

## Бесцементные вяжущие системы на основе отходов производства глинозема, твердеющие за счет принудительной карбонизации

Александр Сергеевич Бахтин, Николай Владимирович Любомирский,  
Тамара Алексеевна Бахтина, Герман Русланович Биленко,  
Иван Анатольевич Тюнюков

*Институт «Академия строительства и архитектуры» (структурное подразделение)  
Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (АСиА КФУ им. В.И. Вернадского);  
г. Симферополь, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Утилизация отходов производства с получением полезного продукта — один из базовых постулатов концепции устойчивого развития. В связи с этим актуальной задачей являются исследования получения вяжущих веществ и строительных изделий на их основе из отходов металлургических производств, твердеющих в среде углекислого газа за счет его поглощения, приобретая при этом необходимые физико-механические свойства.

**Материалы и методы.** Основным сырьевым компонентом стал нефелиновый шлам (НФШ) — вторичное сырье, образующееся из нефелиновых концентратов Кольского полуострова при производстве глинозема щелочным способом. Кристаллические фазы анализировали по измерению дифракции рентгеновских лучей (XRD) на дифрактометре Eurore 600 (GNR). Термический анализ проводили с помощью анализатора STA 8000 (Perkin Elmer). Дисперсный состав нефелинового шлама определяли методом лазерной дифракции на лазерном анализаторе размеров частиц Partica LA-960 (Horiba). Изменение пористости осуществлялось на Automated Standard Porosimeter 3.2 (MPM&P Research Inc). Механические характеристики опытных образцов определяли на автоматической сервогидравлической консоли управления МСС8 в комплекте с программным обеспечением.

**Результаты.** НФШ состоит не менее чем на 85 % мас. из белита ( $\beta$ - $C_2S$ ). Выявлено, что процесс активного поглощения  $CO_2$  нефелиновым шламом наблюдается в первые 120 мин карбонизации. Прочность при сжатии получаемого материала достигает 58 МПа, а после последующей гидратации прочность возрастает до 69 МПа. Рост прочности обусловлен образованием карбоната кальция в карбонизирующей системе. При последующей гидратации образуются гелеобразные продукты гидратации белита, дополнительно упрочняющие карбонизированный материал. С помощью метода эталонной контактной порометрии установлено, что в результате принудительной карбонизации материал уплотняется, общая пористость опытных образцов существенно уменьшается. Определено, что эффективные радиусы пор карбонизированных образцов смещаются в сторону меньших значений, в сравнении с образцами, не подверженными карбонизации, при этом данный процесс протекает в области макропор (0,1–16 мкм).

**Выводы.** На основе НФШ возможно получение строительных изделий, твердеющих в среде углекислого газа за счет его связывания и последующего процесса гидратации оставшегося белита, с получением материала, обладающего высокими физико-механическими свойствами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** нефелиновый шлам, принудительная карбонизация, гидратация, поглощение  $CO_2$ , механические свойства

*Благодарности.* Работа выполнена в рамках реализации в КФУ им. В.И. Вернадского федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030». Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные замечания и дополнения при работе над статьей.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Бахтин А.С., Любомирский Н.В., Бахтина Т.А., Биленко Г.Р., Тюнюков И.А. Бесцементные вяжущие системы на основе отходов производства глинозема, твердеющие за счет принудительной карбонизации // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 560–576. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.560-576

*Автор, ответственный за переписку:* Александр Сергеевич Бахтин, aleserba@mail.ru.

## Cement-free binder systems based on alumina production waste hardened by forced carbonation

Aleksandr S. Bakhtin, Nikolay V. Lyubomirskiy, Tamara A. Bakhtina,  
German R. Bilenko, Ivan A. Tyunyukov

*Institute “Academy of Construction and Architecture” (a structural division)  
of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol, Russian Federation*

## ABSTRACT

**Introduction.** The disposal of industrial waste to produce a useful product is one of the basic tenets of the concept of sustainable development. In this regard, an urgent task is to study the production of binders and building products based on them from waste from metallurgical industries, which harden in the environment of carbon dioxide due to its absorption, while acquiring the necessary physical and mechanical properties.

**Materials and methods.** The main raw material component was nepheline sludge, a secondary raw material formed from nepheline concentrates of the Kola Peninsula during the production of alumina by the alkaline method. The crystalline phases were analyzed by measuring X-ray diffraction (XRD) on a Europe 600 (GNR) diffractometer. Thermal analysis to determine the mineralogical composition of nepheline sludge and artificial stone based on it was performed using a STA 8000 analyzer (Perkin Elmer). The dispersed composition of the nepheline sludge was determined by laser diffraction on a laser particle size analyzer Partica LA-960 (Horiba). Porosity was changed using the Automated Standard Porosimeter 3.2 (MPM&P Research Inc.). The mechanical characteristics of the prototypes were determined on an automatic servo-hydraulic MCS8 control console complete with software.

**Results.** Nepheline sludge consists of at least 85 % by weight from belite ( $\beta$ -C<sub>2</sub>S). It was revealed that the process of active CO<sub>2</sub> absorption by nepheline sludge is observed in the first 120 minutes of carbonation. The compressive strength of the resulting material reaches 58 MPa, and after subsequent hydration, the strength increases to 70 MPa. The increase in strength is due to the formation of calcium carbonate in the carbonizing system. During subsequent hydration, gel-like hydration products of belite are formed, which additionally strengthen the carbonized material. Using the method of reference contact porosimetry, it was found that as a result of forced carbonation, the material is compacted, and the total porosity of the prototypes is significantly reduced. It is determined that the effective pore radii of carbonized specimens are shifted towards lower values in comparison with specimens not subject to carbonation, while this process takes place in the macropore region (0.1–16  $\mu$ m).

**Conclusions.** Based on nepheline sludge, it is possible to obtain construction products that harden in a carbon dioxide environment due to its binding and subsequent hydration process, to obtain a material with high physical and mechanical properties.

**KEYWORDS:** nepheline sludge, hydration, forced carbonation, CO<sub>2</sub> absorption, mechanical properties

*Acknowledgments.* The work was carried out as part of the implementation of the federal university support program “Priority 2030” at the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. The authors would like to thank the reviewers for their valuable comments and additions while working on the article.

**FOR CITATION:** Bakhtin A.S., Lyubomirskiy N.V., Bakhtina T.A., Bilenko G.R., Tyunyukov I.A. Cement-free binder systems based on alumina production waste hardened by forced carbonation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):560-576. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.560-576 (rus.).

*Corresponding author:* Aleksandr S. Bakhtin, aleserba@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Создание экологичной, безопасной и комфортной среды жизнедеятельности является на сегодняшний момент одним из актуальных мировых трендов, составляющих комплекс мероприятий для «устойчивого развития», нашедших отражение в федеральных и региональных программах развития на ближайшее десятилетие. Рост объемов производственной деятельности человека уже привел к значительным изменениям климата. В соответствии с международными научными и политическими взглядами основная причина повышения среднегодовой температуры атмосферы на 1,5 °C по сравнению с доиндустриальным уровнем вызвана увеличением содержания в атмосфере парниковых газов. Известный факт, что выбросы CO<sub>2</sub> выросли более чем на 400 % с 1950-х гг. в результате роста промышленного производства [1]. Глобальное потепление, вызванное деятельностью человека, привело к многочисленным наблюдаемым изменениям в климатической системе (с высокой степенью достоверности), таким как повышение температуры суши и океана; более частые периоды сильной жары в большинстве районов суши; рост риска засухи в Средиземноморском регионе; увеличение

частоты, интенсивности и количества обильных осадков в нескольких регионах<sup>1</sup>.

Основные выбросы антропогенного CO<sub>2</sub> приходятся на энергетическую, транспортную и промышленную отрасли мировой экономики. Доля строительной индустрии в мировых выбросах — 8 %, главным образом от производства портландцемента и других вяжущих веществ [2–5]. В количественном выражении эти объемы составляют на данное время 2,9–3,0 Гт в год. Такие показатели эмиссии CO<sub>2</sub> в промышленном секторе привели к поиску и разработке технологических решений по снижению и связыванию (секвестрации) CO<sub>2</sub> с получением при этом дополнительной продукции.

Также одна из проблем производства портландцемента в настоящее время — это использование большого количества качественного первичного сырья (известняка и глины, которые в некоторых регионах дефицитны) [6]. В попытках решить проблему ограниченности ресурсов ведутся исследования

<sup>1</sup> *Frei T.* Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty // Annex IV: Expert Reviewers of the IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 °C. 2018.

в разных направлениях: разработка портландцемента из различных отходов, применение дополнительных цементирующих материалов, частичная замена портландцементного клинкера и т.д. [7, 8].

Исследования по сокращению выбросов углекислого газа в процессе производства портландцемента показывают, что на 1 т производимого цемента выделяется в среднем 0,9–1,1 т CO<sub>2</sub>, в то время как потенциал связывания углекислого газа портландцементом составляет не более 5 % [9, 10]. Установлено, что на показатель связывания существенно влияет минералогический состав портландцементного клинкера, а белитовые цементы связывают большее количество углекислого газа, чем алитовые, приобретая в результате высокие физико-механические свойства. Эти исследования отразились на росте числа работ, ориентированных на снижение выбросов углекислого газа в цементной промышленности [11, 12]. Ряд разработанных дорожных карт и исследований рассматривают комплекс возможных направлений, в том числе использование дополнительных цементирующих материалов, таких как доменные металлургические шлаки, содержащие в своем составе 60–65 % минерала белит (C<sub>2</sub>S), а также нефелиновые шламы (НФШ), цементные отходы и угольную золу вместо природных ресурсов. Металлургические шлаки обладают слабой гидравлической активностью или ее отсутствием, однако имеют высокую реакционную способность к принудительной карбонизации (связыванию углекислого газа), а продукты карбонизации (карбонаты кальция/магния, гидраты силиката кальция) служат основными фазами, проявляющими вяжущие свойства [13, 14]. В процессе принудительной карбонизации материалов, содержащих C<sub>2</sub>S, изменяется пористость — она снижается за счет роста количества замкнутых пор, что зависит от условий протекания процесса. Количество микро- и мезопор увеличивается за счет образования кристаллов карбоната кальция и магния наноразмерного уровня, а количество макропор снижается [15–19]. В зависимости от времени карбонизации общая пористость может снижаться на 34–76 %. Таким образом, еще более перспективным вторичным сырьем для получения строительных материалов и изделий с низкой эмиссией CO<sub>2</sub> является нефелиновый шлам (попутный продукт производства глинозема щелочным способом из не-

фелиновых концентратов Кольского п-ова), содержащий в своем составе до 95 % белита.

Использование щелочных промышленных отходов для карбонизации минералов считается одним из перспективных направлений, поскольку их предполагаемый глобальный потенциал карбонизации может увеличиться до 3,3 Гт CO<sub>2</sub> в год к 2100 г., что может составить от 5 до 12 % от глобальных выбросов CO<sub>2</sub> к 2100 г. [20]. Кроме того, щелочные промышленные отходы могут быть карбонизованы на месте на том же заводе, где они производятся, минуя стадию транспортировки на полигоны хранения<sup>2</sup>.

Цель исследования — разработка вяжущих веществ на основе твердых минеральных промышленных отходов, способных связывать углекислый газ в процессе своего твердения, приобретая при этом требуемые физико-механические свойства.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сырьем для исследований стал НФШ Пикалевского глиноземного завода, являющийся крупнотоннажным попутным продуктом при производстве глинозема щелочным способом из нефелиновых концентратов Кольского полуострова. Нефелиновый шлам представляет собой мелкодисперсный продукт с долей свободной влаги 20–23 % мас. НФШ высушивали до постоянной массы при температуре 95 °С в лабораторном сушильном шкафу, чтобы исключить дальнейшее протекание возможных процессов гидратации основного минерала шлама. Необходимые качественные и количественные исследования НФШ осуществлялись после его высушивания. Химический анализ проводили с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) на энергодисперсионном спектрометре Epsilon 3XLE (PANalytical). Результаты анализа представлены в табл. 1.

Гранулометрический состав частиц НФШ определяли на лазерном дифракционном анализаторе Partica LA-960 (HORIBA) (рис. 1).

Результаты анализа показали, что гранулометрический состав НФШ составляют частицы размером от 2 до 2000 мкм. При этом анализ интегральной и дифференциальной кривых распределения частиц продемонстрировал, что НФШ представлен двумя

<sup>2</sup> IPCC. Special Report on CO<sub>2</sub> Capture and Storage // Intergovernmental Panel on Climate Change. 2005.

Табл. 1. Химический состав нефелинового шлама

Table 1. Chemical composition of nepheline sludge

Наименование Name	Содержание в пересчете на оксиды, % Content in terms of oxides, %							Всего, % Total, %
	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
Нефелиновый шлам Nepheline sludge	63,41	0,72	27,73	3,24	2,51	1,41	0,91	99,93

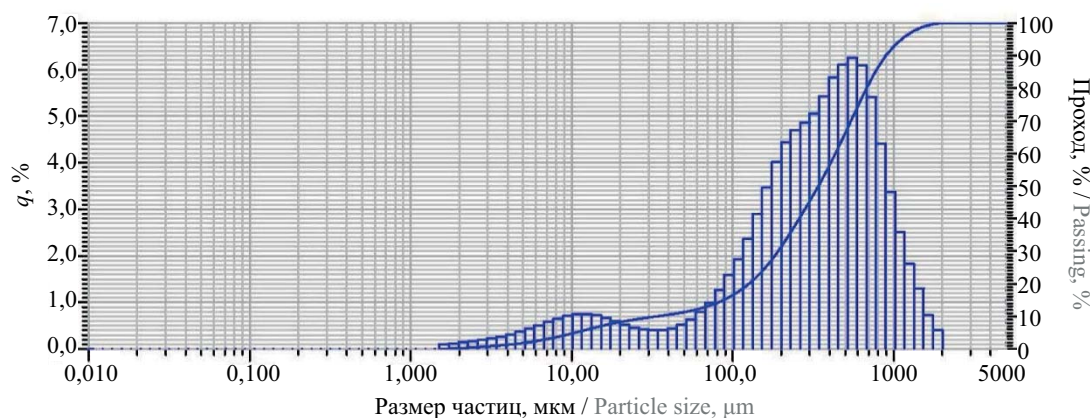


Рис. 1. Гранулометрический состав частиц НФШ

Fig. 1. Granulometric composition of NS particles

фракциями частиц: 2–50 и 50–2000 мкм с количественным соотношением 12 и 88 % соответственно. Общий средний геометрический размер частиц исследуемой пробы — 250 мкм.

Также кристаллические фазы НФШ анализировали по измерению дифракции рентгеновских лучей (XRD) на дифрактометре Eurore 600 (GNR) с вертикальной  $\theta$ – $\theta$ -геометрией Брегга – Брентано, укомплектованном керамической рентгеновской трубкой с медным анодом ( $\lambda = 1,541874 \text{ \AA}$ ). Угловой диапазон съемки по  $2\theta$  составлял  $5\text{--}80^\circ$ , шаг сканирования —  $0,02^\circ$ , время измерения — 35 мин ( $2,67 \text{ град/мин}$ ). Для выявления общего минерального состава среднюю пробу образца измельчали с помощью мельницы Retsch MM-400 до порошкового состояния. В программном комплексе (ПК) Match! и международной базе данных (ICDD PDF4 2020) выполняли идентификацию соединений путем сравнения полученного массива рефлексов с эталонными дифрактограммами индивидуальных соединений после установления фона, поиска и подгонки пиков. Количественное определение соединений проводилось по методу Ритвелда. Результаты рентгеноструктурного анализа представлены в табл. 2.

Из данных XRD-анализа следует, что исследуемый НФШ в основном представлен  $\beta$ - $\text{C}_2\text{S}$  (белит) в количестве 91,8 мас. % и незначительным количеством дополнительных минералов (см. табл. 2), главный из которых кальцит в количестве 4,5 мас. %.

Табл. 2. Кристаллические фазы нефелинового шлама

Table 2. Crystalline phases of nepheline sludge

Фаза Phase	Формула Formula	Массовая доля, % Mass fraction, %
Belite- $\beta$ (Larnite)	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	91,8
Belite- $\alpha'$	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	2,0
Calcite	$\text{CaCO}_3$	4,5
Monohydrocalcite	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1,4
Grossular	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	0,2
Chabazite	$\text{Ca}_{1,74}(\text{Al}_{3,48}\text{Si}_{8,52})\text{O}_{24} \cdot (\text{H}_2\text{O})_{18,15}$	0,1

Изучали влияние принудительной карбонизации на свойства НФШ на образцах-цилиндрах диаметром 30 мм и высотой  $30 \pm 2$  мм, для определения прочности на изгиб готовили образцы-пластины размером  $50 \times 50$  мм и толщиной  $8 \pm 1$  мм. Образцы-цилиндры и пластины формовали в металлических пресс-формах на гидравлическом прессе с имитацией двухстороннего встречного прессования из подготовленной сырьевой смеси, состоящей из НФШ и заданного количества воды. При проведении исследований НФШ не подвергали помолу, а использовали для формования опытных образцов в исходном состоянии (гранулометрии) (см. рис. 1).

Для установления комплексного влияния технологических факторов изготовления образцов, а также режима их принудительной карбонизации использовали метод математического планирования эксперимента и, в частности, ротатабельный центральный композиционный план [21]. Экспериментально-статистические (ЭС) модели каждого исследованного параметра получали с помощью ПК StatSoft STATISTICA 12 в виде коэффициентов уравнения второго порядка:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i z_i + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} z_i z_j + \sum b_{ii} z_i^2, \quad (1)$$

где  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ii}$  — коэффициенты корреляции, определяемые в результате математически-статистической обработки экспериментальных данных;  $z_i$ ,

Табл. 3. Исходные данные планирования эксперимента

Table 3. Initial experimental planning data

Наименование фактора Name of the factor	Код Code	Уровни варьирования Levels of variation					Интервал варьирования Variation interval
		-1,682	-1	0	1	1,682	
Давление прессования, МПа Pressing pressure, MPa	Z <sub>1</sub>	13,18	20,0	30,0	40,0	46,82	10,0
Водосодержание смеси, % Water content of the mixture, %	Z <sub>2</sub>	6,59	10,0	15,0	20,0	23,41	5,0
Время карбонизации, мин Carbonation time, min	Z <sub>3</sub>	19,08	60,0	120,0	180,0	220,92	60,0

z<sub>i</sub> — значение варьируемых рецептурно-технологических факторов.

На основе выводов, полученных при исследованиях принудительной карбонизации вяжущих

систем на базе извести, были выбраны следующие технологические факторы: формовочное удельное давление прессования опытных образцов-цилиндров Z<sub>1</sub>, начальное водосодержание сырьевой смеси

Табл. 4. Матрица планирования эксперимента и физико-механические свойства опытных образцов после карбонизации (КТ) и последующих 28 сут твердения (СТ)

Table 4. The experimental planning matrix and the physico-mechanical properties of the prototypes, after carbonation (CH) and the subsequent 28 days of hardening (MH)

Переменные факторы в натуральном выражении Variable factors in kind			Оптимизируемые параметры Optimized parameters									
Z <sub>1</sub> , МПа MPa	Z <sub>2</sub> , %	Z <sub>3</sub> , мин min	R <sub>сж</sub> , МПа R <sub>c</sub> , MPa		R <sub>изг</sub> , МПа R <sub>r</sub> , MPa		ρ <sub>о</sub> , кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>		W <sub>m</sub> , %		K <sub>p</sub> K <sub>s</sub>	
			КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ DH
20,0	10,0	60,0	16,84	22,86	5,1	6,9	1712	1713	20,0	19,3	0,97	0,85
40,0	10,0	60,0	43,62	46,27	7,9	8,4	1835	1844	17,4	16,8	0,82	0,85
20,0	20,0	60,0	5,44	22,95	4,4	4,6	1640	1674	23,3	19,7	0,97	0,84
40,0	20,0	60,0	6,37	26,18	3,1	4,9	1747	1745	20,2	19,7	0,76	0,62
20,0	10,0	180,0	23,22	24,05	4,3	4,3	1828	1812	20,5	19,0	0,82	0,81
40,0	10,0	180,0	44,72	43,53	8,2	8,2	1997	1851	16,7	16,2	0,89	0,86
20,0	20,0	180,0	14,21	44,65	7,5	8,9	1670	1741	18,5	17,1	0,99	0,91
40,0	20,0	180,0	10,81	25,59	6,7	7,4	1765	1792	18,6	17,5	0,78	0,88
13,18	15,0	120,0	29,21	25,91	3,5	3,3	1640	1645	20,9	19,5	0,72	0,86
46,82	15,0	120,0	57,64	59,18	7,0	7,2	1870	1882	15,9	15,0	0,79	0,84
30,0	6,59	120,0	23,08	28,74	4,0	4,5	1760	1764	18,2	18,6	0,88	0,77
30,0	23,41	120,0	4,38	15,79	3,6	3,8	1706	1713	22,7	20,4	0,80	0,68
30,0	15,0	19,08	11,23	24,66	3,1	3,7	1709	1700	20,7	21,5	0,98	0,51
30,0	15,0	220,92	54,94	68,71	6,4	7,8	1886	1865	13,9	14,2	0,90	0,75
30,0	15,0	120,0	26,55	47,00	5,0	7,2	1810	1770	15,1	17,3	0,94	0,77
30,0	15,0	120,0	23,31	45,32	4,9	7,1	1791	1741	15,9	18,3	0,94	0,73
30,0	15,0	120,0	24,00	45,08	4,9	7,0	1795	1757	15,8	17,5	0,91	0,75
30,0	15,0	120,0	26,11	46,23	5,1	7,1	1807	1761	15,3	16,7	0,93	0,77
30,0	15,0	120,0	25,57	44,08	5,2	6,9	1802	1758	15,1	17,0	0,94	0,76
30,0	15,0	120,0	24,78	46,63	5,5	7,2	1797	1746	15,3	16,8	0,91	0,78

$Z_2$ , время принудительной карбонизации  $Z_3$  [22, 23]. В табл. 3 представлены исходные данные планирования эксперимента.

В табл. 4 приведена матрица планирования эксперимента в кодированном и натуральном выражении. Величину анализируемого параметра оптимизации определяли как среднее арифметическое при испытании шести опытных образцов.

По истечении заданного времени принудительной карбонизации (см. табл. 3) из каждой точки плана часть образцов с остаточной влажностью помещалась в камеру нормального твердения ( $T = 20$  °С;  $W = 95$  %) для испытания их после 28 сут. Для удобства эти образцы в дальнейшем обозначались как СТ (смешанное твердение, включающее начальную принудительную карбонизацию и последующую гидратацию). Вторую часть образцов аналогичного состава высушивали до постоянной массы при температуре 90 °С и испытывали для определения свойств сразу после карбонизации и обозначали как КТ (карбонатное твердение). Таким образом, исследовался процесс возможного дальнейшего гидратационного твердения материала после его начальной принудительной карбонизации. Дополнительно была изготовлена партия опытных образцов и сразу после изготовления помещена в камеру выдержки ( $T = 20$  °С;  $W = 95$  %) для испытания их после 28 сут естественного твердения. Данная партия образцов не подвергалась начальной принудительной карбонизации и обозначалась как ГТ (гидратационное твердение). Эти образцы предназначались для получения сравнительных данных чистого гидратационного твердения и соответственно смешанного.

Принудительную карбонизацию опытных образцов-цилиндров выполняли в разработанной авторами карбонизационной установке [23]. Эксперимент проводили при концентрации  $\text{CO}_2$  60 % и при атмосферном давлении. Камера карбонизации представляет собой металлическую емкость из нержавеющей стали с гидравлической рубашкой и герметично закрывающейся крышкой. Внутри камеры установлен вентилятор для осуществления во внутреннем пространстве перемешивания и равномерного распределения углекислого газа. Для выкачивания из внутреннего объема воздуха и создания в камере требуемой концентрации  $\text{CO}_2$  подключен вакуум-насос. Источник углекислого газа — жидкая двуокись углерода высокого давления в баллонах.

Основные исследуемые физико-механические свойства опытных образцов-цилиндров — прочность при сжатии  $R_{\text{сж}}$ , прочность на изгиб  $R_{\text{изг}}$ , средняя плотность  $\rho_0$ , водопоглощение по массе  $W_m$  и водостойкость  $K_p$ . Прочность на сжатие и изгиб, среднюю плотность и водопоглощение по массе определяли по стандартным методикам для строительных материалов. Водостойкость устанавливали по коэффициенту размягчения  $K_p$ , который отражает способность материала сохранять свои эксплуатационные свойства при воздействии воды. Он рассчитывается

как отношение прочности при сжатии образца в насыщенном водой состоянии  $R_{\text{вл}}$  к прочности при сжатии в сухом состоянии  $R_{\text{сух}}$  по формуле:

$$K_p = \frac{R_{\text{вл}}}{R_{\text{сух}}}. \quad (2)$$

К водостойким относятся материалы, значение  $K_p$  которых более 0,8.

Фазовый состав образцов СТ и КТ, а соответственно и количество поглощенного  $\text{CO}_2$  определяли с помощью термического и рентгенографического фазового анализа. В качестве структурной характеристики опытных образцов проводилось исследование их пористой структуры в зависимости от типа твердения (СТ или ГТ) с помощью метода эталонной контактной порометрии. Изменение пористости (распределение пор по размерам и их удельной поверхности) осуществлялось на Automated Standard Porosimeter 3.2 (MPM&P Research Inc).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 4 представлены матрица планирования эксперимента и результаты определения физико-механических свойств опытных образцов.

В табл. 5 приведены рассчитанные в результате статистической обработки опытных данных коэффициенты корреляции уравнений регрессии параметров оптимизации.

Анализ табл. 4, 5 свидетельствует об изменении основных исследуемых свойств карбонизированных образцов после их выдержки в течение 28 сут. Из оценки коэффициента  $b_0$  следует, что после 28 сут твердения существенно изменяется только прочность при сжатии  $R_{\text{сж}}$  и водостойкость  $K_p$ , а изменение остальных свойств незначительно. При этом плотность  $\rho_0$  образцов снижается, а водопоглощение  $W_m$  возрастает.

Значимость влияния отдельных технологических факторов на формирование свойств карбонизированного НФШ различна. Если на прочность при сжатии  $R_{\text{сж}}$  сразу после карбонизации определяющее значение оказывает начальное водосодержание смеси  $Z_2$  (модель 1,  $b_2 = -18,02$ ), то после 28 сут твердения определяющим фактором для этого параметра становится время карбонизации  $Z_3$  (модель 2,  $b_3 = 14,81$ ). Однако разница в абсолютных значениях между коэффициентами  $b_2$  и  $b_3$  ( $-18,02$  и  $17,47$  соответственно) сразу после карбонизации (модель 1) не столь велика, что указывает на существенное взаимное влияние факторов  $Z_2$  и  $Z_3$  на формирование свойств карбонизированных образцов. Аналогичная ситуация наблюдается и при анализе коэффициентов для других исследуемых свойств ( $R_{\text{изг}}$ ,  $\rho_0$ ,  $W_m$ ,  $K_p$ ) опытных образцов. Так, наиболее значимым фактором после карбонизации для прочности при изгибе и водостойкости  $R_{\text{изг}}$  и  $K_p$  является давление прессования  $Z_1$ , а для плотности и водопоглощения  $\rho_0$  и  $W_m$  более весомым выступает время карбонизации  $Z_3$ .

**Табл. 5.** Коэффициенты корреляции уравнений регрессии изменения основных физико-механических свойств опытных образцов, полученных после карбонизации (КТ) и последующих 28 сут твердения (СТ)

**Table 5.** Correlation coefficients of regression equations for changes in the basic physical and mechanical properties of prototypes obtained after carbonation (CH) and the subsequent 28 days of hardening (MH)

Обозначение коэффициентов Designation of coefficients	Коэффициенты ЭС-моделей исследуемых параметров в зависимости от времени испытания Coefficients of the ES models of the studied parameters depending on the test time									
	$R_{сж}$ , МПа $R_c$ , МПа		$R_{изт}$ , МПа $R_f$ , МПа		$\rho_o$ , кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>		$W_m$ , %		$K_p$ $K_s$	
	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH	КТ CH	СТ MH
$b_o$	25,87	46,6	4,82	6,98	1799,1	1754,6	15,45	17,81	0,94	0,74
$b_1$	10,03	11,06	1,77	1,55	104,4	90,6	-2,19	-1,94	0,11	0,039
$b_2$	-18,02	-5,73	-0,65	-0,465	-93,8	-51,8	1,99	0,84	-0,02	-0,039
$b_3$	17,47	14,81	1,48	1,62	115,9	83,4	-3,05	-2,52	-0,09	0,029
$b_{11}$	8,54	-4,7	0,83	-0,515	-25,3	10,1	2,28	-0,42	-0,011	0,114
$b_{22}$	-12,45	-19,04	-0,197	-1,29	-40,9	-7,5	3,73	1,17	-0,054	0,026
$b_{33}$	1,23	-1,78	0,474	-0,16	4,76	23,6	1,50	0,01	0,016	-0,041
$b_{12}$	1,43	5,66	1,80	2,40	-57,5	2,0	-1,55	-0,98	0,03	0,090
$b_{13}$	-2,40	-6,56	0,40	0,15	8,5	-28,0	0,50	0,03	0,055	0,060
$b_{23}$	-12,69	-14,68	-2,20	-1,65	-22,5	-12,0	0,85	1,43	0,085	-0,075

Обобщенный анализ коэффициентов (см. табл. 5) показывает, что все выбранные технологические факторы (см. табл. 3) влияют на качественное и количественное протекание химической реакции карбонизации основного минерала НФШ ( $\beta-C_2S$ ), его последующее гидратационное твердение, а соответственно и на формирование свойств полученного материала. Также необходимо отметить, что факторы, непосредственно отвечающие за процесс протекания химической реакции карбонизации — это начальное водосодержание смеси  $Z_2$  и время карбонизации  $Z_3$ .

Для получения сравнительных данных о протекании чистого гидратационного твердения исследуемого нефелинового шлама дополнительно была изготовлена партия опытных образцов и сразу после изготовления помещена в камеру выдержки ( $T = 20^\circ C$ ;  $W = 95\%$ ) для испытания их после 28 сут естественного твердения. Соответственно, эта партия опытных образцов не подвергалась принудительной карбонизации.

Условия изготовления образцов соответствовали условиям табл. 4. Результаты испытаний представлены в табл. 6.

Данные табл. 6 показывают, что исследуемый НФШ обладает слабой гидравлической активностью. Наблюдается незначительный рост прочности при сжатии и изгибе в 28-суточном возрасте. Средняя плотность к 28 сут твердения снижается, что также подтверждает протекание процессов гидратации белита ( $\beta-C_2S$ ), сопровождающихся образованием капиллярно-пористой структуры материала, а соответственно и снижением его плотности. Для образцов гидравлического твердения прочность при сжатии в 28 сут твердения составила 13,0 МПа, тогда как аналогичный показатель предварительно карбонизированных образцов (см. табл. 4) варьировался в пределах 24,66–68,71 МПа (точки № 13–20) и зависел от времени карбонизации. Также уже после 19 мин принудительной карбонизации (см. табл. 4,

**Табл. 6.** Физико-механические свойства опытных образцов (ГТ), не подверженных начальной принудительной карбонизации и твердевших в течение 28 сут

**Table 6.** Physico-mechanical properties of experimental specimens (HH) that are not subject to initial forced carbonation and hardened for 28 days

Условия изготовления Manufacturing conditions	Свойства образцов (ГТ) в зависимости от времени твердения, сут Properties of the specimens (HH) depending on the curing time, days																				
	$Z_1$ , МПа MPa	$Z_2$ , %	3	7	14	28	3	7	14	28	3	7	14	28	3	7	14	28			
		$R_{сж}$ , МПа $R_c$ , МПа				$R_{изт}$ , МПа $R_f$ , МПа				$\rho_o$ , кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>				$W_m$ , %				$K_p$ $K_s$			
30,0	15,0	3,3	4,7	9,5	13,0	0,5	0,9	1,6	1,9	1739	1737	1707	1701	24,3	24,1	23,4	22,2	0,91	0,91	0,94	0,95

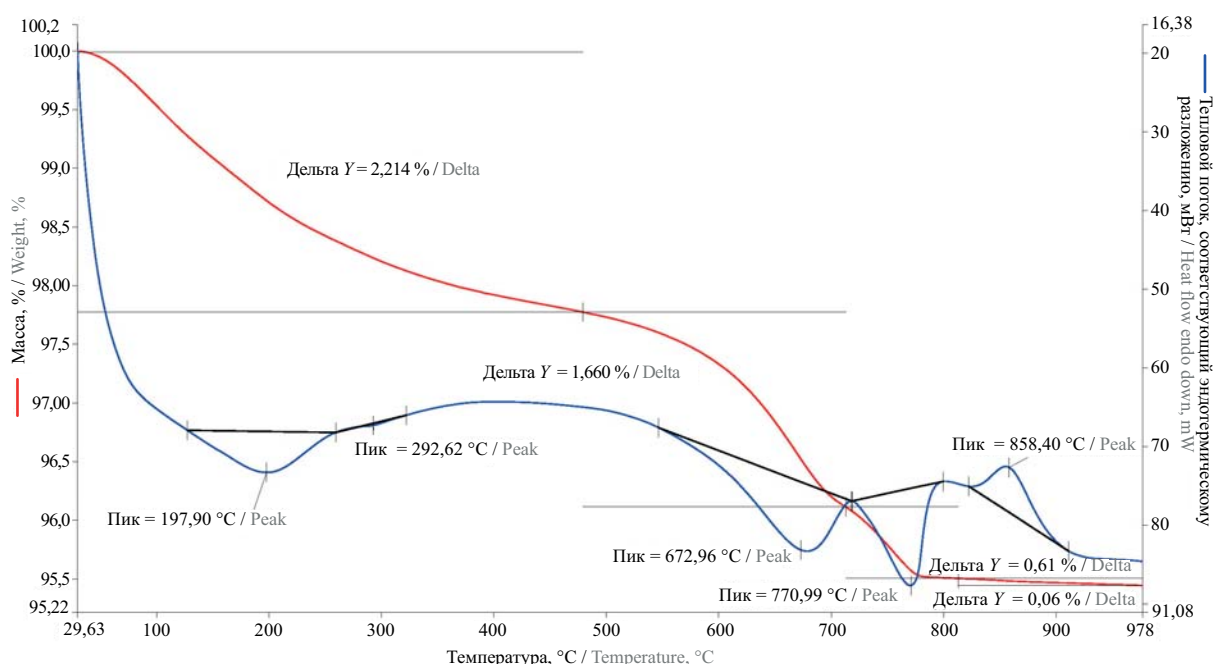
точка № 13) прочность при сжатии образцов составила 11,23 МПа. Это значение сопоставимо со значением 13,0 МПа для образцов, неподверженных карбонизации и твердевших 28 сут. Анализ табл. 4 и 6 показывает, что образцы смешанного твердения обладают гораздо более высокими показателями физико-механических и гидрофизических свойств в сравнении с аналогичными показателями после чистого гидратационного твердения (табл. 6).

Эффективность протекания реакции карбонизации, помимо изменения свойств материала после карбонизации, также связана с количественным поглощением углекислого газа на единицу массы этого материала. Данный показатель является определяющим в понимании перспективности применения того или иного материала, способного связывать  $\text{CO}_2$ . С целью установления количества  $\text{CO}_2$  в настоящем исследовании применяли методы термического и рентгенофазового анализов. Согласно плану проводимого эксперимента, наибольшим приростом массы образцов после карбонизации при различном сочетании технологических факторов изготовления образцов характеризовалась точка плана № 14 (см. табл. 4). Для этих образцов, исходного нефелинового шлама, а также для образцов, не подверженных карбонизации и твердевших только по гидратационному механизму (табл. 6), выполнен термический и рентгенографический фазовый анализы в возрасте 28 сут твердения. Данные термического анализа представлены на рис. 2.

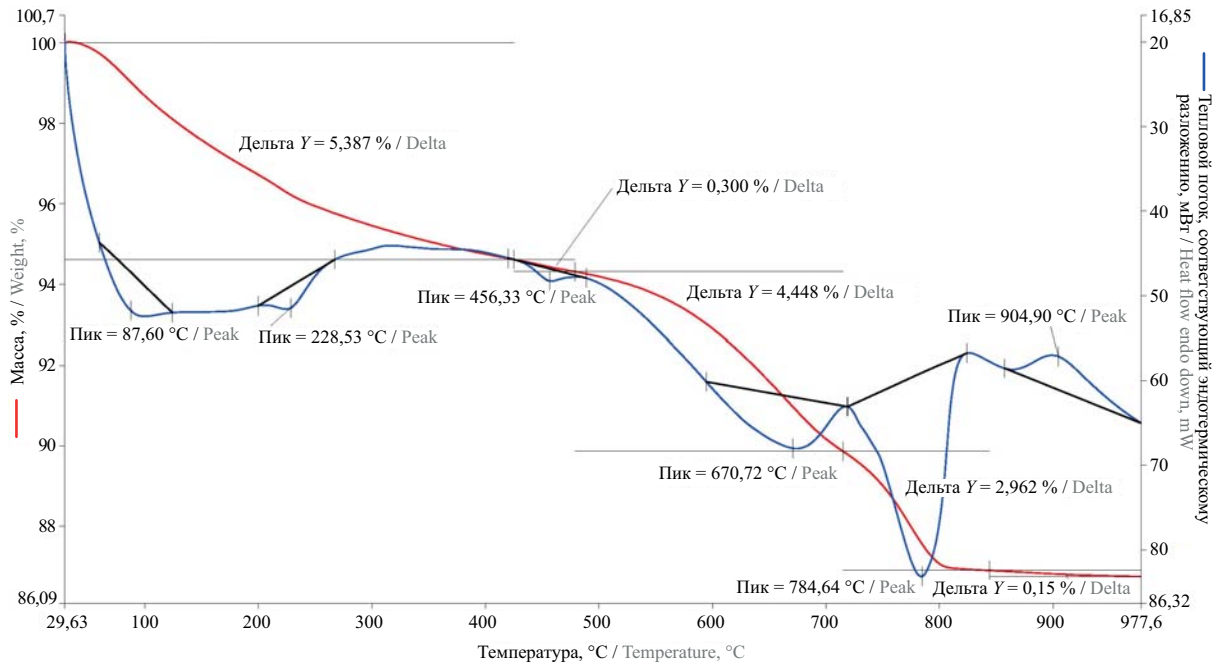
Согласно сведениям термического анализа исходного НФШ (рис. 2, а) на DSC-кривой присутствуют три ярко выраженных эндотермических эффекта в диапазоне температур 130–800 °С, а также один экзотермический эффект в диапазоне температур

820–920 °С с экстремумом при 858 °С. Присутствует также незначительный по площади и изменению теплового потока эндоэффект с экстремумом при 293 °С. Особенности переработки нефелиновых концентратов способом спекания с последующим извлечением глинозема позволяют теоретически получать попутный продукт (НФШ), представленный в основном минералом белит. Известны четыре кристаллические модификации белита ( $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\gamma$  и  $\beta$ ). Из них только модификация  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  обладает слабой гидравлической активностью, а ее кристаллизация в процессе образования НФШ наиболее вероятна [24]. Таким образом, в составе исследуемого нефелинового шлама может содержаться как безводный  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ , так и продукты его гидратации. Эндоэффекты в интервале до 350 °С с максимумами при 198 и 293 °С на DSC-кривой соответствуют частично удалению адсорбционной воды из гелеобразных продуктов гидратации  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ . Эндоэффект с максимумом при 673 °С предположительно соответствует полной дегидратации высокоосновных гидросиликатов кальция типа  $\text{C}_2\text{SH}_2$ . Эндотермический эффект при 771 °С с потерей массы 0,61 мас. % соответствует диссоциации карбоната кальция, находящегося в шламе в количестве до 2,0 мас. %. Экзотермический эффект в диапазоне температур 820–920 °С с экстремумом при 858 °С, вероятно, характеризует фазовый переход дегидратированных силикатов кальция в волластонит. Суммарная потеря массы НФШ составила 4,54 мас. %.

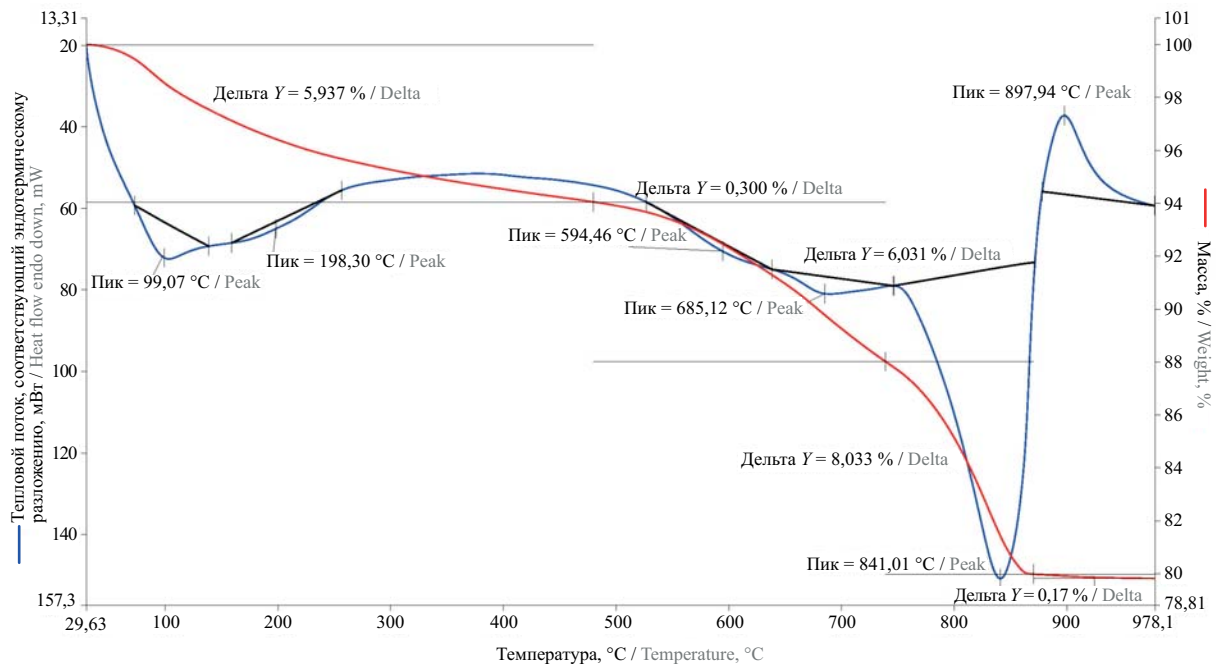
TG- и DSC-кривые термограммы образцов ГТ (рис. 2, б) в основном повторяют конфигурацию аналогичных кривых исходного НФШ (рис. 2, а). Отличие — повышенная потеря массы на TG-кривой в соответствующих температурных интервалах и уве-



а



b



c

Рис. 2. Результаты TG- и DSC-анализа исходного нефелинового шлама (a); образцов ГТ (b); образцов СТ (c)

Fig. 2. Results of TG-DSC analysis of the initial nepheline sludge (a); NH specimens (b); MH specimens (c)

личение площади термических эффектов с сохранением температурных максимумов, что подтверждает протекание процесса гидратации белита ( $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ) и образование более значительного количества гелеобразных продуктов гидратации. Также фактором, подтверждающим протекание гидратационных процессов с появлением дополнительных продуктов реакции, является появление эндоэффекта в интервале 420–479 °C с максимумом при 456 °C. Этот эффект соответствует дегидратации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Количество

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ , рассчитанное по величине потери массы, составило 1,23 %. Необходимо отметить, что изменение массы пробы в диапазоне 820–977 °C, связанное с фазовым переходом дегидратированных силикатов кальция в волластонит, составило 0,15 %, что в 2,5 раза больше аналогичного показателя (0,06 %) для НФШ (рис. 2, a).

DSC-кривая карбонизированных и далее твердевших 28 сут образцов (рис. 2, c) имеет два отличительных признака в сравнении с аналогичной кривой

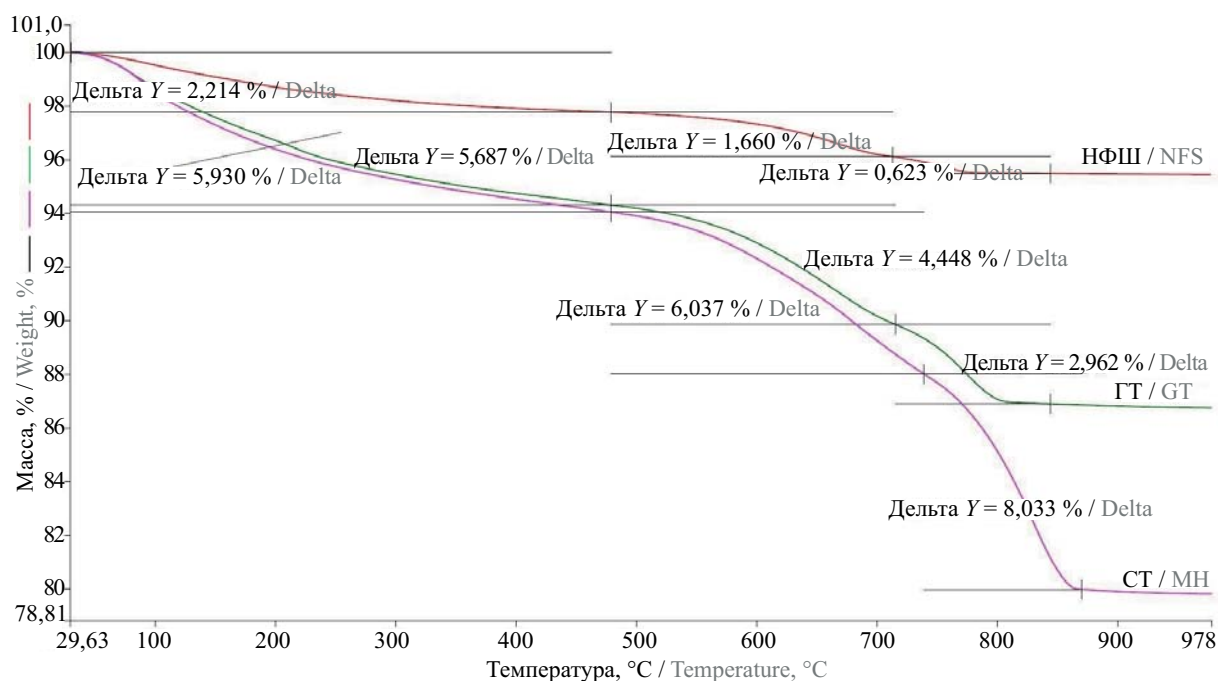


Рис. 3. Результаты TG-анализа образцов: НФШ, ГТ и СТ

Fig. 3. Results of TG analysis of specimens: NS, NH and MH

(рис. 2, b). Так, эндоэффект, характеризующий наличие карбоната кальция, имеет более значительную площадь поверхности и существенно смещенный в более высокую температурную область максимум,

а именно 841 °С в отличие от 784,6 °С для не карбонизированных образцов. Разница в потере масс, характеризующая количество выделившегося CO<sub>2</sub>, также ощутима и составляет соответственно 8,0 и 2,9 %.

Табл. 7. Изменение массы исследуемых образцов в соответствующих температурных диапазонах в зависимости от условий твердения нефелинового шлама

Table 7. Change in the mass of the studied specimens in the corresponding temperature ranges depending on the hardening conditions of nepheline sludge

Наименование Name	Температурный диапазон, °С Temperature range, °C					Общая потеря массы, % Total weight loss, %	
	30–479	479–715	479–740	715–820	740–880	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
	Потеря массы, % Weight loss, %						
НФШ / NS	2,21	1,66	–	0,62	–	3,87	0,62
ГТ / NH	5,39/0,3*	4,45	–	2,96	–	9,84	2,96
СТ / MH	5,93	–	6,04	–	8,03	11,97	8,03
Физико-химические изменения Physicochemical changes	Частичное удаление адсорбционной воды из гелеобразных продуктов гидратации β-C <sub>2</sub> S Partial removal of adsorption water from gel-like hydration products of β-C <sub>2</sub> S		Полная дегидратации высокоосновных гидросиликатов кальция Complete dehydration of highly basic calcium hydrosilicates		Диссоциация CaCO <sub>3</sub> Dissociation of CaCO <sub>3</sub>		

Примечание: 5,39/0,3\* — 0,3 % соответствует дегидратации Ca(OH)<sub>2</sub> (см. рис. 2, b) и в расчете степени гидратации не учитывается.

Note: 5.39/0.3\* — 0.3 % corresponds to the dehydration of Ca(OH)<sub>2</sub> (see Fig. 2, b) and is not taken into account in the calculation of the degree of hydration.

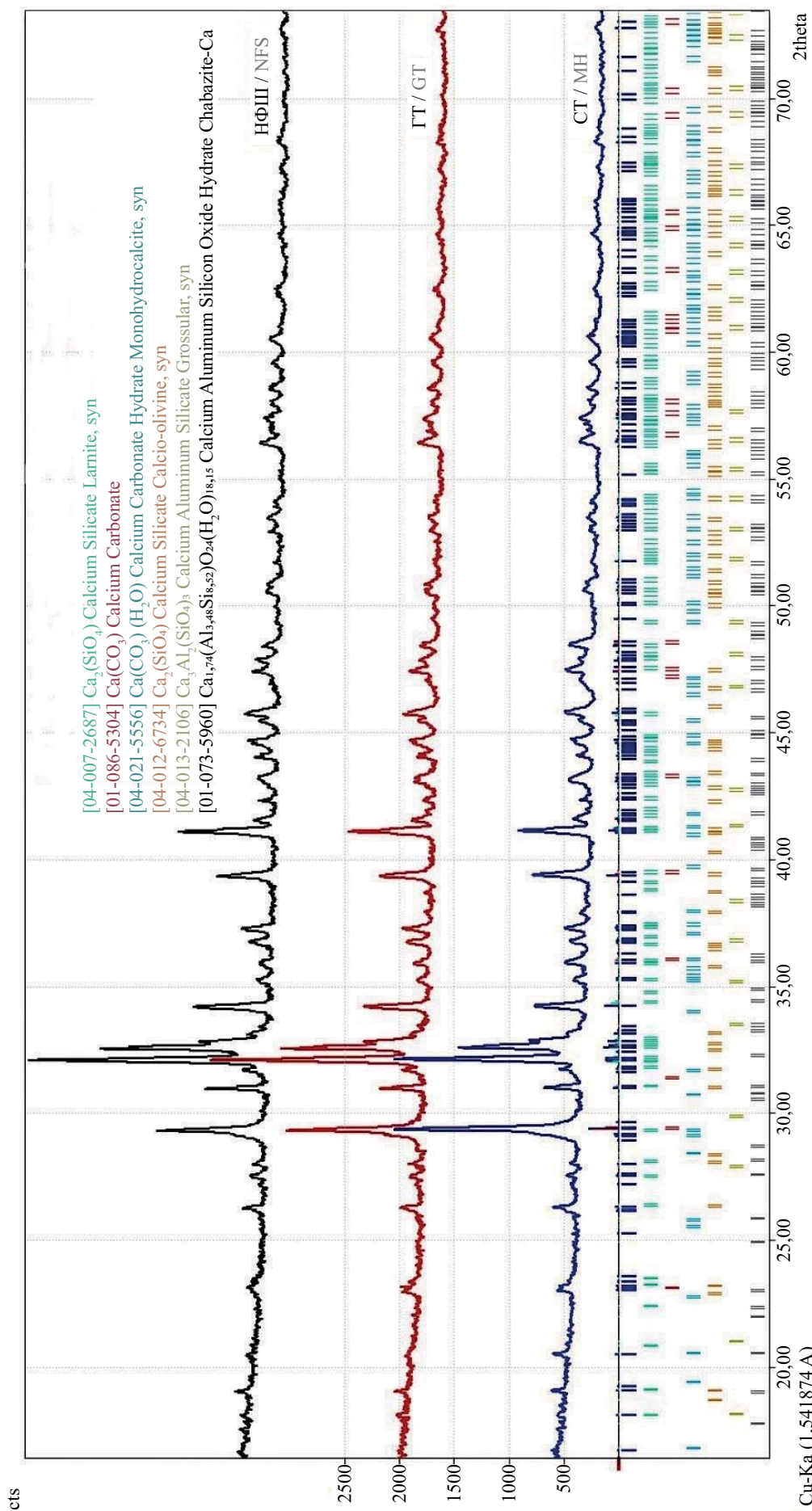


Рис. 4. Результаты XRD-анализа образцов: НФШ, ГТ и СТ

Fig. 4. XRD specimen analysis results: NS, NN and MH

Табл. 8. Кристаллические фазы образцов гидратационного и смешанного твердения

Table 8. Crystalline phases of specimens of hydration and mixed hardening

Фаза Phase	Формула Formula	ГТ / НН		СТ / МН	
		Массовая доля, % Mass fraction, %			
Belite-β (Larnite)	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	88,6		71,3	
Belite-α'	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	1,3		1,9	
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	7,4		20,8	
Monohydrocalcite	CaCO <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O	1,4		5,2	
Grossular	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,6		0,6	
Chabazite	Ca <sub>1,74</sub> (Al <sub>3,48</sub> Si <sub>8,52</sub> )O <sub>24</sub> · (H <sub>2</sub> O) <sub>18,15</sub>	0,3		0,2	

Более подробный анализ изменения массы исследуемых образцов в соответствующих температурных диапазонах представлен на рис. 3 и в табл. 7.

Оценка количественных показателей изменения массы исследуемых образцов (см. рис. 3, табл. 7) показывает, что предварительная карбонизация шлама способствует большей степени гидратации белита (β-C<sub>2</sub>S) в возрасте 28 сут в сравнении с аналогичным образцом, не подвергнутым начальной карбонизации. Степень гидратации образцов-цилиндров, твердевших по гидратационному типу — 9,84 %, твердевших по смешанному типу — 11,97 %. Степень связываемого углекислого газа также была выше и составила 2,96 и 8,03 % соответственно. Расчетные значения содержания карбоната кальция — 6,7 и 18,3 %. Из приведенных экспериментальных данных следует, что одна тонна нефелинового шлама (в исходной granulometrii) может связать 80,3 кг углекислого газа. Следует отметить, что для образцов, твердевших по смешанному режиму, наблюдается смещение температурного диапазона в сторону больших температур как для процессов полной дегидратации высокоосновных гидросиликатов кальция, так и для диссоциации CaCO<sub>3</sub>, что говорит о большем содержании этих соединений в пробе и их повышенной степени кристалличности.

Данные термического анализа согласуются с данными рентгенографического фазового анализа, результаты которого представлены на рис. 4 и в табл. 8.

Из табл. 8 о фазовом составе образцов гидратационного твердения следует, что НФШ обладает слабой гидравлической активностью, что выражается незначительным уменьшением количества β-C<sub>2</sub>S через 28 сут твердения (88,6 %) в сравнении с аналогичным показателем для НФШ (91,8 % (см. табл. 2)),

а также низкими показателями прочности при сжатии и изгибе (см. табл. 6). Количество β-C<sub>2</sub>S для образцов, подверженных начальной принудительной карбонизации и твердевших далее 28 сут (СТ), снижается до значения 71,3 %. Это говорит о вступлении данного минерала в химическую реакцию с CO<sub>2</sub> с осаждением в качестве продукта реакции — карбоната кальция, обладающего вяжущими свойствами и способствующего существенному повышению физико-механических свойств карбонизированного материала. При этом не вступивший в начальную реакцию принудительной карбонизации β-C<sub>2</sub>S при дальнейшей выдержке образцов продолжает более интенсивно гидратироваться, что приводит к росту прочностных показателей. На представленных на рис. 4 рентгенограммах наблюдается уменьшение интенсивности основных линий β-C<sub>2</sub>S и увеличение аналогичных линий для карбоната кальция. Более интенсивный рост отмечается для образцов смешанного твердения. В общем количество CaCO<sub>3</sub> для образцов ГТ и СТ составило 7,4 и 20,8 % соответственно.

Анализ пористости образцов гидратационного и смешанного твердения проводили методом эталонной контактной порометрии. Результаты исследования пористости структуры представлены на рис. 5 и в табл. 9.

Из полученных порограмм следует, что характер структуры материала формируется на стадии прессования образцов-цилиндров и существенно зависит от фракционного состава исходного сырья. Начальная карбонизация, в свою очередь, приводит к снижению общей пористости. Так, общая пористость образцов СТ снижается на 7,5 % после 28 сут твердения в сравнении с образцами ГТ. При этом из анализа кривых видно, что существенные различия пористо-

Табл. 9. Поры в образцах, распределенные в зависимости от их радиусов и способа твердения, %

Table 9. Pores in specimens distributed depending on their radii and hardening method, %

Наименование Name	Радиус пор, мкм Pore radius, μm							Всего Total
	0–0,1	0,1–1,0	1,0–6,0	6,0–7,0	7,0–8,0	8,0–9,0	9,0–15,0	
	Объем пор, % Pore volume, %							
ГТ / НН	13,5	7,0	7,0	2,0	2,0	3,0	3,0	37,5
СТ / МН	12,7	3,3	4,0	4,5	3,0	1,0	1,5	30,0

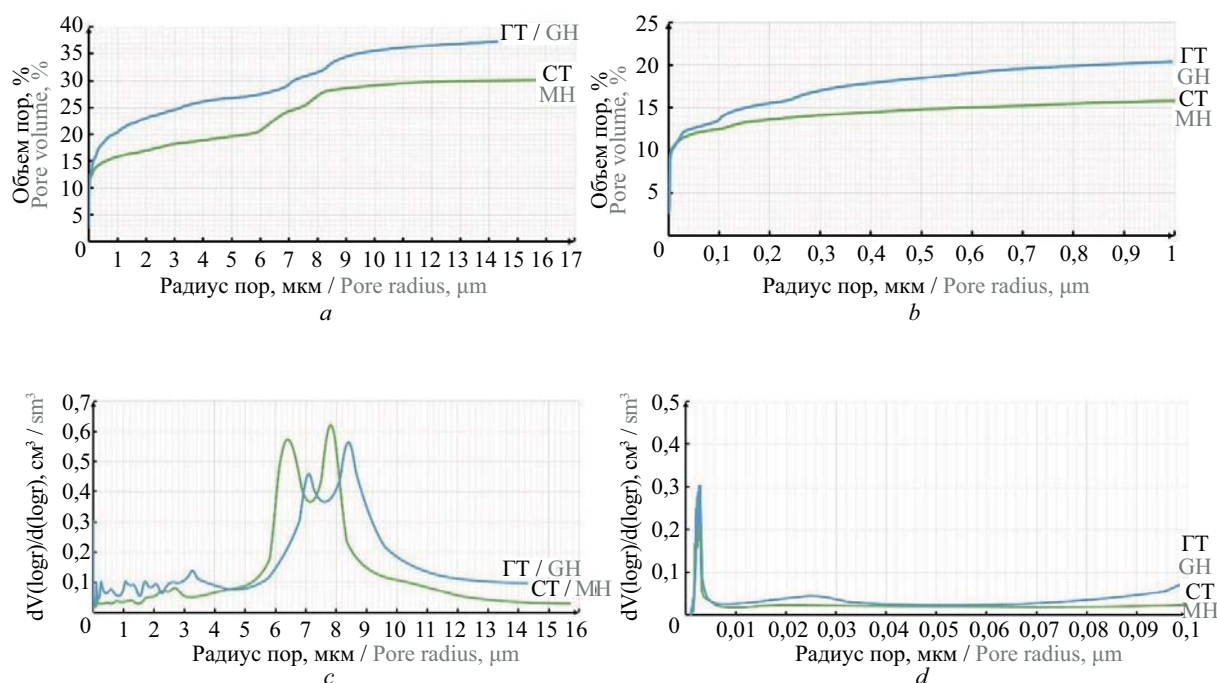


Рис. 5. Графики распределения пор исследуемых образцов (ГТ и СТ): *a, b* — интегральные; *c, d* — дифференциальные  
 Fig. 5. Graphs of the pore distribution of the studied specimens (НН and МН): *a, b* — integral; *c, d* — differential

сти исследуемых образцов начинаются при эффективном радиусе пор более 0,1 мкм. При радиусе пор менее 0,1 мкм кривые практически накладываются друг на друга, а значит реакция карбонизации в этих порах не проходила. Количество пор данного радиуса для двух образцов практически одинаково и составило 12,7–13,5 %. Анализ дифференциальных кривых (см. рис. 5 *c, d*) показывает, что у образцов СТ радиусы пор в диапазоне 6–9 мкм смещаются в сторону меньших значений в сравнении с образцами ГТ. Это объясняется нарастанием на стенках пор продуктов карбонизации и последующей гидратации, вследствие чего уменьшается радиус пор, а также происходит деление крупных пор на более мелкие.

Суммарный объем пор в диапазоне радиусов 0,1–15 мкм составил для образцов СТ и ГТ 14,3 и 24,0 % соответственно. Эти значения достаточно точно согласуются с опытными данными водопоглощения по массе в 28 сут для данных образцов (14,2 и 22,2 %). Возможно, пористость с радиусом пор менее 0,1 мкм является закрытой и доступ воды к этим порам ограничен. Следовательно, образцы, твердевшие по смешанному типу, более предпочтительны и ввиду лучших физико-механических свойств, и с точки зрения количественного связывания CO<sub>2</sub>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обзор литературных источников способов утилизации отходов производств показал, что твердые отходы накапливаются в отвалах промышленных предприятий (например, нефелиновый шлам) и выбрасываются в атмосферу (углекислый газ). Экспе-

риментальные данные, полученные в ходе исследований, позволяют сделать вывод о том, что эти виды сырья обладают большим потенциалом для производства строительных материалов и изделий. В результате оптимизации технологических параметров получения карбонизированного материала на основе НФШ были произведены карбонизированные образцы с прочностью при сжатии в пределах 4–69 МПа, на изгиб 3–9,0 МПа. Водопоглощение по массе составило 14,2–21,5 %, а средняя плотность 1645–1882 кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент размягчения материала варьировался в пределах 0,51–0,99.

Детальный анализ экспериментальных данных дал возможность установить, что начальная принудительная карбонизация опытных образцов способствует появлению в структуре материала CaCO<sub>3</sub>, обладающего вяжущими свойствами, а также интенсифицирует процесс последующей гидратации не вступившего в реакцию карбонизации β-C<sub>2</sub>S с образованием дополнительных гелеобразных продуктов гидратации, способствующих улучшению эксплуатационных свойств конечного материала. Также повышается степень гидратации материала в сравнении с образцами только гидратационного типа твердения. Определено, что, используя НФШ в своем естественном гранулометрическом состоянии, при заданных технологических факторах количество связанного CO<sub>2</sub> на одну тонну исходного шлама составило 80,3 кг. Теоретически этот показатель возможно увеличить при введении в данные исследования дополнительных технологических факторов и способов подготовки исходного нефелинового шлама (например, дополнительный помол НФШ).

Обобщенный анализ полученных результатов позволяет предположить, что из указанного вида сырья предлагаемым методом начальной принудительной карбонизации возможно изготовление определенной номенклатуры строительных изделий карбонатного

типа твердения, которые будут удовлетворять требованиям соответствующих нормативных документов, а использование вторичного сырья (нефелиновый шлак, выбросы CO<sub>2</sub>) будет снижать себестоимость готовых карбонизированных строительных изделий.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Schneider T., Kaul C.M., Pressel K.G.* Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming // *Nature Geoscience*. 2019. Vol. 12. Issue 3. Pp. 163–167. DOI: 10.1038/s41561-019-0310-1. EDN TMSLDZ.
2. *Moumin G., Ryssel M., Zhao L., Markewitz P., Sattler C., Robinius M. et al.* CO<sub>2</sub> emission reduction in the cement industry by using a solar calciner // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. Pp. 1578–1596. DOI: 10.1016/j.renene.2019.07.045. EDN CHILYY.
3. *Lippiatt N., Ling T., Pan S.* Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 28. P. 101062. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101062. EDN UQYBLS.
4. *Huang L., Krigsvoll G., Johansen F., Liu Y., Zhang X.* Carbon emission of global construction sector // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. Pp. 1906–1916. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.001
5. *Proaño L., Sarmiento A.T., Figueredo M., Cobo M.* Techno-economic evaluation of indirect carbonation for CO<sub>2</sub> emissions capture in cement industry: A system dynamics approach // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 263. P. 121457. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121457. EDN SNJISJ.
6. *Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M.* Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. Pp. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
7. *Bhagath Singh G.V.P., Subramaniam K.V.L.* Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 239. P. 118024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118024
8. *Imbabi M.S., Carrigan C., McKenna S.* Trends and developments in green cement and concrete technology // *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2012. Vol. 1. Issue 2. Pp. 194–216. DOI: 10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001
9. *Maddalena R., Roberts J.J., Hamilton A.* Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 186. Pp. 933–942. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.138
10. *Turner L.K., Collins F.G.* Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 43. Pp. 125–130. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023
11. *Li C., Li Y., Zhu W., Zeng G., Ouyang Z., Cheng M. et al.* Carbon dioxide cured building materials as an approach to decarbonizing the calcium carbide related industry // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 186. P. 113688. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113688. EDN ETCTRZ.
12. *Izumi Y., Iizuka A., Ho H.-Ju.* Calculation of greenhouse gas emissions for a carbon recycling system using mineral carbon capture and utilization technology in the cement industry // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 312. P. 127618. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127618. EDN FEWJUD.
13. *Boone M.A., Nielsen P., Kock T.D., Boone M.N., Quaghebeur M., Cnudde V.* Monitoring of stainless-steel slag carbonation using X-ray computed microtomography // *Environmental Science & Technology*. 2014. Vol. 48. Issue 1. Pp. 674–680. DOI: 10.1021/es402767q
14. *Ghouleh Z., Guthrie R.I.L., Shao Y.* High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 99. Pp. 175–183. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028
15. *Humbert P.S., Castro-Gomes J.P., Savastano H.* Clinker-free CO<sub>2</sub> cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 210. Pp. 413–421. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169
16. *Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M.* Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. Pp. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
17. *Humbert P.S., Castro-Gomes J.* CO<sub>2</sub> activated steel slag-based materials : a review // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 208. Pp. 448–457. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.058
18. *Ghouleh Z., Guthrie R.I.L., Shao Y.* Production of carbonate aggregates using steel slag and carbon dioxide for carbon-negative concrete // *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*. 2017. Vol. 18. Pp. 125–138. DOI: 10.1016/j.jcou.2017.01.009
19. *Lee S., Kim J.W., Chae S., Bang J.H., Lee S.W.* CO<sub>2</sub> sequestration technology through mineral carbonation: An extraction and carbonation of blast slag //

Journal of CO<sub>2</sub> Utilization. 2016. Vol. 16. Pp. 336–345. DOI: 10.1016/j.jcou.2016.09.003

20. Renforth P. The negative emission potential of alkaline materials // Nature Communications. 2019. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1038/s41467-019-09475-5. EDN JAWOKQ.

21. Сидняев Н.И., Вилисова Н.Т. Введение в теорию планирования эксперимента : учебное пособие. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 463 с. EDN QNDDDL.

22. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Fic S., Szafraniec M., Bakhtina T. Intensive ways of producing carbonate curing building materials based on lime secondary raw

materials // Materials. 2020. Vol. 13. Issue 10. P. 2304. DOI: 10.3390/ma13102304

23. Lyubomirskiy N.V., Bakhtina T.A., Bakhtin A.S., Fedorkin S.I. The carbonate-hardening lime construction material properties formation during their long-term storage and use under normal conditions // Materials Science Forum. 2019. Vol. 974. Pp. 187–194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.187. EDN YFFRYK.

24. Сизяков В.М., Бричкин В.Н., Куртенков Р.В. Повышение комплексности переработки нефелинового сырья на основе содовой конверсии белитового шлама // Обогащение руд. 2016. № 1. С. 54–59. DOI: 10.17580/or.2016.01.09. EDN VLFZDT.

Поступила в редакцию 10 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 2 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 10 января 2026 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Александр Сергеевич Бахтин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; Институт «Академия строительства и архитектуры» (структурное подразделение) Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (АСиА КФУ им. В.И. Вернадского); 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 846523, Scopus: 57191596769, ResearcherID: N-9489-2016, ORCID: 0000-0001-6255-8948; aleserba@mail.ru;

Николай Владимирович Любомирский — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; Институт «Академия строительства и архитектуры» (структурное подразделение) Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (АСиА КФУ им. В.И. Вернадского); 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 779436, Scopus: 57202812296, ResearcherID: Y-4548-2019, ORCID: 0000-0001-6298-5077; niklub.ua@gmail.com;

Тамара Алексеевна Бахтина — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; Институт «Академия строительства и архитектуры» (структурное подразделение) Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (АСиА КФУ им. В.И. Вернадского); 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 840822, Scopus: 57202813160, ResearcherID: N-8860-2016, ORCID: 0000-0002-5241-0074; t.bakhtina83@gmail.com;

Герман Русланович Биленко — аспирант кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; Институт «Академия строительства и архитектуры» (структурное подразделение) Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (АСиА КФУ им. В.И. Вернадского); 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 1099392; ger-bilenko@yandex.ru;

Иван Анатольевич Тюнюков — аспирант кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; Институт «Академия строительства и архитектуры» (структурное подразделение) Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (АСиА КФУ им. В.И. Вернадского); 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; utyunyukov@mail.ru.

Вклад авторов:

Бахтин А.С. — научное руководство, написание исходного текста, итоговые выводы.

Любомирский Н.В. — научное руководство, концепция исследования.

Бахтина Т.А. — написание и редактирование исходного текста, итоговые выводы.

Биленко Г.Р. — проведение лабораторных испытаний, обработка результатов, оформление текста.

Тюнюков И.А. — проведение лабораторных испытаний, обработка результатов, оформление текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Schneider T., Kaul C.M., Pressel K.G. Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming. *Nature Geoscience*. 2019; 12(3):163-167. DOI: 10.1038/s41561-019-0310-1. EDN TMSLDZ.

2. Moumin G., Ryssel M., Zhao L., Markewitz P., Sattler C., Robinius M. et al. CO<sub>2</sub> emission reduction in the cement industry by using a solar calciner. *Renewable Energy*. 2020; 145:1578-1596. DOI: 10.1016/j.renene.2019.07.045. EDN CHILYY.

3. Lippiatt N., Ling T., Pan S. Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective. *Journal of Building Engineering*. 2020; 28:101062. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101062. EDN UQYBLS.
4. Huang L., Krigsvoll G., Johansen F., Liu Y., Zhang X. Carbon emission of global construction sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018; 81:1906-1916. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.001
5. Proaño L., Sarmiento A.T., Figueredo M., Cobo M. Techno-economic evaluation of indirect carbonation for CO<sub>2</sub> emissions capture in cement industry: A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 263:121457. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121457. EDN SNJISJ.
6. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 114:2-26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
7. Bhagath Singh G.V.P., Subramaniam K.V.L. Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 239:118024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118024
8. Imbabi M.S., Carrigan C., McKenna S. Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2012; 1(2):194-216. DOI: 10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001
9. Maddalena R., Roberts J.J., Hamilton A. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 186:933-942. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.138
10. Turner L.K., Collins F.G. Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*. 2013; 43:125-130. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023
11. Li C., Li Y., Zhu W., Zeng G., Ouyang Z., Cheng M. et al. Carbon dioxide cured building materials as an approach to decarbonizing the calcium carbide related industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023; 186:113688. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113688. EDN ETCTRZ.
12. Izumi Y., Iizuka A., Ho H.-Ju. Calculation of greenhouse gas emissions for a carbon recycling system using mineral carbon capture and utilization technology in the cement industry. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 312:127618. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127618. EDN FEWJUD.
13. Boone M.A., Nielsen P., Kock T.D., Boone M.N., Quaghebeur M., Cnudde V. Monitoring of stainless-steel slag carbonation using X-ray computed microtomography. *Environmental Science & Technology*. 2014; 48(1):674-680. DOI: 10.1021/es402767q
14. Ghoulah Z., Guthrie R.I.L., Shao Y. High-strength KOBM steel slag binder activated by carbonation. *Construction and Building Materials*. 2015; 99:175-183. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.028
15. Humbert P.S., Castro-Gomes J.P., Savastano H. Clinker-free CO<sub>2</sub> cured steel slag based binder: Optimal conditions and potential applications. *Construction and Building Materials*. 2019; 210:413-421. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.169
16. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 114:2-26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
17. Humbert P.S., Castro-Gomes J. CO<sub>2</sub> activated steel slag-based materials : a review. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 208:448-457. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.058
18. Ghoulah Z., Guthrie R.I.L., Shao Y. Production of carbonate aggregates using steel slag and carbon dioxide for carbon-negative concrete. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*. 2017; 18:125-138. DOI: 10.1016/j.jcou.2017.01.009
19. Lee S., Kim J.W., Chae S., Bang J.H., Lee S.W. CO<sub>2</sub> sequestration technology through mineral carbonation: An extraction and carbonation of blast slag. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*. 2016; 16:336-345. DOI: 10.1016/j.jcou.2016.09.003
20. Renforth P. The negative emission potential of alkaline materials. *Nature Communications*. 2019; 10(1). DOI: 10.1038/s41467-019-09475-5. EDN JAWOKQ.
21. Sidnyaev N.I., Vilisova N.T. *Introduction to the theory of experiment planning: textbook*. Moscow, Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2011; 463. EDN QNDDDL. (rus.).
22. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Fic S., Szafraniec M., Bakhtina T. Intensive ways of producing carbonate curing building materials based on lime secondary raw materials. *Materials*. 2020; 13(10):2304. DOI: 10.3390/ma13102304
23. Lyubomirskiy N.V., Bakhtina T.A., Bakhtin A.S., Fedorkin S.I. The carbonate-hardening lime construction material properties formation during their long-term storage and use under normal conditions. *Materials Science Forum*. 2019; 974:187-194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.187. EDN YFFRYK.
24. Sizyakov V.M., Brichkin V.N., Kurtenkov R.V. Increasing all-round utilization of nepheline raw materials through belite sludge soda conversion. *Obogashchenie Rud*. 2016; 1:54-59. DOI: 10.17580/or.2016.01.09. EDN VLFZDT. (rus.).

Received October 10, 2025.

Adopted in revised form on December 2, 2025.

Approved for publication on January 10, 2026.

**BI ONOTES:** **Aleksandr S. Bakhtin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Institute “Academy of Construction and Architecture” (a structural division) of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; ID RSCI: 846523, Scopus: 57191596769, ResearcherID: N-9489-2016, ORCID: 0000-0001-6255-8948; aleserba@mail.ru;

**Nikolay V. Lyubomirskiy** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Institute “Academy of Construction and Architecture” (a structural division) of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; ID RSCI: 779436, Scopus: 57202812296, ResearcherID: Y-4548-2019, ORCID: 0000-0001-6298-5077; niklub.ua@gmail.com;

**Tamara A. Bakhtina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Institute “Academy of Construction and Architecture” (a structural division) of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; ID RSCI: 840822, Scopus: 57202813160, ResearcherID: N-8860-2016, ORCID: 0000-0002-5241-0074; t.bakhtina83@gmail.com;

**German R. Bilenko** — postgraduate student of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Institute “Academy of Construction and Architecture” (a structural division) of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; ID RSCI: 1099392; ger-bilenko@yandex.ru;

**Ivan A. Tyunyukov** — postgraduate student of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Institute “Academy of Construction and Architecture” (a structural division) of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; utyunyukov@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Aleksandr S. Bakhtin — scientific supervision, writing the original text, final conclusions.*

*Nikolay V. Lyubomirskiy — scientific leadership, research concept.*

*Tamara A. Bakhtina — writing and editing of the original text, final conclusions.*

*German R. Bilenko — conducting laboratory tests, processing results, formatting text.*

*Ivan A. Tyunyukov — conducting laboratory tests, processing results, formatting text.*

*The authors declare that they have no conflict of interest.*