

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2025, Том 17, № 3 / 2025, Vol. 17, Iss. 3 <https://esj.today/issue-3-2025.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/40NZVN325.pdf>

DOI: 10.15862/40NZVN325 (<https://doi.org/10.15862/40NZVN325>)

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Воробьев, К. А. Экспериментальное определение оптимальных параметров процесса карбонизации шлаков от сжигания твердых коммунальных отходов / К. А. Воробьев, О. Е. Горлова, И. В. Шадрунова, Т. В. Чекушина // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 3. — URL: <https://esj.today/PDF/40NZVN325.pdf>. DOI: 10.15862/40NZVN325.

**For citation:**

Vorobyev K.A., Gorlova O.E., Shadrunkova I.V., Chekushina T.V. Experimental determination of optimal parameters of the process of carbonization of slag from incineration of municipal waste. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(3): 40NZVN325. Available at: <https://esj.today/PDF/40NZVN325.pdf>. DOI: 10.15862/40NZVN325. (In Russ., abstract in Eng.).

**Воробьев Кирилл Александрович**

ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика  
Н.В. Мельникова Российской академии наук», Москва, Россия

Аспирант

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия  
Аспирант Отдела № 6 «Горной экологии», ассистент кафедры «Недропользования и нефтегазового дела»

E-mail: k.vorobyev98@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5792-3979>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=887256](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=887256)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57193517186>

**Горлова Ольга Евгеньевна**

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,  
Магнитогорск, Россия

Профессор кафедры «Геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых»

ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика  
Н.В. Мельникова Российской академии наук», Москва, Россия

Ведущий научный сотрудник отдела горной экологии

Доктор технических наук, профессор

E-mail: gorlova\_o\_e@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1142-0652>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=301567](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=301567)

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAR-3735-2021>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56070743500>

**Шадрунова Ирина Владимировна**

ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика  
Н.В. Мельникова Российской академии наук», Москва, Россия

Заведующий Отделом горной экологии

Доктор технических наук, профессор

E-mail: shadrunkova\_@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3520-2705>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=146965](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=146965)

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/K-1094-2014>

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6508278979>

**Чекушина Татьяна Владимировна**

ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика  
Н.В. Мельникова Российской академии наук», Москва, Россия

Ведущий научный сотрудник отдела горной экологии

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия

Доцент кафедры «Недропользования и нефтегазового дела»

Доктор экономических наук, кандидат технических наук, доцент

E-mail: [council-ras@bk.ru](mailto:council-ras@bk.ru)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9261-1105>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=61549](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=61549)

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=8848759700>

## **Экспериментальное определение оптимальных параметров процесса карбонизации шлаков от сжигания твердых коммунальных отходов**

**Аннотация.** В статье проводится углубленное исследование процесса минеральной карбонизации шлаков, образующихся в результате термической переработки твердых коммунальных отходов (ТКО). Этот процесс рассматривается как перспективный и экологически устойчивый метод улавливания и долгосрочного хранения углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), являющегося одним из основных парниковых газов. В статье представлено детальное теоретическое обоснование процесса, включающее анализ термодинамических и кинетических аспектов реакций карбонизации, а также рассмотрение механизмов взаимодействия  $\text{CO}_2$  с различными минеральными компонентами шлаков. Особое внимание уделено влиянию минерального состава шлаков на эффективность и скорость карбонизации.

Подробно описаны методы экспериментального исследования, использованные для анализа процесса карбонизации, такие как дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), термогравиметрический анализ (ТГА), рентгенофазовый анализ (РФА), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДС). Эти методы позволяют изучить фазовый состав шлаков, структуру образующихся карбонатных минералов и их морфологию.

Представлены результаты расчетов оптимальных параметров карбонизации шлаков, учитывающих влияние ключевых факторов, таких как температура, давление  $\text{CO}_2$ , концентрация  $\text{CO}_2$ , время реакции и размер частиц шлаков. Особое внимание уделено исследованию влияния температуры и давления на скорость связывания  $\text{CO}_2$  и на образование стабильных карбонатных минералов, таких как кальцит, магнезит и сидерит. В качестве эталонного материала для сравнения рассматривается традиционно используемый для минеральной карбонизации серпентинит, обладающий благоприятными химическими свойствами и высоким содержанием магния.

**Ключевые слова:** карбонизация; шлаки; зола; ТКО; секвестрация; термическая переработка отходов; оптимальные параметры

### **Введение**

Стабилизация концентраций парниковых газов в атмосфере является приоритетной научно-технической задачей Российской академии наук. Одним из ключевых направлений являются технологии улавливания и захоронения углерода (Carbon Capture and Storage — CCS), которые критически важны для сокращения углеродного следа промышленных предприятий.

Применение технологий CCS способствует снижению объемов выбросов и улучшению экологической ситуации в промышленных центрах. Интеграция CCS в долгосрочные стратегии развития мусоросжигающих заводов позволяет модернизировать их под современные экологические стандарты и сократить выбросы диоксида углерода.

Минеральная карбонизация представляет собой один из методов связывания CO<sub>2</sub>, при котором диоксид углерода вступает в реакцию с оксидами металлов (Ca, Mg, Fe) или с силикатными минералами, образуя стабильные карбонатные соединения.

В отличие от геосеквестрации, данный процесс осуществляется в контролируемых условиях и позволяет получать полезные побочные продукты, такие как минеральные наполнители для строительной отрасли.

Рост уровня урбанизации и потребления приводит к образованию огромных объемов твердых коммунальных отходов (ТКО). Сжигание является эффективной технологией их переработки, сокращая объем отходов на 90 % и их массу на 70 %, а также позволяя вырабатывать электроэнергию.<sup>1</sup> В Европе термически перерабатывается до 27 % ТКО, что соответствует 80 млн тонн в год, из которых 20 млн тонн составляют образующиеся шлаки [1–7].

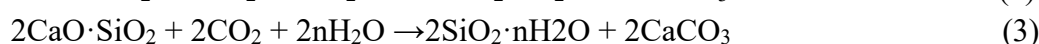
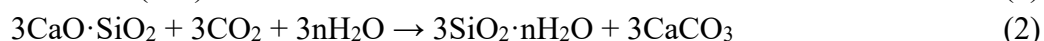
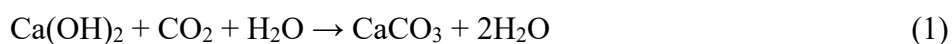
Шлаки, образующиеся в процессе сжигания, представляют собой смесь негорючих материалов, включающих металлы, силикаты, алюмосиликаты и летучую золу, которая, в свою очередь, содержит не только негорючие остатки, но и тяжелые металлы.

Шлаки имеют схожий состав с отходами металлургической и энергетической промышленности, включая значительное количество Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>-содержащих фаз, что делает их перспективным материалом для минеральной карбонизации. Также шлаки и золы содержат значительные количества тяжелых металлов, таких как Cu, Zn, Pb и Cr, концентрация которых в некоторых случаях превышает предельно допустимые нормы.

В летучей золе отмечается высокая концентрация хлоридов, способствующих миграции токсичных элементов. Для безопасного использования и складирования остатков сжигания ТКО необходимо проведение дополнительных процессов стабилизации и карбонизации.

Потенциал связывания CO<sub>2</sub> шлаками зависит от их химического состава и реакционной способности. Для связывания 1 м<sup>3</sup> диоксида углерода требуется от 500 до 1 000 кг шлаков в зависимости от состава и условий карбонизации. Шлаки, содержащие основные элементы — CaO, MgO, могут эффективно связывать CO<sub>2</sub> при температуре до 100°C. Процесс карбонизации отходов позволяет значительно снизить концентрацию токсичных материалов в образцах, в частности, карбонизация шлака способствует уменьшению выщелачивания тяжелых металлов и диоксинов за счет их химической интеграции в устойчивые карбонатные соединения.

Основные химические реакции процесса карбонизации описываются уравнениями (1–3):



Согласно проведенному теоретическому обзору [6], реакция образования твердых осадков CaCO<sub>3</sub> происходит в жидкой составляющей системы «шлак-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>». Поэтому, прежде чем произойдет ионная реакция, газ CO<sub>2</sub> одновременно с твердыми фазами

<sup>1</sup> Валуев Д.В., Гизатулин Р.А. Технологии переработки металлургических отходов: учебное пособие. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. — 196 с.

техногенных отходов должен пройти через предварительный процесс растворения [8]. Сначала карбонизация сопровождается гидратацией, за которой, после некоторой задержки, следует вторичная карбонизация.

### Исследование процесса гидратации шлака и золы уноса

Для исследований были отобраны пробы шлака и золы-уноса ЕФН-Экотехпром Московского мусоросжигательного завода № 3 (г. Москва) и Брестского мусороперерабатывающего завода (г. Брест, Республика Беларусь) (шлак БМПЗ).

Исследования химического, фазового, дисперсного состава шлаков и золы-уноса, минералогических и морфометрических особенностей изучаемых остатков от сжигания ТКО представлены в наших ранее выполненных работах [8; 9].

Результаты данных исследований свидетельствуют о присутствии фаз потенциально активных для ускоренной карбонизации в технологии связывания диоксида углерода. Изученные шлаки содержат 19,5–21 % оксида кальция и 1–1,87 % оксида магния, что сопоставимо с альтернативными источниками техногенного сырья для минеральной карбонизации.

При этом зола-унос характеризуется значительно бóльшим содержанием оксида кальция 39 % и повышенным содержанием оксидов калия и натрия (8 %) при значительно меньшем содержании остальных оксидов. Теоретический потенциал карбонизации остатков от сжигания ТКО, рассчитанный нами по формуле Стенуара, для шлаков близок и составляет 17,84 % для шлака МСЗ 3, 17,19 % для шлака БМПЗ (0,172–0,178 т  $\text{CO}_2$  на т 1 шлака), а для золы в два раза больше — 33,95 %, что объясняется бóльшим содержанием минеральных фаз, способных к взаимодействию с  $\text{CO}_2$  и к минеральной карбонизации, а именно легкоактивных портландита, гидроксихлорида кальция и двухкальциевого силиката [9].

Проведены исследование по гидратации шлаков и золы. Образцы предварительно высушивались при температуре 105°C в течение 24 часов до постоянной массы. Образцы массой 200 г смешивали с водой при соотношении Т:Ж 1: 0,5 и выдерживали в течение 1, 2, 3, 6, 12, 24 ч в закрытых емкостях, исключающих высыхание (бюксах).

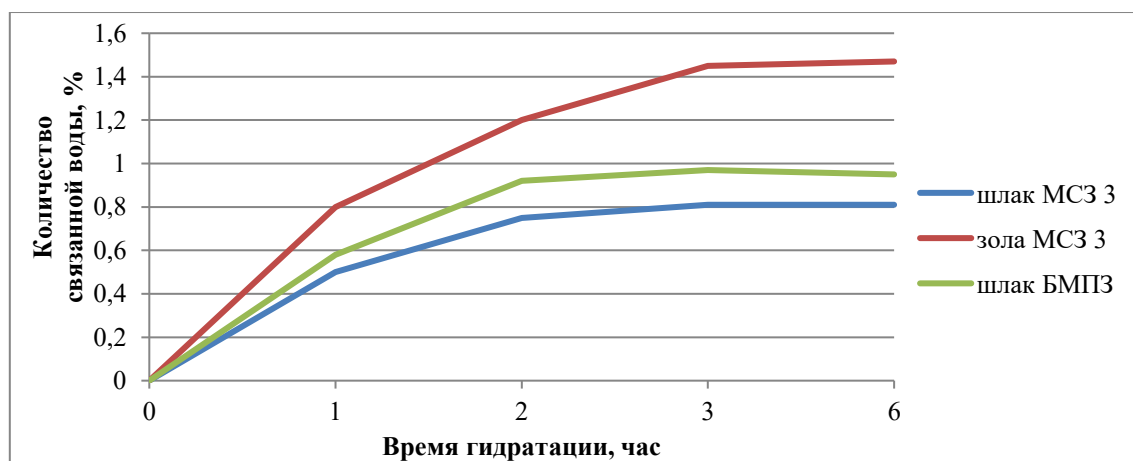


Рисунок 1. Результаты гидратации образцов шлака и золы (составлено авторами)

По истечении установленного времени выдерживания образцы высушивали до постоянной массы при 520°C и по разнице масс образцов определяли количество химически связанной воды в процентах. Графики на рисунке 1 свидетельствуют, что активное связывание воды происходит в первые три часа, после чего количество связанной воды остается практически постоянным, а с 12 до 24 часа — связывание воды прекращается полностью.

Таким образом, активной фазой гидратации примем 3 часа.

Летучая зола обладает большей гидратационной активностью по сравнению со шлаками, что объясняется присутствием в ней фаз, склонных к гидратации — портландита, гидроксихлорида кальция извести.

Гидратационная активность шлаков двух мусороперерабатывающих заводов сопоставимая.

### Исследование процесса минерального связывания диоксида углерода

Для изучения кинетики карбонизации была разработана лабораторная установка (заявка изобретение № 2025102476, авторы Воробьев К.А. и др.), предназначенная для изучения сорбции CO<sub>2</sub> шлаками при различных переменных параметрах. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 2.

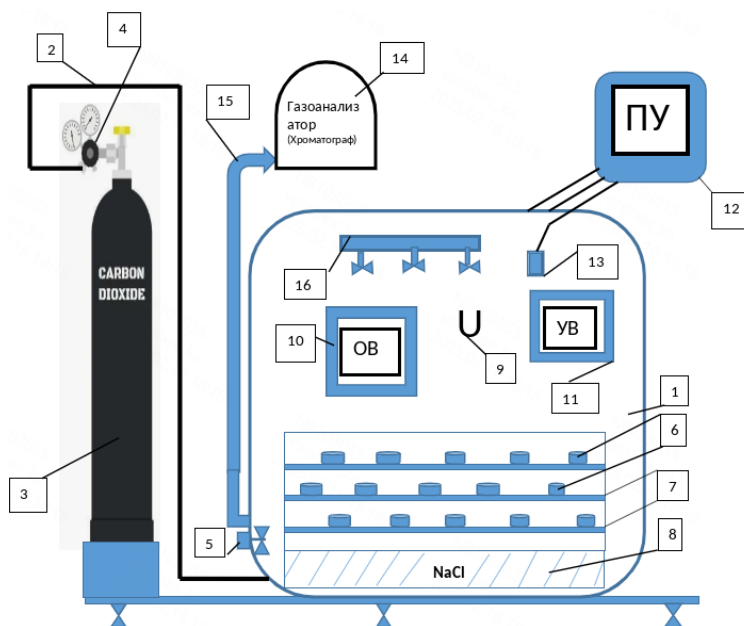
Газ CO<sub>2</sub> подавался из баллона с редуктором и заполнял камеру, обеспечивая начальную концентрацию CO<sub>2</sub> от 10 до 100 %. Степень карбонизации рассчитывалась по изменению массы образцов до и после эксперимента, а также по изменению концентрации CO<sub>2</sub> в газовой фазе. Количество поглощенного CO<sub>2</sub> (N) определялось по формуле (4):

$$N(\text{CO}_2) = (m(\text{карбонизир.}) - m(\text{сухого})), \text{ г} \quad (4)$$

где:

$m(\text{карбонизир.})$  — масса образца после карбонизации;

$m(\text{сухого})$  — масса исходного сухого образца, г.



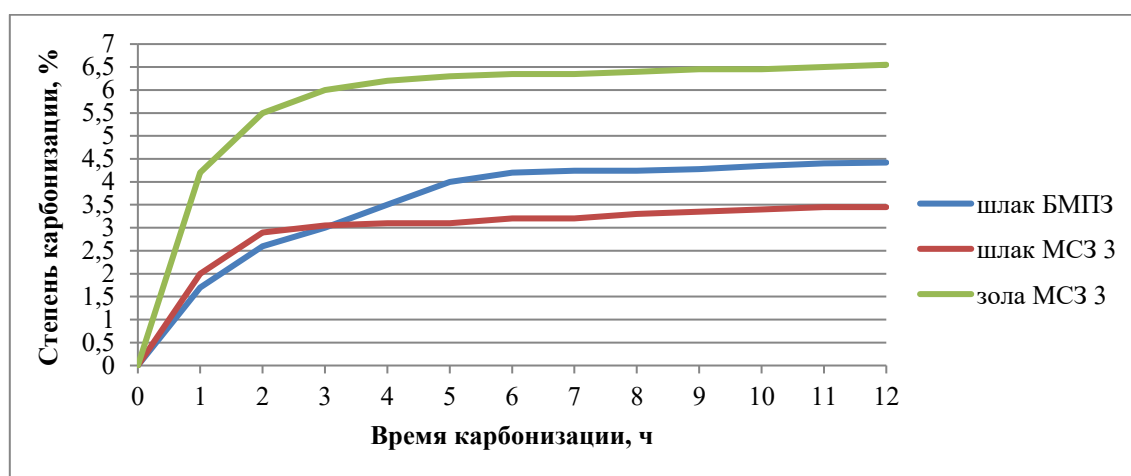
Герметичной камеры — 1; трубопровода — 2 соединяющего камеру 1 с баллоном — 3; баллона с диоксидом углерода (CO<sub>2</sub>) — 3; редуктора — 4; вентилятора — 5; образцов — 6; стеллажей оснащенных решеткой — 7; чаша с насыщенным раствором поваренной соли — 8; U-образной трубкой для сбора конденсата полученного в ходе эксперимента — 9; осушителя воздуха — 10; увлажнителя воздуха — 11; пульта управления автоматическим газоанализатором ОКА-Т-CO<sub>2</sub> — 12; датчиком автоматического газоанализатора, установленного внутри камеры — 13; химического газоанализатора (или хроматографа) — 14; системы тихоходных вентиляторов — 15; гибкого рукава, соединяющую камеру 1 с газоанализатором (хроматографом) — 16

**Рисунок 2.** Принципиальная схема лабораторной установки для исследования скорости улавливания диоксида углерода шлаками в газовых средах, состоящая из (составлено авторами)

Для проведения факторных экспериментов по закономерностям карбонизации шлак предварительно гидратировали, выдерживая в эксикаторе с насыщенным раствором поваренной соли. Изменяли продолжительность карбонизации, давление газа, температуру в камере и соотношение жидкого и твердого по массе. Варьируемые параметры были выбраны с учетом проведенных теоретических исследований процесса карбонизации кальцийсодержащих материалов и преследовали целью установление оптимальных условий осуществления принудительной карбонизации исследуемых образцов шлаков и золы в условиях повышенных концентраций углекислого газа [10].

Масса шлака для каждого эксперимента составляла  $20 \pm 0,2$  г. Подача  $\text{CO}_2$  осуществлялась из баллона с чистотой 99,9 %, концентрация газа в камере контролировалась с помощью автоматического газоанализатора ОКА-Т- $\text{CO}_2$ , точность измерений составляла 0,01 %.

Первоначально было изучено влияние времени воздействия  $\text{CO}_2$  на степень карбонизации образцов. Из данных, представленных на рисунке 3, следует, что основной прирост массы образцов, а, соответственно, и степени карбонизации, наблюдается в первые 6 часов нахождения образцов в камере. После этого процесс стабилизируется, и масса образцов изменяется незначительно. Степень карбонизации шлака МСЗ 3 несколько ниже, чем шлака БМПЗ, что объясняется меньшим содержанием в его составе фаз, способных к карбонизации, о чем говорится в нашей работе [9]. Степень карбонизации летучей золы, как и ожидалось, значительно выше, чем шлаков, что связано с высоким содержанием в ней портландита, псевдоволластонита, то есть минералов, способных к карбонизации. Хотя некоторые физические характеристики также играют важную роль — частицы золы имеют гораздо меньший размер и поэтому площадь поверхности и микропористость золы гораздо выше, чем у шлака.



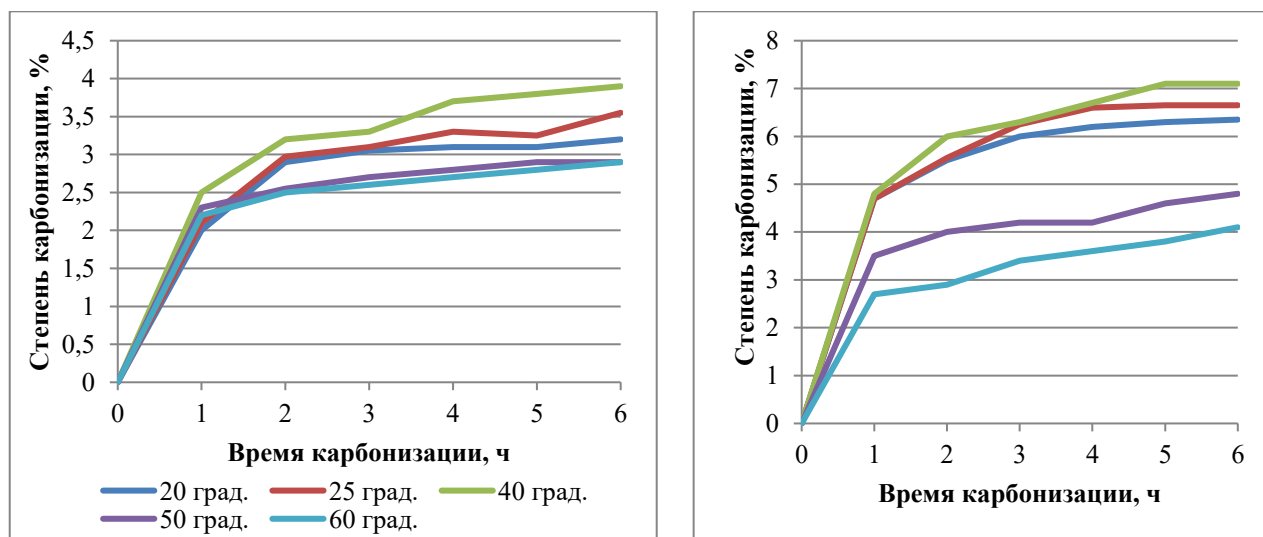
**Рисунок 3.** Влияние времени на степень карбонизации (составлено авторами)

Успешность процесса гидратации, проведенного в течение 24 часов, является критическим фактором для обеспечения стабильности и последующих свойств полученного материала.

Для оценки эффективности гидратации, образцы подвергались последующей карбонизации и анализу изменения массы в течение 7 суток. Карбонизация, как процесс термического разложения материала, позволяет выявить дефекты структуры, вызванные неполной гидратацией.

В случае неэффективной гидратации, в образце могут оставаться непрореагировавшие компоненты или области с недостаточной связностью, что приводит к значительному изменению массы в процессе карбонизации из-за испарения или деструкции.

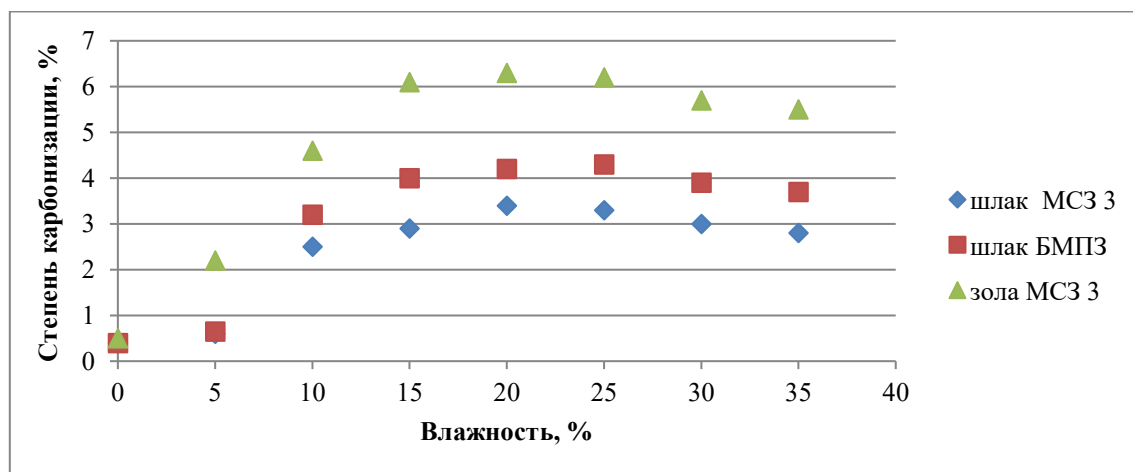
В ходе проведения эксперимента было изучено влияние температуры в камере на процесс карбонизации. Концентрация  $\text{CO}_2$  ~100 % об., нормальное давление 100 кПа (1 атм.), время карбонизации 6 часов, температура в камере изменялась от 60 до 20°C. Результаты карбонизации приведены на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Влияние температуры на карбонизацию шлака и золы МСЗ 3 (составлено авторами)

Результаты карбонизации шлака и золы МСЗ 3 приведены на рисунке 4. Со шлаком БМПЗ получены схожие зависимости с несколько большим значением степени карбонизации.

Температура не оказывает существенного влияния на степень карбонизации исследуемых материалов, что согласуется с данными термодинамических расчетов, приведенных в нашей работе [9]. При повышенной температуре 40–50°C даже, напротив, степень карбонизации образцов несколько снижается, что может быть объяснено уменьшением растворимости  $\text{CO}_2$  в поровой воде. Таким образом, специальное повышение температуры при карбонизации не требуется, если это только технологически неизбежно, например, при поступлении горячих шлаков.



**Рисунок 5.** Влияние влажности образцов шлаков и золы на результаты карбонизации (составлено авторами)

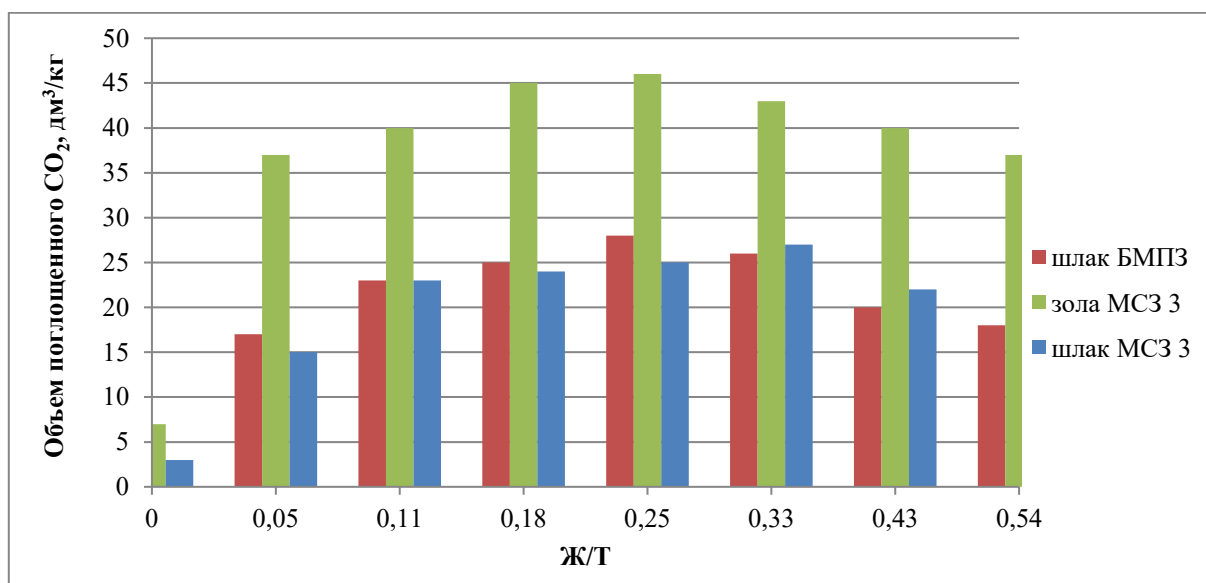
Процесс карбонизации чрезвычайно чувствителен к исходной влажности сырья или соотношению жидкого и твердого. В исследовании изучено влияние различной влажности образцов шлаков и золы на эффективность карбонизации (рис. 5).

Вариации в содержании влаги в исходном материале могут критически влиять на кинетику химических реакций, а также на формирование и структуру продуктов карбонизации.

Для полностью высушенных образцов их масса практически не изменялась в процессе карбонизации, поскольку реакция карбонизации протекает именно в водной фазе. Как показано в уравнениях механизма реакции карбонизации (уравнения 1–3), для ускорения реакции необходима вода. Без присутствия влаги может происходить прямая газотвердая карбонизация, но с очень медленной скоростью по сравнению с водной карбонизацией, как это было показано в работе [11].

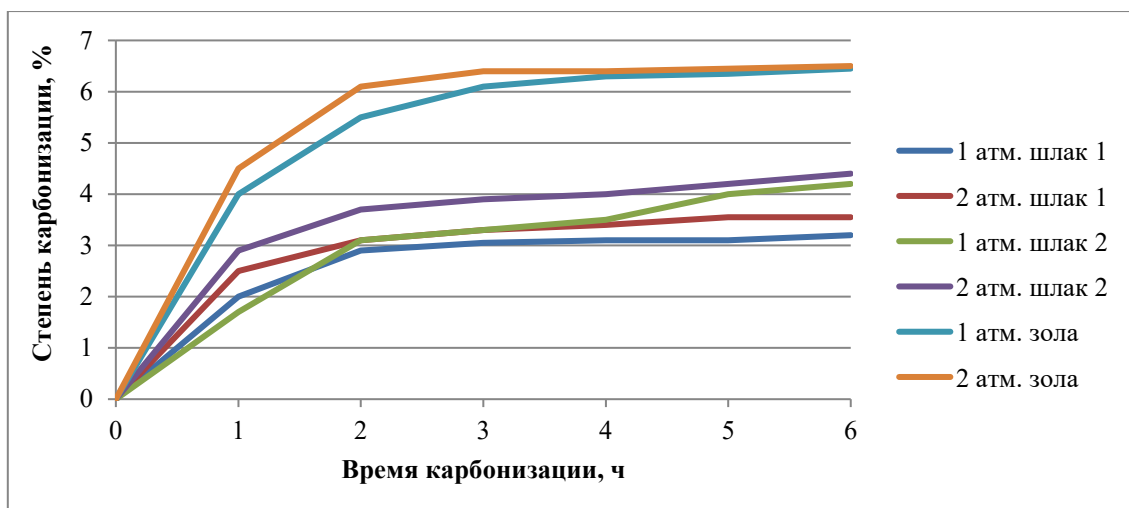
Наиболее целесообразной представляется влажность образцов 15–21 % масс., что соответствует  $Ж/Т = 0,18 - 0,43$ . При водосодержании свыше 21 % степень карбонизации снижалась. Это может указывать на то, что реакция в основном происходит в порах твердой матрицы. Избыток воды, вероятно, представляет собой межкристаллитную воду и в этом случае происходит меньший контакт между зольными остатками и растворенным  $CO_2$ , концентрация которого в водной среде зависит только от внешнего давления и температуры  $CO_2$ . Этот результат должен приниматься во внимание в зонах выветривания золоотвалов летом, когда они сухие, и для развивающихся закрытых полигонов, где кучи защищены от дождя и не увлажняются регулярно.

Влияние соотношения  $Ж:Т$  в исходном материале на карбонизацию, поскольку это очень важный параметр, также показано через объем поглощенного  $CO_2$  после карбонизации в течение 6 часов (рис. 6). Как следует из представленных данных, объем захваченного  $CO_2$  уменьшается с повышением влаги в образцах свыше определенного предела, что еще раз подтверждает факт: избыток воды в системе может блокировать диффузию  $CO_2$  в поры твердого вещества и тормозить реакцию карбонизации.



**Рисунок 6.** Влияние соотношения воды и твердого вещества шлаков и золы на связывание  $CO_2$  (составлено авторами)

Для оценки влияние парциального давления  $CO_2$  на карбонизацию остатков от сжигания ТКО были проведены эксперименты при давлении в диапазоне от 100 до 200 кПа (1–2 атм.). Содержание влаги в образцах было 20 % масс. На рисунке 7 показана степень карбонизации образцов при различных давлениях в течение первых 6 часов. Высокие значения давления  $CO_2$  в камере не принимались, поскольку создание повышенных давлений потребует больших затрат на процесс и вряд ли будет реализуемым.

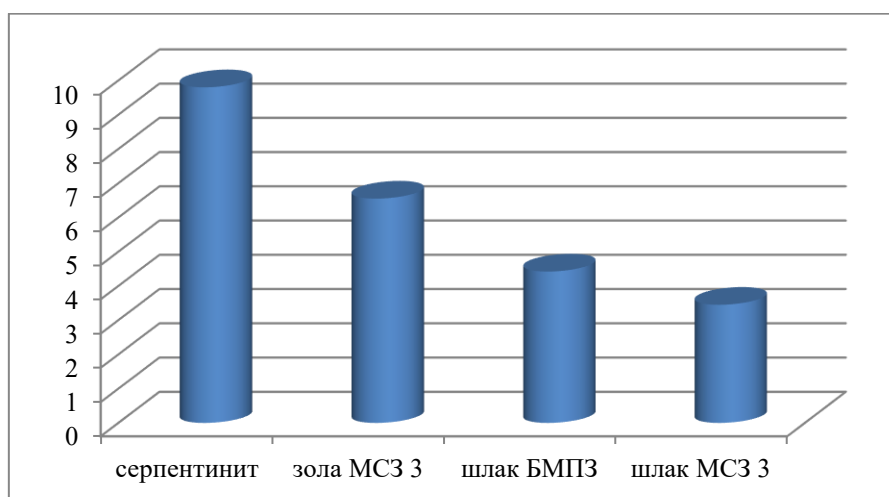


**Рисунок 7.** Влияние давления  $\text{CO}_2$  на результаты карбонизации шлаков и золы (составлено авторами)

Из графиков следует, что разница в давлении в 1 атм. не оказывает существенного влияния на кинетику реакции как для шлаков, так и для золы. Градиент графиков может служить отражением уровня поглощения  $\text{CO}_2$  или скорости карбонизации с течением времени. Как видно, при давлении 2 атм. плато достигается за более короткий промежуток времени ~2–3 часа, то есть карбонизация происходит быстрее.

Давление диоксида углерода не влияет на равновесие карбонизации с термодинамической точки зрения, но оно играет важную роль в кинетике всего процесса. То есть при повышенных парциальных давлениях  $\text{CO}_2$  реакция карбонизации может быть завершена гораздо быстрее.

В современных технологиях для декарбонизации применяется серпентинит, который, благодаря своему минералогическому составу и химическим свойствам, эффективно улавливает диоксид углерода [12–14]. Серпентинит способствует превращению диоксида углерода в стабильные карбонатные минералы.



**Рисунок 12.** Сравнение скорости карбонизации для различных материалов (составлено авторами)

На рисунке 8 представлено сравнение скорости карбонизации различных материалов — шлака, золы от сжигания ТКО и серпентинита, проведенное на лабораторной установке, при давлении в 1 атм, влажности 20 %. Крупность серпентинита — 0,5–1 мм.

Наибольшая скорость реакции наблюдается у серпентинита, что связано с высоким содержанием в нем оксидов магния, активно вступающих в реакцию с  $\text{CO}_2$ . Шлак демонстрирует средние показатели, а зола — наименьшие, что подтверждает необходимость выбора подходящих отходов для карбонизации.

### Заключение

Проведенное исследование процесса карбонизации шлаков от сжигания ТКО продемонстрировало перспективность данного метода для секвестрации  $\text{CO}_2$  и стабилизации отходов. Экспериментально установлено, что оптимальные параметры для карбонизации шлаков, полученных в ЕФН-Экотехпром Московский мусоросжигательный завод № 3 и в Брестском мусороперерабатывающем заводе, составляют температуру  $50^\circ\text{C}$  и давление 2 атм, влажность 20 %, обеспечивая максимальную эффективность связывания  $\text{CO}_2$ . Также установлено, что гидратация шлаков является важным этапом подготовки, увеличивающим их реакционную способность.

Сравнение с другими материалами, такими как серпентинит и зола от сжигания ТКО, выявило, что серпентинит обладает более высокой скоростью карбонизации, однако шлаки представляют собой доступный и перспективный материал для реализации процесса минеральной карбонизации.

Полученные результаты подчеркивают потенциал использования шлаков от сжигания ТКО для снижения выбросов  $\text{CO}_2$  и улучшения экологической обстановки в промышленных регионах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Power I. Serpentine Carbonation for  $\text{CO}_2$  Sequestration / I. Power, S. Wilson, G. Dipple — DOI: 10.2113/gselements.9.2.115 // Elements. — 2013. — Т. 9, № 2. — С. 115–121.
2. Huijgen W.J.J. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation: Literature review / W.J.J. Huijgen, R.N.J. Comans. — Petten: Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), 2003. — 52 с. — URL: <https://publications.ecn.nl/E/2003/ECN-C--03-016> (дата обращения: 12.05.2025).
3. Воробьев К.А. Изучение выбросов углекислого газа при термическом сжигании ТКО на модельной установке / К.А. Воробьев // Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горно-химического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов: материалы международной конференции. — Апатиты, 2024. — С. 542–545.
4. Пугин К.Г. Снижение экологической нагрузки при обращении со шлаками черной металлургии: монография / К.Г. Пугин, Я.И. Вайсман, Б.С. Юшков, Н.Г. Максимович. — Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2008. — 358 с.
5. Ткаченко Е.А. Технология карбонизации отходов производств как способ секвестрации  $\text{CO}_2$  / Е.А. Ткаченко, Т.Ф. Богатова, М.Б. Чернова // Теплофизика и физическая гидродинамика: сб. тр. V Всерос. науч. конф. — Екатеринбург: УрФУ, 2020. — С. 595–600.

6. Шадрунова И.В. Разработка концепции комплексной переработки отходов мусоросжигательных установок / И.В. Шадрунова, Е.В. Колодежная, О.Е. Горлова, К.А. Воробьев // Экология и промышленность России. — 2025. — Т. 29, № 2. — С. 4–11.
7. Baciocchi R. Accelerated carbonation of different types of APC residues for CO<sub>2</sub> storage and waste valorization / R. Baciocchi, G. Costa, E. Latégano [et al.] // Journal of Hazardous Materials. — 2015. — Т. 286. — С. 202–210.
8. Колодежная Е.В. Микроструктурные особенности строения силикатов в шлаках термической переработки твердых коммунальных отходов / Е.В. Колодежная, О.Е. Горлова, И.В. Шадрунова [и др.] — DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-1-39-50 // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2025. — Т. 31, № 1. — С. 39–50.
9. Колодежная Е.В. Вещественный состав остатков сжигания твердых коммунальных отходов и оценка их потенциала минерального связывания диоксида углерода / Е.В. Колодежная, И.В. Шадрунова, О.Е. Горлова, К.А. Воробьев — DOI: 10.17580/or.2025.01.07 // Обогащение руд. — 2025. — № 1. — С. 40–47.
10. Воробьев К.А. Возможности улавливания диоксида углерода шлаками мусоросжигательных заводов в газовых средах / К.А. Воробьев // Вестник Пермского университета. Геология. — 2023. — Т. 22, № 3. — С. 275–281.
11. Sanna A. A Review of Mineral Carbonation Technologies to Sequester CO<sub>2</sub> / A. Sanna, M. Uibu, G. Caramanna [et al.] — DOI: 10.1039/C4CS00035H // Chemical Society Reviews. — 2014. — Т. 43, № 23. — С. 8049–8080.
12. Воробьев К.А. Возможности использования шлаков мусоросжигательных заводов для снижения углеродсодержащих выбросов / К.А. Воробьев // Человек и окружающая среда: сб. докл. XI Всерос. молод. науч. конф. / под ред. Ю.А. Боброва [и др.]. — Сыктывкар, 2023. — С. 43–47.
13. Pan S.Y. CO<sub>2</sub> Capture by Accelerated Carbonation of Alkaline Wastes: A Review on Its Principles and Applications / S.Y. Pan, E.E. Chang, P.C. Chiang // Aerosol and Air Quality Research. — 2012. — Т. 12. — С. 770–791.
14. Воробьев К.А. Исследование количества диоксида углерода при сжигании отходов: экспериментальные измерения / К.А. Воробьев, Т.В. Чекушина, Н. Курбанов, Ш.И. Рабаданов // Естественные и технические науки. — 2024. — № 4(191). — С. 76–79.

### Vorobyev Kirill Alexandrovich

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia  
E-mail: k.vorobyev98@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5792-3979>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=887256](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=887256)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57193517186>

### Gorlova Olga Evgenievna

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia  
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
E-mail: gorlova\_o\_e@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1142-0652>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=301567](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=301567)

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAR-3735-2021>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56070743500>

### Shadrunova Irina Vladimirovna

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
E-mail: shadrunova\_i@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3520-2705>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=146965](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=146965)

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/K-1094-2014>

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6508278979>

### Chekushina Tatiana Vladimirovna

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia  
E-mail: council-ras@bk.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9261-1105>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=61549](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=61549)

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=8848759700>

## Experimental determination of optimal parameters of the process of carbonization of slag from incineration of municipal waste

**Abstract.** This article provides an in-depth investigation into the mineral carbonation process of slags resulting from the thermal processing of municipal solid waste (MSW). This process is considered a promising and environmentally sustainable method for capturing and long-term storage of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), a major greenhouse gas. The article presents a detailed theoretical justification of the process, including an analysis of the thermodynamic and kinetic aspects of carbonation reactions, as well as a consideration of the mechanisms of CO<sub>2</sub> interaction with various mineral components of slags. Particular attention is paid to the influence of the mineral composition of the slags on the efficiency and rate of carbonation.

The experimental research methods used to analyze the carbonation process are described in detail, such as differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). These methods allow us to study the phase composition of slags, the structure of the formed carbonate minerals, and their morphology.

The results of calculations of the optimal parameters for slag carbonation are presented, taking into account the influence of key factors such as temperature, CO<sub>2</sub> pressure, CO<sub>2</sub> concentration,

reaction time, and slag particle size. Particular attention is paid to studying the influence of temperature and pressure on the CO<sub>2</sub> binding rate and the formation of stable carbonate minerals, such as calcite, magnesite, and siderite. Serpentine, traditionally used for mineral carbonation due to its favorable chemical properties and high magnesium content, is considered as a reference material for comparison.

**Keywords:** carbonization; slag; ash; MSW; sequestration; thermal processing of waste; optimal parameters