или для производства легких заполнителей или керамики [6]), приготовление продуктов переработки осадков и активного ила для использования в теплоэнергетике [7].

Однако основным способом утилизации осадков сточных вод является их сжигание до состояния золы с использованием выделяемого тепла. Стоит отметить, что зола обогащена тяжелыми металлами, поэтому требует дополнительной обработки перед утилизацией.

На сегодняшний день одним из перспективных методов переработки золы является плазменная обработка [8, 9]. В результате плазменного воздействия органические соединения в составе золы термически разрушаются, а нерастворимые соединения металлов встраиваются в силикатную или алюмосиликатную структуру исходного материала (осадка или глины) [10]. В результате получается продукт, представляющий собой остеклованный шлак с аморфной структурой, который в дальнейшем можно применять в качестве стеклокерамики для облицовки стен [11].

Цель настоящей работы – проведение эксперимента по получению остеклованного шлака из золы ОСВ с использованием высоковольтного плазмотрона переменного тока.

Исследование состава шлака и определение устойчивости шлака к выщелачиванию

В качестве объекта исследования использовали золу от сжигания осадков сточных вод Северной станции аэрации Санкт-Петербурга. Первичную переработку осадка сточных вод выполняли в реакторе со взвешенным слоем и средней температурой 700 °С. В дальнейшем золу подвергали остеклованию с использованием воздушного высоковольтного трехфазного плазмотрона переменного тока в плазмохимическом реакторе [12] при следующих условиях: мощность плазмотрона 60 кВт, расход воздуха 3–10 г/с, время выхода температуры на режим 4 ч, время полного расплавления золы 2,5 ч при температуре расплава 1350 °С. Образец для исследования отбирали в горячем жидком виде и закачивали холодной водой. В табл. 1 показан основной состав шлака перед выщелачиванием, определенный методом рентгено-флуоресцентного анализа.

Известно, что в состав объекта исследования входят такие оксиды металлов, как Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , CaO и др. Их избыточное содержание негативно влияет на состояние окружающей среды. Извлечение алюминия из шлака перед захоронением является крайне важной задачей, поскольку отмечено влияние подвижного алюминия на повышение кислотности почв [13]. Кроме того, избыточное содержание алюминия, железа и марганца в питательной среде отрицательно сказываются на корневой системе растений [14].

Для осуществления процесса выщелачивания проводили предварительное измельчение шлака до состояния пудры, обработку водным раствором при pH 6 и постоянное перемешивание в течение недели. Полученный белый раствор отфильтровывали и упаривали. Осадок промывали и высушивали. Химический состав продукта выщелачивания представлен в табл. 2.

Анализ химического состава шлака после выщелачивания позволяет утверждать, что наибольшему извлечению подвергаются такие соединения, как Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , TiO_2 и MnO . Кроме того, происходит поглощение ионов металлов Na^+ , Mg^{2+} , K^+ из раствора, что можно объяснить процессом замещения атомов в структуре шлака.

Т а б л и ц а 1

Химический состав шлака перед выщелачиванием

Содержание компонента, мас. %									
Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	MnO
0,57	35,54	18,28	3,76	29,51	6,10	1,51	1,75	1,16	1,38

Т а б л и ц а 2

Химический состав продукта выщелачивания

Содержание компонента, мас. %									
Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	MnO
3,71	45,74	13,15	2,10	18,29	7,61	1,41	3,15	0,77	0,73
Степень извлечения по сравнению с исходным содержанием в шлаке, %									
–	–	28,1	44,1	38,0	–	6,6	–	33,6	47,1

Таким образом, в настоящей работе проведено получение шлака с использованием плазменного воздействия на золу осадков сточных вод. Установлено, что выщелачивание позво-

ляет добиться высокой степени извлечения оксидов металлов из шлака, что может быть использовано в целях предотвращения нанесения вреда окружающей среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dregulo A.M., Vitkovskaya R.F. // Fibre Chemistry, 2018. Vol. 50. N 3. P. 243–247 (DOI: 10.1007/s10692-018-9969-0).
2. Голубовская Э.К., Биологические основы очистки воды. М., 1978. 159 с.
3. Руководство по контролю качества питьевой воды. Гигиенические критерии и другая релевантная информация / Пер. с англ. Женева, 1987. Т. 2. 3 с.
4. Świerczek L., Cieślík B.M., Konieczk P. // J. Cleaner Production. 2018. Vol. 200. P. 342–356 (DOI:10.1016/j.jclepro.2018.07.188).
5. Bernadiner M.N., Zhizhin V.V., Ivanov V.V. // Ecology and industry of Russia, 2000. N 4. P. 17–21.
6. Liu M.W., Xu G.R., Li G.B. // J. Harbin Institute of Technology, 2012. Vol. 44. P. 18–21.
7. Карманов А.П., Полина И.Н. // Технология очистки сточных вод [Электронный ресурс] : учебное пособие: самост. учеб. электрон. изд. лесн. ин-т. Электрон. дан. Сыктывкар, 2015. 203 с.
8. Ma W., Shi W., Shi Y., Chen D., Liu B., Chu C., Chen G. // J. Hazardous Materials. 2021. Vol. 408. P. 124809 (DOI:10.1016/j.jhazmat.2020.124809).
9. van Dyk J.C., Waanders F.B., Benson S.A., Laumb M.L., Hack K. // Fuel (Elsevier). 2009. Vol. 88. N 5. P. 67–74 (DOI:10.1016/j.fuel.2008.07.034).
10. Franus M., Barnat-Hunek D., Wdowin M. // Environmental Monitoring and Assessment, 2016. Vol. 188. N 10 (DOI:10.1007/s10661-015-5010-8).
11. Kőroly Z., Mohai I., Tyth M., Wjber F., Szőpülgý J. // J. the European Ceramic Society, 2007. Vol. 27. № 2-3. P. 1721–1725 (DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.015).
12. Surov A.V., Popov S.D., Serba E.O., Pavlov A.V., Nakonechny G.V., Spodobin V.A., Borovskoy A.M. // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 825. P. 012016 (DOI:10.1088/1742-6596/825/1/012016).
13. Небольсин А.Н., Небольсина З.П., // Агрохимия, 1997. № 9. С. 29-33.
14. Иванищев В.В. // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2019. № 3. С. 153.

Информация об авторах

Ксения Алексеевна Жидоморова – студентка химического факультета Санкт-Петербургского государственного технологического института (Технического университета) (СПбГТИ(ТУ)) (zhidomorovak@gmail.com);

Дмитрий Игоревич Субботин – доцент кафедры физической химии Санкт-Петербургского государственного технологического института (Технического университета) (СПБГТИ(ТУ)), канд. хим. наук (subbotin1987@mail.ru).

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

Статья поступила в редакцию 13.03.2024;
одобрена после рецензирования 24.04.2024;
принята к публикации 26.04.2025.