

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-8-19

^{1,2}Глазков Р.А., ^{1,*}Кожухова Н.И., ¹Боцман Л.Н., ¹Жерновская И.В.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*e-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛАКОЩЕЛОЧНОГО ВЯЖУЩЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНОГО АКТИВАТОРА С ГИПСОСОДЕРЖАЩИМ ОТХОДОМ

Аннотация. В последние десятилетия все больше внимания среди ученых и представителей производственной сферы привлекают материалы щелочной активации и, в частности, шлакоцементы или шлакощелочные вяжущие, эксплуатационные характеристики которых в значительной степени зависят от типа щелочного активатора. Наиболее эффективными в данном случае принято считать гидроксиды или соли щелочных и щелочноземельных металлов, которые не являются природными ресурсами и могут быть синтезированы только с использованием энергоемких технологий, что делает их неэкологичными за счет высокого потребления энергоресурсов, а также дополнительным источником загрязнения окружающей среды, за счет выбросов диоксида углерода в процессе их синтеза. В рамках проведенной исследовательской работы было изучено влияние различных комбинаций Ca^{2+} и Na^+ ($\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ отношение) компонентов ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3), в том числе, гипсосодержащих отходов в виде цитрогипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в составе комплексного щелочного активатора на прочностные характеристики шлакощелочного вяжущего. Выявлено, что при неизменном содержании $\text{Ca}(\text{OH})_2$, увеличение длительности твердения способствует смещению оптимальных концентраций Na^+ и Ca^{2+} содержащих компонентов в матрице шлакощелочного вяжущего в сторону больших значений. При неизменной концентрации цитрогипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в вяжущей системе, оптимальная дозировка Ca^{2+} содержащего компонента ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) не изменяется, а содержание Na^+ содержащего компонента (Na_2CO_3) смещается в сторону меньших значений при увеличении продолжительности твердения вяжущего. Установлено, что увеличение $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ отношения за счет повышения концентрации Na^+ катионов (Na_2CO_3) при неизменном содержании Ca^{2+} катионов ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) способствует снижению показателей прочности на сжатие вяжущего. В то же время, снижение $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ отношения за счет повышения концентрации Ca^{2+} катионов ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) также приводит к снижению прочностных характеристик.

Ключевые слова: доменный гранулированный шлак, шлакощелочное вяжущее, гипсосодержащий отход, комплексный щелочной активатор, прочностные характеристики

Введение. Учеными-материаловедами по всему миру признано, что материалы щелочной активации и, в частности, шлакощелочные цементы, являются потенциальной альтернативой обычному портландцементу [1]. Частичная или полная замена цемента на шлакощелочное вяжущее является одним из потенциальных эффективных способов сокращения выбросов CO_2 примерно на 40–80% по сравнению со 100 % использованием портландцемента в качестве вяжущего компонента. Эта тенденция согласуется с реализацией актуальной в глобальном масштабе на сегодняшний день концепцией устойчивого развития.

Шлакощелочные вяжущие, как правило, производят из алюмосиликатного сырья, которое может быть получено из твердых промышленных отходов, таких как доменный гранулированный шлак, зола / зола-уноса, хвосты обогащения полезных ископаемых [2], стеклянные отходы, керамические отходы, угольный шлак [3], зола

рисовой шелухи [4], зола пальмового масла [5] и т. д.

В зависимости от химического состава твердофазной алюмосиликатной матрицы шлакощелочные вяжущие, как разновидность щелочеактивированных систем, как правило, классифицируются по содержанию в их составе оксидов щелочноземельных металлов (CaO , MgO) на две основные группы:

1. Высококальциевое и среднекальциевое щелочно-активированное вяжущее, в основном получаемое из активированного щелочью доменного шлака. В первой системе преобладают продукты в виде С-А-S-H фаз со структурой, подобной тобермориту (в основном, со степенью связности Q^2 и в меньшей степени – Q^1 и Q^3) [6].

2. Низкокальциевое или безкальциевое вяжущее, как правило, получаемое из алюмосиликатного сырья кислого состава, например, на основе кислых зол и шлаков.

Основным продуктом их структурообразования являются, аморфная субстанция и N-A-S и N-A-S-H фазы с цеолитоподобной структурой (в основном, подобной тобермориту (преимущественно, со степенью связности Q^4 , и в меньшей степени – Q^3) [7].

Щелочной активатор выполняет ключевую роль в системе шлакоцемента, инициируя процессы растворения твердофазной компоненты и последующего структурообразования, результатом которого является твердение и формирование камнеподобного композита.

Доменный гранулированный шлак, обладает более высокой реакционной способностью, по сравнению с золой-уноса, поскольку для ее активации требуются реакционные среды с более высоким pH и температурой [8]. Это указывает на то, что для щелочеактивированных систем на основе металлургического шлака пригоден более широкий спектр активаторов по сравнению с низко- и безкальциевыми алюмосиликатными прекурсорами.

В исследовании, проведенном Q. Wang и др. [9], отмечено, что тип активатора, обеспечивающий щелочную среду, зачастую, не влияет на эффективность протекания процессов структурообразования. При этом, определяющим фактором в данном случае является обеспечение требуемого pH реакционной среды.

Однако, данное утверждение не в полной мере соответствует здравому смыслу, поскольку тип щелочного активатора оказывает влияние на компонентный состав и, как следствие, на стехиометрию шлакощелочной вяжущей системы, в целом.

Щелочная активация также может стать основным способом «обезвреживания» рассматриваемых отходов, образующихся в результате металлургических процессов, которые содержат тяжёлые металлы [10, 11].

Как правило, в качестве химических активаторов используются Na_2SiO_3 [12], Na_2CO_3 , Na_2SO_4 [13], $NaOH$, $Ca(OH)_2$, $Ba(OH)_2$ [14–16], а также CaO и MgO [17–19].

Так, в исследовании [12] гранулированный доменный шлак был активирован с помощью сульфата натрия и карбоната натрия при комнатной температуре. Шлак, активированный Na_2CO_3 , имеет более высокую прочность, чем шлак, активированный Na_2SO_4 . Вероятно, причина кроется в разнице состава анионных ионов в активаторах.

В исследовании [13] авторы утверждают, что введение Na_2SO_4 интенсифицирует выделение теплоты гидратации и способствует повышению прочности на сжатие образцов в любом возрасте отверждения, но при этом наблюдается

формирование большего объема фазы эттрингита.

Согласно результатам исследований [14], по сравнению с сульфатом натрия, гидроксидом натрия и карбонатом натрия в качестве активаторов, силикат натрия (жидкое стекло) может активировать доменный гранулированный шлак с большей эффективностью, с точки зрения формирования структуры и эксплуатационных свойств шлакощелочного материала.

В работе [15] использовался $Ba(OH)_2$ в качестве активатора шлака. В исследовании было выявлено, что при использовании однокомпонентного щелочного активатора, содержащего только $Ba(OH)_2$, показатели компрессионной прочности консолидированной вяжущей системы достигают 25 МПа. Однако, применение комплексного активатора ($Ba(OH)_2 + Ca(OH)_2$) при прочих равных условиях позволяет увеличить прочность системы до 35 МПа.

В работе [16] представлены результаты, подтверждающие возможность активации шлака гидроксидом кальция с обеспечением прочностных показателей вяжущего до 22 МПа. Однако, применение $Ca(OH)_2$ совместно с другими щелочными компонентами, такими как Na_2SiO_3 или Na_2CO_3 , позволяют сформировать более прочную структуру (26–28 МПа).

В работе [17] рассмотрено совместное использование CaO и Na_2CO_3 в качестве активаторов в системах щелочно-активированного шлака.

В работах [18, 19] предложено активировать доменный гранулированный шлак с помощью MgO . Экспериментальные исследования показали, что прочность на сжатие и количество продуктов гидратации увеличиваются с ростом реакционной способности и содержания MgO . Этот активатор обеспечивает хорошие технологические характеристики синтезируемым таким образом шлакощелочным вяжущим по сравнению с $NaOH$ и $Na_2O \cdot nSiO_2$. Однако, для MgO -активированных систем характерна более низкая прочность на ранних стадиях твердения, что является проблемой, которую нельзя игнорировать.

В работе [20] использовался CaO в качестве активатора. Авторами производилось сравнение механических характеристик доменного гранулированного шлака, активированного CaO и $Ca(OH)_2$, где вяжущее на основе CaO продемонстрировало высокую механическую прочность образцов в 3-суточном возрасте – до 18 МПа и в 28-суточном возрасте – до 42 МПа.

Обзор вышеприведенных литературных источников позволил выявить возможность активации доменных гранулированных шлаков как однокомпонентными, так и многокомпонентными

(комплексными) активаторами, преимущественно, содержащими в своем составе Ca^{2+} и Na^{+} катионы.

Таким образом, на практике, при производстве шлакощелочных вяжущих и композитов используются синтетические химические реагенты, получение которых само по себе требует больших энергозатрат и приводит к выбросу в атмосферу большого количества CO_2 , даже несмотря на то, что их дозировка обычно составляет не более 10 % от общей массы вяжущего вещества. В этом случае, актуально искать альтернативу этого рода активаторам, которые также способны выполнять функцию активирующего агента среди более дешевых и доступных аналогов, а именно, среди техногенных продуктов.

В числе подходящих техногенных продуктов следует отметить разновидности Ca^{2+} содержащих компонентов в виде гипсосодержащих отходов, в том числе, гипс, очищенный от серных компонентов, фосфогипс [21], фторогипс [22], цитрогипс [23] и т. д. Масштабные выбросы этих побочных промышленных продуктов в окружающую среду оказывают ужасающее негативное воздействие из-за ограниченности эффективных методов утилизации [24, 25].

В исследовании [26] было рассмотрено влияние совместного использования Na_2CO_3 и гипсосодержащего отхода, образующегося при производстве ангидрита в шлакощелочном вяжущем на основе доменного гранулированного шлака. Результаты исследования продемонстрировали, что введение гипсосодержащего отхода в систему «шлак – Na_2CO_3 » позволяет более чем в 2 раза повысить прочностные показатели твердеющей вяжущей системы по сравнению с безгипсовым аналогом.

В исследовании [27] изучена возможность применения в качестве источника Ca^{2+} катионов такого гипсосодержащего компонента, как фосфогипс для получения шлакощелочных вяжущих.

В исследованиях [28–30] проведены обзорные и аналитические изыскания, ориентированные на использование цитрогипса как с позиции самостоятельного вяжущего [28, 29], так и в качестве вспомогательного или модифицирующего [30] компонента.

Важно отметить, что гипсосодержащие материалы природного либо техногенного происхождения в процессе растворения, образуют SO_4^{2-} анионы, которые являются активными элементами во время реакций со щелочью. Так, сульфат (SO_4^{2-}) в щелочной среде в присутствии Ca^{2+} вступает в реакцию с алюмосиликатным гелем растворенного шлака, образуя фазу эттрин-

гита, которая, в свою очередь, способствует повышению механической прочности, уплотнению матрицы и компенсации усадочных деформаций, а также может вызывать ускорение сроков схватывания в шлакощелочных системах.

В рамках данной работы было изучена взаимосвязь различных комбинаций активирующих Ca^{2+} и Na^{+} ($\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ отношение) компонентов, в том числе, гипсосодержащих отходов, на прочностные характеристики шлакощелочного вяжущего.

Материалы и методы. В качестве основного алюмосиликатного компонента в контексте исследования был использован доменный гранулированный шлак Новолипецкого металлургического комбината «ПАО НЛМК» (г. Липецк, РФ).

В качестве модифицирующих и активирующих агентов – источников катионов щелочных (Na^{+}) и щелочноземельных (Ca^{2+}) металлов использовались следующие компоненты:

– Цитрогипс – гипсосодержащий отход биохимического производства лимонной кислоты предприятия АО БЗЛК «ЦитроБел» (г. Белгород, РФ);

– Натрий углекислый Na_2CO_3 ;

– Гидроксид натрия $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Содержание основных оксидов в составе используемого доменного гранулированного шлака и цитрогипса отражены в таблицах 1 и 2, соответственно.

Некоторые качественные характеристики: модуль основности (M_o), модуль активности (M_a) и коэффициент качества (K_k , согласно классификации П.П. Будникова), рассчитаны по формулам (1), (2) и (3), соответственно.

$$M_o = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \quad (1)$$

$$M_a = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \quad (2)$$

$$K_k = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}} \quad (3)$$

Анализ химического состава (табл. 1) используемого доменного гранулированного шлака позволил расчетным путем (уравнения (1)–(3)), выявить количественные характеристики степени его потенциальной пригодности с точки зрения гидратационной активности и классифицировать следующим образом: по модулю основности M_o (1,04) – средней активности; по

модулю активности M_a (0,2) – средней активности; по коэффициенту качества K_k (1,45) – низкой активности.

Таблица 1

Химический анализ исследуемого доменного гранулированного шлака

Ок-сид	Содержание оксидов, %(вес.)															M_o	M_a	K_k
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O	MnO	SrO	Cl	P ₂ O ₅	ZrO ₂	CeO ₂	Σ		
Значение	43,2	39,4	7,86	6,17	1,42	0,55	0,4	0,36	0,34	0,14	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	99,94	1,04	0,20
																		1,45

Таблица 2

Химический состав цитрогипса АО БЗЛК «Цитробел»

Содержание оксидов, % (вес.)				
CaO	SO ₃	SiO ₂	MgO	п.п.п.
29,7–31,5	44,0–45,5	0,3–1,2	0,1–0,4	остальное

Прочностные характеристики образцов шлакощелочного вяжущего определялись в соответствии со стандартом ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Основная часть. В соответствии с проведенным литературным обзором, который позволил выявить наиболее предпочтительные (с

точки зрения активирующей способности по отношению к металлургическим шлакам) щелочные компоненты в их индивидуальном или комбинированном использовании в шлакощелочном вяжущем, в рамках данной работы были проведены точечные исследования в этом контексте (табл. 3).

Таблица 3

Прочностные характеристики шлакощелочного вяжущего в зависимости от состава

№ состава	Компонентный состав				Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток, МПа
	Доменный гранулированный шлак	Цитрогипс CaSO ₄ ·2H ₂ O	Карбонат натрия Na ₂ CO ₃	Гидроксид кальция Ca(OH) ₂	
1	+	–	–	–	7,90
2	+	+	–	–	10,37
3	+	–	+	–	63,20
4	+	+	+	–	28,73
5	+	–	–	+	11,90
6	+	+	–	+	13,40
7	+	+	+	+	59,02

Согласно полученным экспериментальным данным (табл. 3), наиболее высокими показателями по прочности на сжатие характеризуется состав № 3 шлакощелочного вяжущего, где в качестве активирующего агента используется карбонат натрия Na₂CO₃ (63,2 МПа). Однако, известно, что для подобного рода составов характерны весьма продолжительные сроки схватывания при твердении в естественно влажных условиях.

В то же время, комбинация активирующих компонентов в составе № 7 демонстрирует второе значение по прочности (59,02 МПа, что на 6,6 % ниже, чем у состава № 3). Но, при этом вяжущая система демонстрирует значительно более короткие сроки схватывания, что является более

благоприятным, с точки зрения технологического процесса получения материалов и изделий на основе шлакощелочных вяжущих.

В этой связи следующий этап исследования посвящён изучению прочностных характеристик вяжущей системы «Доменный гранулированный шлак – Na₂CO₃ – Ca(OH)₂ – CaSO₄·2H₂O» при разных комбинациях соотношений в системе «Na₂CO₃ : Ca(OH)₂ : CaSO₄·2H₂O».

С этой целью для проведения экспериментальных изысканий были составлены две матрицы планирования, отраженные в таблицах 4 и 5.

На основании разработанных матриц планирования были построены графические зависимости

сти с использованием программы статистической обработки SigmaPlot, представленные в виде трехмерных поверхностей отклика при $\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{const}$ и $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{const}$ на рисунках 1 и 2, соответственно.

Согласно полученным номограммам рисунка 1, при неизменном содержании $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в вяжущей системе, наиболее оптимальное комбинирование входных параметров: концентрации

Na_2CO_3 и $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в составе щелочного активатора, обеспечивающих наиболее высокие показатели прочности на сжатие, следующее:

– в возрасте 7 суток: Na_2CO_3 – 5–6,5 %; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 8–10 % (рис. 1, а);

– в возрасте 28 суток: Na_2CO_3 – 6,5–8 %; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 10–12 % (рис. 1, б).

Таким образом, при увеличении длительности твердения, оптимальные концентрации Na^+ и Ca^{2+} компонентов в вяжущей матрице смещаются в сторону больших значений.

Таблица 4

**Матрица планирования эксперимента
для щелочеактивированных вяжущих при $\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{const}$**

Факторы варьирования эксперимента		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	–1	0	1	
Концентрация Na_2CO_3 , %	X_1	3,4	6,8	10,2	3,4
Концентрация $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, %	X_2	5	10	15	5

Таблица 5

**Матрица планирования эксперимента
для щелочеактивированных вяжущих при $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{const}$**

Факторы варьирования эксперимента		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	–1	0	1	
Концентрация Na_2CO_3 , %	X_1	3,4	6,8	10,2	3,4
Концентрация $\text{Ca}(\text{OH})_2$, %	X_2	5	10	15	5

Следует отметить, что увеличение содержания цитрогипса выше оптимального вызывает ухудшение прочностных показателей. Это может быть обосновано тем, что цитрогипс представляет собой растворимую соль. Поэтому ионы, образующиеся при ее растворении, не полностью расходуются в щелочно-активированном вяжущем материале и заполняют поры матрицы в виде свободных ионов, которые способны образовывать нежелательные метастабильные соединения, что негативно сказывается на компрессионной прочности конечного продукта.

Анализ уравнений регрессии, описывающих поверхности отклика (рис. 1), позволил выявить отрицательное влияние увеличения концентрации Na_2CO_3 (в рассматриваемом диапазоне: 3,4–10,2 %) на прочностные характеристики вяжущего после 7 и 28 суток твердения.

В тоже время, увеличение содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в системе «Доменный гранулированный шлак – Na_2CO_3 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ » на 7-е сутки отрицательно влияет на показатели компрессионной прочности, а на 28-е сутки начинает оказывать положительный эффект.

При этом, судя по коэффициентам перед параметром « $X_1 X_2$ », в двух уравнениях совместное действие обоих входных факторов значительно выше, чем их эффект по отдельности, и носит положительный характер. Это позволяет сделать

предположение о проявлении ими синергетического эффекта.

Рассчитанные на основании уравнений коэффициенты достоверности аппроксимации демонстрируют значения $R^2 \geq 0,84$ и 0,76, свидетельствующие об адекватности полученных уравнений регрессии.

Анализ номограмм (рис. 2), отражающих влияние варьирования компонентов Na_2CO_3 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в вяжущей системе «Доменный гранулированный шлак – Na_2CO_3 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ » при неизменном содержании цитрогипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) позволил выявить отчетливо выраженную разницу в поведении поверхностей отклика в 7-ми и 28-ми суточном возрасте. Если на более ранних сроках твердения (7 суток, рис. 2, а) зависимость прочностных характеристик шлакощелочного вяжущего от разных комбинаций щелочных составляющих в активаторе носит параболический характер, то на более поздних сроках твердения (28 суток, рис. 2, б) поверхность отклика приобретает преимущественно гиперболическую конфигурацию.

Кроме того, сравнение обеих графических зависимостей, представленных на рисунке 2, позволяет выявить тенденцию смещения оптимального содержания Na_2CO_3 в сторону меньших значений при увеличении продолжительности твердения вяжущего: от 5,5–6 % (7 суток) до 3,4 % (28

суток). При этом, концентрация Na_2CO_3 в 28-ми суточном возрасте не обеспечивает пиковое, а лишь максимальное значение предела прочности при сжатии в рассматриваемом диапазоне концентраций Na_2CO_3 . Поэтому, предположительно, оптимальная концентрация этого компонента в

вяжущем может иметь более низкое значение. В тоже время оптимальная дозировка $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в составе системы «Доменный гранулированный шлак – Na_2CO_3 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ » остается неизменной на разных сроках ее твердения и варьируется в пределах 9–10 %.

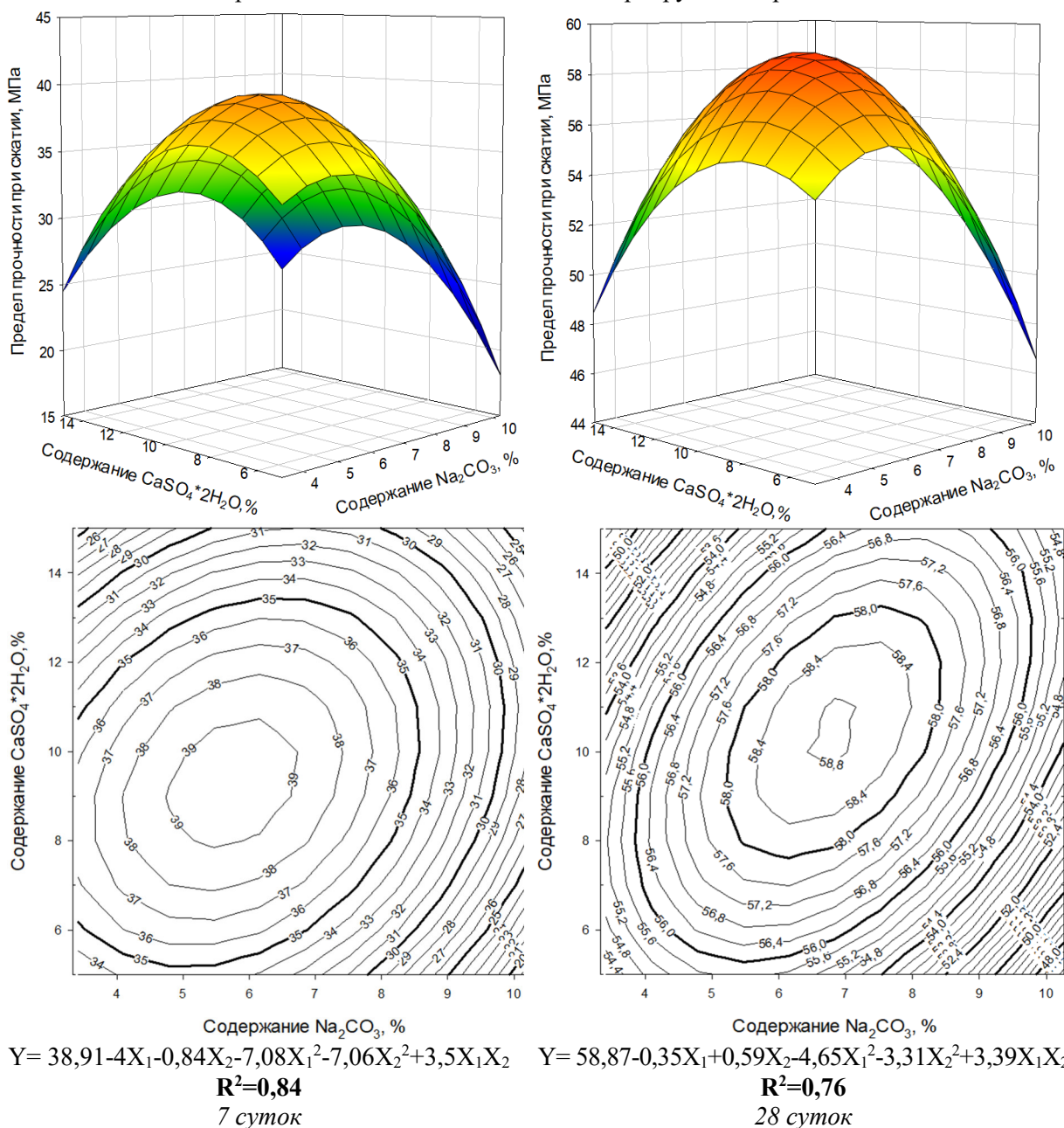


Рис. 1. Влияние концентрации Na_2CO_3 и $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в составе комплексного щелочного активатора на предел прочности при сжатии шлакощелочного вяжущего (при $\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{const}$)

Согласно полученным уравнениям регрессии для рассматриваемой пары номограмм (рис. 2, а, б), концентрация Na_2CO_3 является более значимым параметром по сравнению с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, оказывая по отдельности негативное влияние на прочностные характеристики вяжущего. Однако, их совместный эффект приобретает положительный характер со средней степенью значимости.

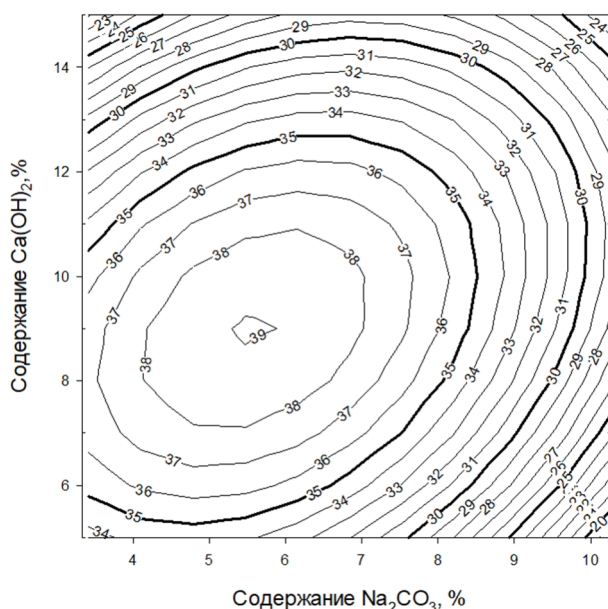
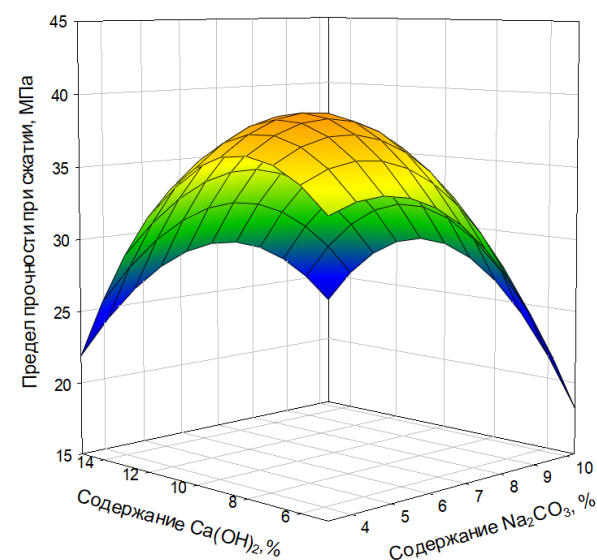
Как и в случае с графическим зависимостями рисунка 1, уравнения регрессии рисунка 2,

описывающие поверхности отклика, демонстрируют коэффициенты достоверности аппроксимации $R^2 \geq 0,81$ и $0,82$, что также подтверждает их адекватность.

Как уже было отмечено в части Введение статьи, для активации металлургических шлаков используется широкий спектр щелочных компонентов, содержащих в своем составе катионы щелочных и щелочноземельных металлов. При этом, в зависимости от характеристик и гидравлической активности шлака, они способны по-

разному влиять на процессы структурообразова-

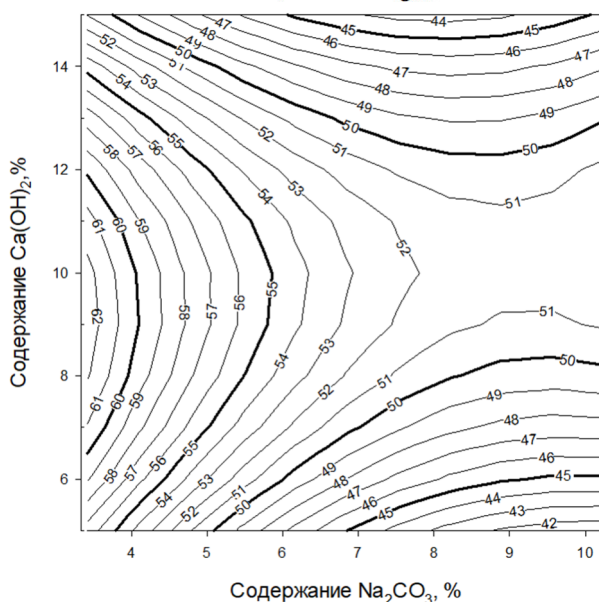
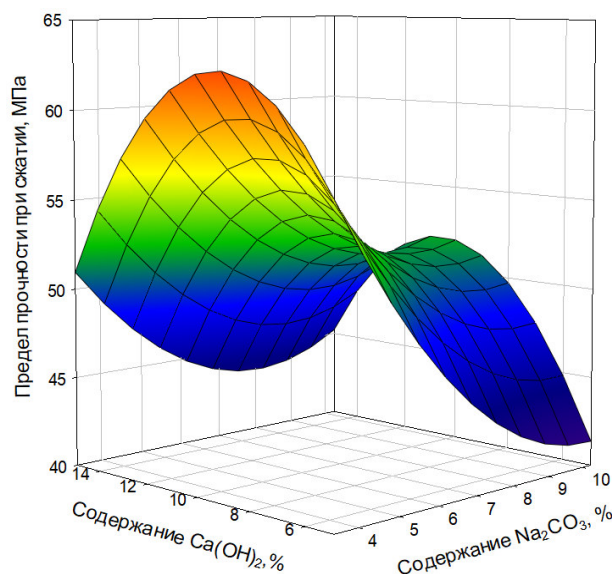
ния и, как следствие, на прочностные и иные характеристики шлакощелочного вяжущего.



$$Y = 38,28 - 3,57X_1 - 1,73X_2 - 6,12X_1^2 - 7,94X_2^2 + 4,15X_1X_2$$

$$R^2 = 0,82$$

7 суток



$$Y = 53,12 - 5,23X_1 - 0,45X_2 + 3,97X_1^2 - 8,56X_2^2 + 2,38X_1X_2$$

$$R^2 = 0,81$$

28 суток

Рис. 2. Влияние концентрации Na_2CO_3 и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в составе комплексного щелочного активатора на предел прочности при сжатии шлакощелочного вяжущего (при $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{const}$)

В этой связи, следующим этапом исследования было установление влияния $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ отношения в составе комплексного активатора на показатели компрессионной прочности вяжущей системы «Доменный гранулированный шлак – Na_2CO_3 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ » в возрасте 28 суток (рис. 3).

Графическая интерпретация полученных экспериментальных результатов (рис. 3) позволяет отследить следующие закономерности:

– увеличение $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ отношения за счет повышения концентрации Na^+ (Na_2CO_3) при Ca^{2+} ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) = const, показатели прочности на сжатие снижаются относительно

плавно (от 5 до 17 %) в интервале концентраций Na_2CO_3 от 3,4 до 6,8 %. Более заметное снижение прочности (от 40 до 61 %) наблюдается при повышении содержания Na_2CO_3 от 6,8 до 10,2 %;

– снижение $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ за счет повышения концентрации Ca^{2+} ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в рассматриваемом диапазоне концентраций Na_2CO_3 , в целом, способствует снижению прочностных показателей на 22–27 %.

Выявленные на рисунке 3 закономерности позволяют отметить пагубное влияние избыточного содержания щелочного активатора в шлакощелочном вяжущей системе на ее показатели компрессионной прочности.

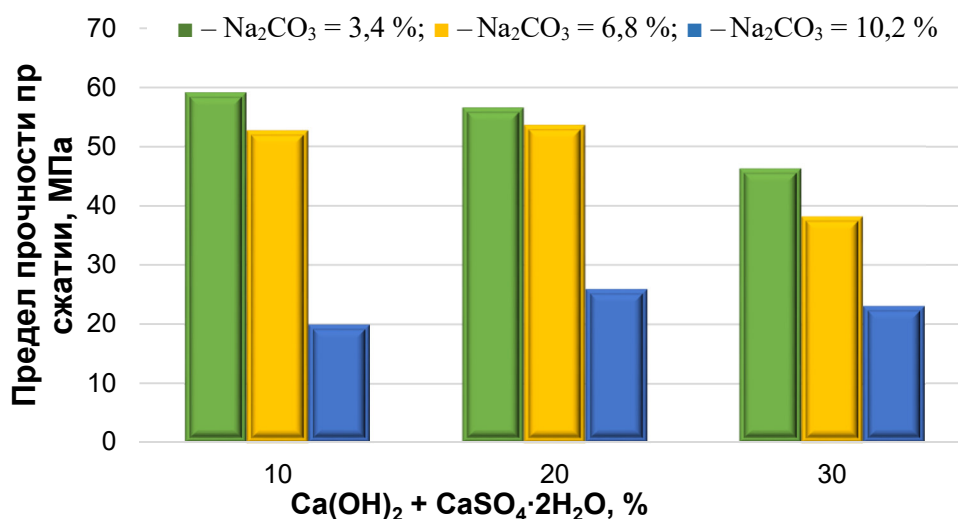


Рис. 3. Влияние $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ отношения в комплексном щелочном активаторе на предел прочности при сжатии шлакощелочного вяжущего

Выводы. В рамках проведенной исследовательской работы было изучено влияние различных комбинаций Ca^{2+} и Na^+ ($\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ отношение) щелочных компонентов ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3), в том числе, гипсосодержащих отходов ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в составе комплексного щелочного активатора на прочностные характеристики шлакощелочного вяжущего. Выявлено, что при неизменном содержании $\text{Ca}(\text{OH})_2$ увеличение длительности твердения способствует смещению оптимальных концентраций Na^+ и Ca^{2+} компонентов в вяжущей матрице в сторону больших значений. При неизменной концентрации цитрогипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в вяжущей системе оптимальная дозировка Ca^{2+} компонента ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) не изменяется, а содержание Na^+ компонента (Na_2CO_3) смещается в сторону меньших значений при увеличении продолжительности твердения вяжущего. Установлено, что увеличение $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ отношения за счет повышения концентрации Na^+ (Na_2CO_3) при постоянной концентрации Ca^{2+} ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{const}$) способствует снижению показателей прочности на сжатие. В то же время, уменьшение $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ отношения за счет повышения концентрации Ca^{2+} ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) также приводит к снижению прочностных показателей. Таким образом, концентрация и источник Na^+ и Ca^{2+} катионов в составе щелочного активатора для шлакощелочного вяжущего оказывает значительное влияние на формирование его прочностных характеристик и требует более глубокого изучения.

Источник финансирования. Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания на создание в 2021 году новых лабораторий, в том числе, под руководством молодых перспективных исследователей национального проекта «Наука и университеты», по науч-

ной теме: «Разработка и развитие научно-технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий и поиск новых способов применения продуктов переработки» (FZWG-2024-0001), с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Provis J.L. Alkali-activated materials // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 114. Pp. 40–48.
2. Ye J., Zhang W., Shi D. Performance evolutions of tailing-slag-based geopolymer under severe conditions // Journal of Sustainable Cement-Based Materials. 2015. Vol. 4. №. 2. Pp. 101–115.
3. Siddique R. Design and development of self-compacting concrete made with coal bottom ash // Journal of Sustainable Cement-Based Materials. 2015. Vol. 4. №. 3–4. Pp. 225–237.
4. Das S.K., Mishra J., Mustakim S.M., Adesina A., Kaze C.R., Das D. Sustainable utilization of ultrafine rice husk ash in alkali activated concrete: characterization and performance evaluation // Journal of Sustainable Cement-Based Materials. 2021. Pp. 1–19.
5. Provis J.L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? // Materials and Structures. 2014. Vol. 47. №. 1–2. Pp. 11–25.
6. Richardson I.G., Brough A.R., Groves G.W., Dobson C.M. The characterization of hardened alkali activated blast-furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H) phase // Cement and Concrete Research. 1994. Vol. 24. №. 5. Pp. 813–829.
7. Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., Separovic F., Van Deventer J.S.J. ²⁹Si NMR study of structural ordering in aluminosilicate geopolymer

gels // *Langmuir*. 2005. Vol. 21. №. 7. Pp. 3028–3036.

8. Kozhukhova N., Strokova V., Zhernovsky I., Sobolev K. Geopolymerization and Structure Formation in Alkali Activated Aluminosilicates with Different Crystallinity Degree // 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). ICAM 2019. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019. Pp. 331–334. DOI: 10.1007/978-3-030-22974-0_80.

9. Wang Q., Yang J., Yan P. Influence of initial alkalinity on the hydration of steel slag // *Science China Technological Sciences*. 2012. Vol. 55. №. 12. Pp. 3378–3387.

10. Deja J. Immobilization of Cr^{6+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} and Pb^{2+} in alkali-activated slag binders // *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32(12). Pp. 1971–1979.

11. Pereira C.F., Luna Y., Querol X., Antenucci D., Vale J. Waste stabilization/solidification of an electric arc furnace dust using fly ash-based geopolymers // *Fuel*. 2009. Vol. 88(7). Pp. 1185–1193.

12. Zhao Y.L., Qiu J.P., Xing J., Sun X.G. Chemical activation of binary slag cement with low carbon footprint // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 267. № 121455. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121455.

13. Tan H.B., Deng X.F., He X.Y., Zhang J.J., Zhang X., Su Y., Yang J. Compressive strength and hydration process of wet-grinded granulated blast-furnace slag activated by sodium sulfate and sodium carbonate // *Cement Concrete Composites*. 2019. Vol. 97. Pp. 387–398. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.01.012.

14. Majhi R.K., Nayak A.N. Production of sustainable concrete utilizing high-volume blast furnace slag and recycled aggregate with lime activator // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 255. № 120188. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120188.

15. Yang K.-H., Sim J.-I., Nam S.-H. Enhancement of reactivity of calcium hydroxide-activated slag mortars by the addition of barium hydroxide // *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. Pp. 241–251.

16. Nunes V.A., Borges P.H.R. Recent advances in the reuse of steel slags and future perspectives as binder and aggregate for alkali-activated materials // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 281. № 122605.

17. Wu S., Liang Y., Zhang Sh., Sun H., Ji T., Li J. Damage mechanics of $\text{CaO-Na}_2\text{CO}_3$ -Slag cement mortar under freeze-thaw in water and sulfate solution // *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 111. № 113621. DOI: 10.1016/j.job.2025.113621.

18. Jin F., Gu K., Al-Tabbaa A. Strength and hydration properties of reactive MgO -activated ground

granulated blast furnace slag paste // *Cement Concrete Composites*. 2015. Vol. 57(2). Pp. 8–16. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.10.007.

19. Ni W., Wang E., Li J., Sun H. Cementing properties of steel slag activated by sodium silicates and sodium hydroxide // *Journal of University of Science and Technology Beijing Mineral Metallurgy Material*, 2005. Vol. 12. Pp. 464–468.

20. Kim M.S., Jun Y., Lee C., Oh J.E. Use of CaO as an activator for producing a price-competitive non-cement structural binder using ground granulated blast furnace slag // *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 54. Pp. 208–214.

21. Alfimova N., Levickaya K., Nikulin I., Elistratkin M., Kozhukhova N., Anosov N. Effect of Phosphogypsum Origin and Calcination Temperature on Characteristics of Supersulfated Cements // *Journal of Composites Science*. 2025. Vol. 9. №. 4. P. 146. DOI: 10.3390/jcs9040146.

22. Huang X., Jiang M., Zhao X., Tang C. Mechanical properties and hydration mechanisms of high-strength fluorogypsum-blast furnace slag-based hydraulic cementitious binder // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 127. Pp. 137–143. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.152.

23. Кожухова Н. И., Глазков Р. А., Коломыцева А. И., Никулин И. С., Череватова А. В. Влияние цитрогипса на усадочные деформации в шлакощелочных вяжущих системах // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 47–51. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-818-10-47-51.

24. Pantini S., Giurato M., Rigamonti L. A LCA study to investigate resource-efficient strategies for managing post-consumer gypsum waste in Lombardy region (Italy) // *Resources, Conservation and Recycling*. 2019. Vol. 147. Pp. 157–168. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.04.019.

25. Silgado S.S., Valdiviezo L.C., Domingo S.G., Roca X. Multi-criteria decision analysis to assess the environmental and economic performance of using recycled gypsum cement and recycled aggregate to produce concrete: The case of Catalonia (Spain) // *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 133. Pp. 120–131. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.11.023.

26. Wang Q., Sun Sh., Yao G., Wang Zh., Lyu X. Preparation and characterization of an alkali-activated cementitious material with blast-furnace slag, soda sludge, and industrial gypsum // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 340. № 127735. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127735.

27. Feng Y., Xue Z., Zhang B., Xie J., Chen, J. Tan C., Zhao Ch. Effects of phosphogypsum substitution on the performance of ground granulated blast furnace slag/fly ash-based alkali-activated binders // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 70. № 106387. DOI: 10.1016/j.job.2023.106387.

28. Nikulicheva T.B., Zakhvalinskii V.S., Pilyuk E.A., Nikulin I.S., Vyazmin V.V., Mishunin M.V., Saenko M.Yu., Telpova O.A., Alfimova N.I., Erina T.A. The Possibility of Practical Application of Citrogypsum in Engineering // Technical Physics. 2024. Vol. 69. №. 5. Pp. 1307–1315. DOI: 10.1134/S1063784224040297.

29. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю. Влияние условий и длительности твердения на физико-

механические характеристики изделий на основе гипсосодержащих отходов // Региональная архитектура и строительство. 2025. № 2(63). С. 46–54. DOI: 10.54734/20722958_2025_2_46.

30. Kozhukhova N.I., Shurakov I.M., Alfimova N. I., Zhernovskaya I.V., Kozhukhova M.I. Using of Citrogypsum in Alkali Activated Systems // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Vol. 307. Pp. 17–22. DOI: 10.1007/978-3-031-20459-3_3.

Информация об авторах

Глазков Роман Алексеевич, аспирант кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: romanglazkov1998@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46. Младший научный сотрудник. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, Победы, д. 85.

Кожухова Наталья Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Боцман Лариса Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: lora80@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Жерновская Ирина Васильевна, старший преподаватель кафедры высшей математики. E-mail: ziv_1111@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 26.08.2025 г.

© Глазков Р.А., Кожухова Н.И., Боцман Л.Н., Жерновская И.В., 2026

^{1,2}**Glazkov R.A.**, ^{1,*}**Kozhukhova N.I.**, ¹**Botsman L.N.**, ¹**Zhernovskaya I.V.**

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

²Belgorod National Research University

*E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

CHARACTERISTICS OF SLAG CEMENT WITH COMPLEX ACTIVATOR WITH GYPSUM-BEARING WASTE

Abstract. In recent decades, alkaline activation materials, in particular slag cements, have attracted increasing attention among scientists and the industrial sector. Their performance characteristics largely depend on the type of alkali activator. The most effective in this case are considered to be hydroxides or salts of alkali and alkaline earth metals, which are not natural resources and can only be synthesized using energy-intensive technologies, which makes them a source of environmental pollution due to carbon dioxide emissions. As part of the research work, the effect of various combinations of Ca^{2+} and Na^+ ($\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ ratio) components ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3), including gypsum-containing waste ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) in the composition of a complex alkali activator on the strength characteristics of a slag-alkaline binder was studied. It was found that with a constant $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content, an increase in the curing time promotes a shift in the optimal concentrations of Na^+ and Ca^{2+} containing components in the binder matrix towards higher values. With a constant concentration of citrogypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) in the binder system, the optimal dosage of the Ca^{2+} containing component ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) does not change, and the content of the Na^+ containing component (Na_2CO_3) shifts towards lower values with an increase in the curing time of the binder. It was found that an increase in the $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ ratio due to an increase in the concentration of Na^+ cations (Na_2CO_3) with a constant content of Ca^{2+} cations ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) promotes a decrease in the compressive strength of the binder. At the same time, a decrease in the $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ ratio due to an increase in the concentration of Ca^{2+} cations ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) also leads to a decrease in strength characteristics.

Keywords: blast furnace granulated slag, cement slag, gypsum-bearing waste, complex alkaline activator, strength characteristics

REFERENCES

1. Provis J.L. Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. Pp. 40–48.
2. Ye J., Zhang W., Shi D. Performance evolutions of tailing-slag-based geopolymer under severe conditions. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2015. Vol. 4. No. 2. Pp. 101–115.
3. Siddique R. Design and development of self-compacting concrete made with coal bottom ash. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2015. Vol. 4. No. 3–4. Pp. 225–237.
4. Das S.K., Mishra J., Mustakim S.M., Adesina A., Kaze C.R., Das D. Sustainable utilization of ultrafine rice husk ash in alkali activated concrete: characterization and performance evaluation. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2021. Pp. 1–19.
5. Provis J.L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? *Materials and Structures*. 2014. Vol. 47. No. 1–2. Pp. 11–25.
6. Richardson I.G., Brough A.R., Groves G.W., Dobson C.M. The characterization of hardened alkali activated blast-furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H) phase. *Cement and Concrete Research*. 1994. Vol. 24. No. 5. Pp. 813–829.
7. Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., Separovic F., Van Deventer J.S.J. ^{29}Si NMR study of structural ordering in aluminosilicate geopolymer gels. *Langmuir*. 2005. Vol. 21. No. 7. Pp. 3028–3036.
8. Kozhukhova N., Strokova V., Zhernovsky I., Sobolev K. Geopolymerization and Structure Formation in Alkali Activated Aluminosilicates with Different Crystallinity Degree. 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). ICAM 2019. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019. Pp. 331–334. DOI: 10.1007/978-3-030-22974-0_80.
9. Wang Q., Yang J., Yan P. Influence of initial alkalinity on the hydration of steel slag. *Science China Technological Sciences*. 2012. Vol. 55. No. 12. Pp. 3378–3387. DOI: 10.1007/s11431-012-4830-9.
10. Deja J. Immobilization of Cr^{6+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} and Pb^{2+} in alkali-activated slag binders. *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32(12). Pp. 1971–1979. DOI:10.1016/S0008-8846(02)00904-3
11. Pereira C.F., Luna Y., Querol X., Antenucci D., Vale J. Waste stabilization/solidification of an electric arc furnace dust using fly ash-based geopolymers. *Fuel*. 2009. Vol. 88(7). Pp. 1185–1193. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.01.021.
12. Zhao Y.L., Qiu J.P., Xing J., Sun X.G. Chemical activation of binary slag cement with low carbon footprint. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 267. No. 121455. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121455.
13. Tan H.B., Deng X.F., He X.Y., Zhang J.J., Zhang X., Su Y., Yang J. Compressive strength and hydration process of wet-grinded granulated blast-furnace slag activated by sodium sulfate and sodium carbonate. *Cement Concrete Composites*. 2019. Vol. 97. Pp. 387–398. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2019.01.012.
14. Majhi R.K., Nayak A.N. Production of sustainable concrete utilizing high-volume blast furnace slag and recycled aggregate with lime activator. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 255. No. 120188. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120188.
15. Yang K.-H., Sim J.-I., Nam S.-H. Enhancement of reactivity of calcium hydroxide-activated slag mortars by the addition of barium hydroxide. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. Pp. 241–251. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.09.00.
16. Nunes V.A., Borges P.H.R. Recent advances in the reuse of steel slags and future perspectives as binder and aggregate for alkali-activated materials. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 281. No. 122605. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122605
17. Wu S., Liang Y., Zhang Sh., Sun H., Ji T., Li J. Damage mechanics of $\text{CaO-Na}_2\text{CO}_3$ -Slag cement mortar under freeze-thaw in water and sulfate solution. *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 111. No. 113621. DOI:10.1016/j.job.2025.113621.
18. Jin F., Gu K., Al-Tabbaa A. Strength and hydration properties of reactive MgO -activated ground granulated blast furnace slag paste. *Cement Concrete Composites*. 2015. Vol. 57(2). Pp. 8–16. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.10.007.
19. Ni W., Wang E., Li J., Sun H. Cementing properties of steel slag activated by sodium silicates and sodium hydroxide. *Journal of University of Science and Technology Beijing Mineral Metallurgy Material*. 2005. Vol. 12. Pp. 464–468. DOI: 10.3389/fmats.2025.1576078.
20. Kim M.S., Jun Y., Lee C., Oh J.E. Use of CaO as an activator for producing a price-competitive non-cement structural binder using ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 54. Pp. 208–214. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.09.011.
21. Alfimova N., Levickaya K., Nikulin I., Elistratkin M., Kozhukhova N., Anosov N. Effect of Phosphogypsum Origin and Calcination Temperature on Characteristics of Supersulfated Cements. *Journal of Composites Science*. 2025. Vol. 9. No. 4. P. 146. DOI: 10.3390/jcs9040146.

22. Huang X., Jiang M., Zhao X., Tang C. Mechanical properties and hydration mechanisms of high-strength fluorogypsum-blast furnace slag-based hydraulic cementitious binder. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 127. Pp. 137–143. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.152.

23. Kozhukhova N.I., Glazkov R.A., Kolomytseva A.I., Nikulin I.S., Cherevatova A.V. Effect of citrogypsum on shrinkage in slag cements [Vliyaniye tsitrogipsa na usadochnyye deformatsii v shlakoshchelochnykh vyazhushchikh sistemakh]. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No 10. Pp. 47–51. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-818-10-47-51. (rus)

24. Pantini S., Giurato M., Rigamonti L. A LCA study to investigate resource-efficient strategies for managing post-consumer gypsum waste in Lombardy region (Italy). *Resources, Conservation and Recycling*. 2019. Vol. 147. Pp. 157–168. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.04.019.

25. Silgado S.S., Valdiviezo L.C., Domingo S.G., Roca X. Multi-criteria decision analysis to assess the environmental and economic performance of using recycled gypsum cement and recycled aggregate to produce concrete: The case of Catalonia (Spain). *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 133. Pp. 120–131. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.11.023.

26. Wang Q., Sun Sh., Yao G., Wang Zh., Lyu X. Preparation and characterization of an alkali-activated cementitious material with blast-furnace slag,

soda sludge, and industrial gypsum. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 340. No. 127735. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127735.

27. Feng Y., Xue Z., Zhang B., Xie J., Chen, J. Tan C., Zhao Ch. Effects of phosphogypsum substitution on the performance of ground granulated blast furnace slag/fly ash-based alkali-activated binders. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 70. No. 106387. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106387.

28. Nikulicheva T.B., Zakhvalinskii V.S., Pilyuk E.A., Nikulin I.S., Vyazmin V.V., Mishunin M.V., Saenko M.Yu., Telpova O.A., Alfimova N.I., Erina T.A. The Possibility of Practical Application of Citrogypsum in Engineering. *Technical Physics*. 2024. Vol. 69. No. 5. P. 1307–1315. DOI: 10.1134/S1063784224040297.

29. Alfimova N.I., Pirieva S.Yu. The effect of hardening conditions on the physical and mechanical characteristics of gypsum-containing waste [Vliyaniye usloviy i dlitel'nosti tverdeniya na fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki izdeliy na osnove gipsosoderzhashchikh otkhodo]. *Regional architecture and engineering*. 2025. No. 2(63). Pp. 46–54. DOI: 10.54734/20722958_2025_2_46. (rus)

30. Kozhukhova N.I., Shurakov I.M., Alfimova N. I., Zhernovskaya I.V., Kozhukhova M.I. Using of Citrogypsum in Alkali Activated Systems. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Vol. 307. Pp. 17–22. DOI: 10.1007/978-3-031-20459-3_3.

Information about the authors

Glazkov, Roman A. PhD student, e-mail: romanglazkov1998@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46; Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University. Russia, 308015, Belgorod, Pobedy str., 85.

Kozhukhova, Natalia I. PhD, professor, e-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46

Botsman, Larisa N. PhD, Assistant professor. E-mail: lora80@list.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Zhernovskaya, Irina V. Senior lector. E-mail: ziv_1111@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46

Received 26.08.2025

Для цитирования:

Глазков Р.А., Кожухова Н.И., Ботсман Л.Н., Жерновская И.В. Характеристики шлакощелочного вяжущего с использованием комплексного активатора с гипсосодержащим отходом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 1. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-8-19

For citation:

Glazkov R.A., Kozhukhova N.I., Botsman L.N., Zhernovskaya I.V. Characteristics of slag cement with complex activator with gypsum-bearing waste. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2026. No. 1. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-8-19