

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-8-20

<sup>1,2</sup>Кожухова Н.И., <sup>3</sup>Буковцова А.И., <sup>4</sup>Плющенко Н.Ю., <sup>1</sup>Жерновская И.В.<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова<sup>2</sup>Московский политехнический университет<sup>3</sup>Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»<sup>4</sup>НИУ Московский государственный строительный университет

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИКАЦИИ ГЕОПОЛИМЕРНОЙ СИСТЕМЫ МИНЕРАЛЬНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

**Аннотация.** Геополимерные системы, в силу своих положительных особенностей, в полной мере могут конкурировать с традиционными портландцементными аналогами, а, зачастую, они обладают ценными свойствами, которые позволяют значительно расширить области применения минеральных вяжущих строительного назначения. Это представляется возможным за счет широкой номенклатуры сырьевой базы разного генезиса, а также, в результате использования модифицирующих добавок различной природы, морфологии и, как следствие, функциональности. В рамках этой работы было изучено влияние некоторых рецептурных факторов: концентрации щелочного активатора, а также типа и содержания модифицирующего агента на прочностные характеристики геополимерного вяжущего на основе золы-уноса. Полученные результаты исследования позволили установить, что повышение концентрации щелочного компонента негативно отражается на влиянии модификатора. Так, модификация геополимерного вяжущего портландцементом в диапазоне концентраций NaOH 9–13 % приводит к упрочнению геополимерной системы с увеличением его содержания. При увеличении концентрации щелочной активатор инициирует разупрочняющий эффект от введения портландцемента. В свою очередь, модификация каолином и метакаолином приводит к снижению прочностных характеристик на сжатие и изгиб во всем рассматриваемом диапазоне концентраций щелочи. Причем, чем выше щелочность геополимерной матрицы, тем ярче проявляется разупрочняющий эффект модифицирующей добавки.

**Ключевые слова.** геополимер, зола-уноса, модифицирующий агент, прочностные свойства.

**Введение.** Проводя аналогию с традиционными цементными системами, важно понимать, что существующий на сегодняшний день опыт научно-практических исследований в области геополимерных композитов, демонстрирует следующие их значимые преимущества как перспективных энергоэффективных материалов:

– прочностные показатели на сжатие достигают 150 МПа и выше [1];

– устойчивость к высокотемпературному воздействию, а также к резким температурным градиентам [2, 3];

– высокая плотность, обеспечивающая невысокие показатели влаго- и газопроницаемости [4, 5].

Выше описанные положительные преимущества способствуют обеспечению эксплуатируемым геополимерным композитам резистивности в агрессивных средах (био- и кислотная виды коррозий) [6–8], а также связыванию и стабилизации в своей структуре различных компонентов на молекулярном уровне, позволяя производить на основе геополимеров различные резервуары-

иммобилизаторы для утилизации и длительного хранения побочных продуктов загрязняющего, токсичного, а также радиоактивного действия [9].

Таким образом, выше перечисленные характеристики геополимерных материалов значительно расширяют области их практического применения, в том числе, и для эксплуатации в экстремальных зонах и неблагоприятных условиях.

Введение различных добавок в состав геополимерной матрицы также применяется для создания бетонов специального функционального назначения – в строительной отрасли; в производстве форм, инструментальной оснастки, алюминиевых литейных сплавов – в металлургической промышленности и т.д.

Как правило, свойства геополимеров зависят от сырьевых компонентов, используемых при их производстве, включая происхождение и свойства алюмосиликатного сырья, химические характеристики щелочного агента, количественное соотношение компонентов между собой и

т.д., которые влияют на процесс геополимеризации и конечные свойства геополимерного продукта, в целом.

На сегодняшний день при проектировании составов геополимерных вяжущих за основу, как правило, берутся следующие основные положения геополимерного синтеза [10], а также существующие на сегодняшний день технологические аспекты его реализации [11–13]:

– геополимерное вяжущее представляет собой неорганический полимер, синтезируемый путем взаимодействия раствора гидроксида или соли щелочного, или щелочноземельного металла с алюмосиликатным компонентом в температурном диапазоне от 25 до 120 °С;

– наиболее часто используемое содержание щелочного активатора в составе геополимерной системы в пересчете на молярные концентрации оксидов  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{Na}/\text{Al}$  соотношение) находятся в диапазоне 0,2–1, что эквивалентно массовым концентрациям в диапазоне  $\approx 8$ –30 % [1, 14];

– наиболее предпочтительный температурный диапазон для термической обработки (как правило, термической сушки) геополимерных вяжущих, зачастую, колеблется в пределах 60–90 °С, что обеспечивает наиболее благоприятные условия консолидации и формирования правильной структуры геополимерной матрицы, обеспечивая таким образом наиболее высокие

показатели прочности, твердости и т.д., сопоставимые, а, иногда, и превышающие цементные аналоги [15, 16];

– для улучшения эксплуатационных характеристик геополимерных систем с низкой реакционной активностью и иными неудовлетворительными свойствами практикуется введение различных модифицирующих компонентов в количестве до 20 %.

Целью данного исследования является изучение влияния минеральных модифицирующих алюмосиликатных компонентов разной природы: портландцемента, каолина и метакаолина и их концентрации на прочностные характеристики: на сжатие и изгиб, геополимерных вяжущих разного состава.

**Материалы и методы.** В рамках исследования в качестве основного алюмосиликатного компонента применялась зола-уноса Новотроицкой ТЭС (РФ); в качестве минеральных модификаторов – портландцемент ЦЕМ I42.5Н (АО «Себряковцемент»), каолин месторождения Кривой Рог (РФ), метакаолин, синтезированный в лабораторных условиях из каолина путем дегидроксилирования в процессе обжига при температуре 800 °С.

Химические составы используемых твердофазных материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав используемых твердофазных компонентов

Твердофазный компонент	Содержание оксидов, масс. %										
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SO}_3$	$\text{N}_2\text{O}$	п.п.п.
Зола-уноса	58,98	28,29	4,63	0,97	0,65	1	3,74	0,36	–	–	6,07
Портландцемент	19,13	5,21	3,58	0,32	0,6	1,28	65,38	–	3,47	–	0,23
Каолин	53,8	43,4	1,02	0,58	0,56	0,21	0,01	0,06	–	0,03	4,2
Метакаолин	53,1	42,8	0,7	0,3	0,9	–	0,15	–	–	0,02	0,4

В качестве щелочного активатора использовался натр едкий  $\text{NaOH}$  (ч.д.а) в форме водного раствора.

Выбор используемых в рамках исследования минеральных компонентов: портландцемента, каолина и метакаолина, в качестве модификаторов обоснован сродством структур с основным алюмосиликатным сырьем, а также потенциальной эффективностью их использования в процессе геополимерного синтеза с точки зрения генетических характеристик.

Для оптимизации составов геополимерного вяжущего был использован метод математического планирования эксперимента.

Исследование проводилось с тремя сериями модифицированных вяжущих на основе золы-

уноса Новотроицкой ТЭС, содержащих вместо части золы минеральные модифицирующие компоненты: портландцемент, каолин и метакаолин от 0 до 20 %.

Для модифицированных геополимерных вяжущих были составлены три матрицы планирования (для разных модификаторов), включающие в себя 9 различных составов, отличающихся типу соотношением компонентов в матрице. Так, при составлении матрицы планирования в качестве входных или варьируемых факторов были выбраны следующие: концентрация щелочного активатора ( $X_1$ ) и концентрация минерального модификатора ( $X_2$ ). Диапазон варьирования для параметра  $X_1$  составил 9–17 %; для параметра  $X_2$  – 0–20 % (таблицы 2–3).

Таблица 2

**Условия планирования эксперимента для модифицированных геополимерных вяжущих**

Факторы варьирования эксперимента		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	1	
Концентрация щелочного активатора, %	X <sub>1</sub>	9	13	17	4
Концентрация минерального модификатора, %	X <sub>2</sub>	0	10	20	10

Для возможности сопоставления полученных в дальнейшем результатов, для экспериментальных составов свежеприготовленных геополимерных вяжущих обеспечивалась одинаковая

степень их подвижности, которая определялась по значению расплыва конуса – в диапазоне 140±10 мм.

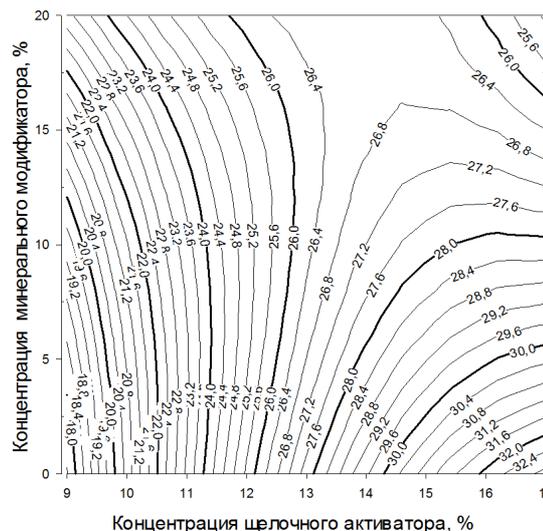
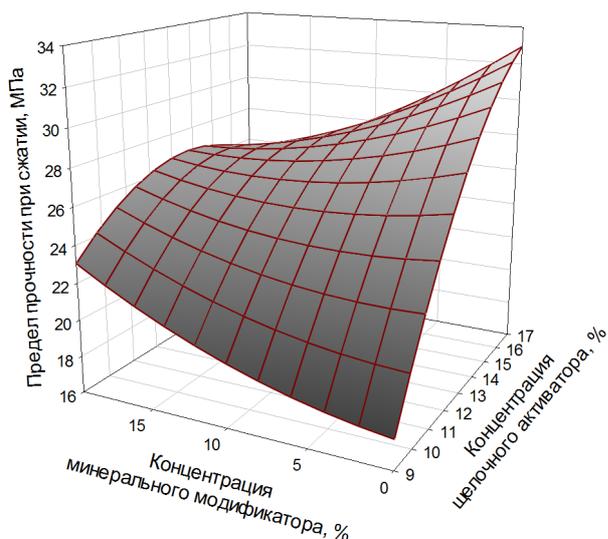
Таблица 3

**Модель матрицы планирования эксперимента для модифицированных геополимерных вяжущих**

№ точки плана	Факторы варьирования (кодированный вид)		Факторы варьирования (натуральный вид)	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Концентрация щелочного активатора, %	Концентрация минерального модификатора, %
1	-1	-1	9	0
2	-1	0	9	10
3	-1	1	9	20
4	0	-1	13	0
5	0	0	13	10
6	0	1	13	20
7	1	-1	17	0
8	1	0	17	10
9	1	1	17	20

**Основная часть.** На основании разработанной матрицы планирования (таблицы 2–3) была проведена серия экспериментов, и получены результаты прочности на сжатие и на изгиб для всех составов модифицированного геополимерного вяжущего.

Для визуализации характера зависимости прочностных параметров вяжущего от его компонентного состава в рамках данного исследования были построены графические зависимости в виде 3-D номограмм с использованием программы SigmaPlot (рисунки 1–6).



$$Y = 26,6 + 3,42X_1 - 0,5X_2 - 2,78X_1^2 + 0,77X_2^2 - 3,85X_1X_2 \quad R^2 = 0,9$$

Рис.1. Зависимость предела прочности при сжатии от содержания щелочного активатора и минерального модификатора (минеральный модификатор: портландцемент)

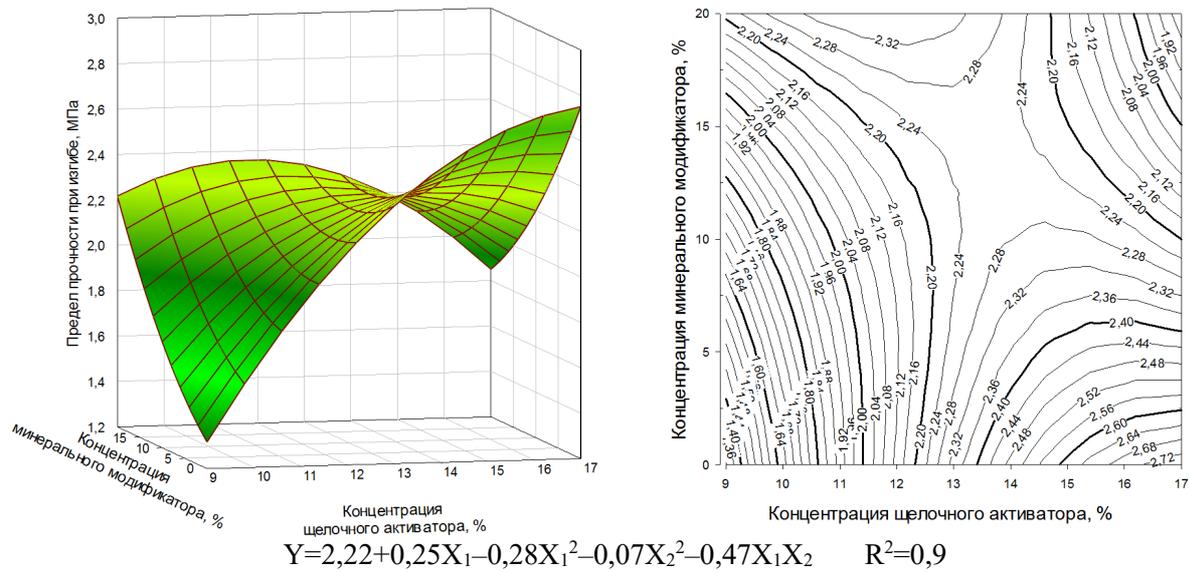


Рис. 2. Зависимость предела прочности при изгибе от концентрации щелочного активатора и минерального модификатора (минеральный модификатор: портландцемент)

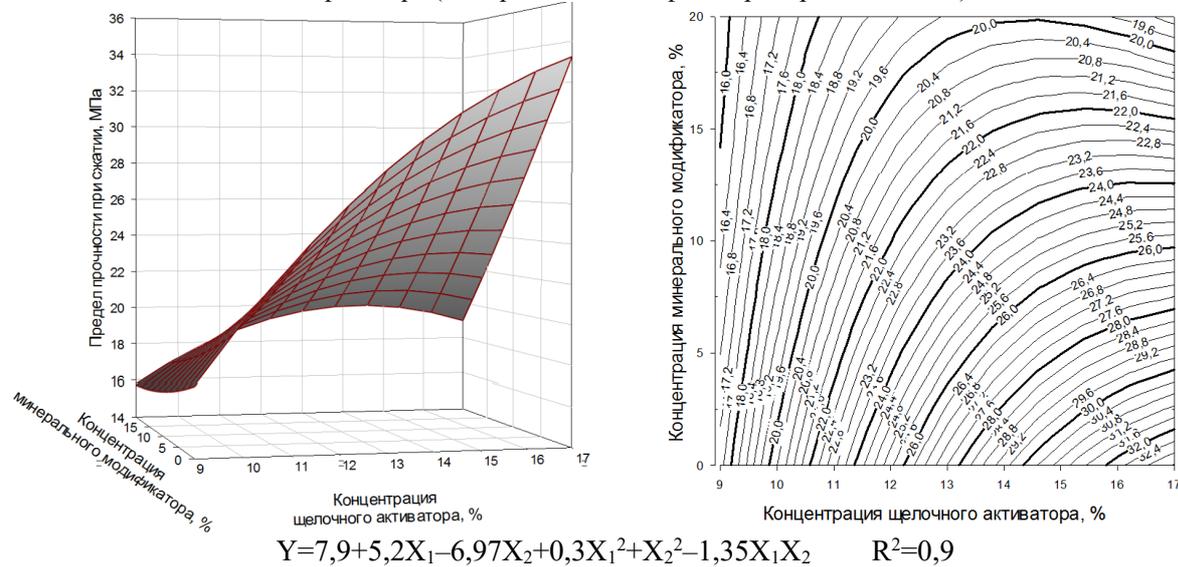


Рис. 3. Зависимость предела прочности при сжатии от содержания щелочного активатора и минерального модификатора (минеральный модификатор: каолин)

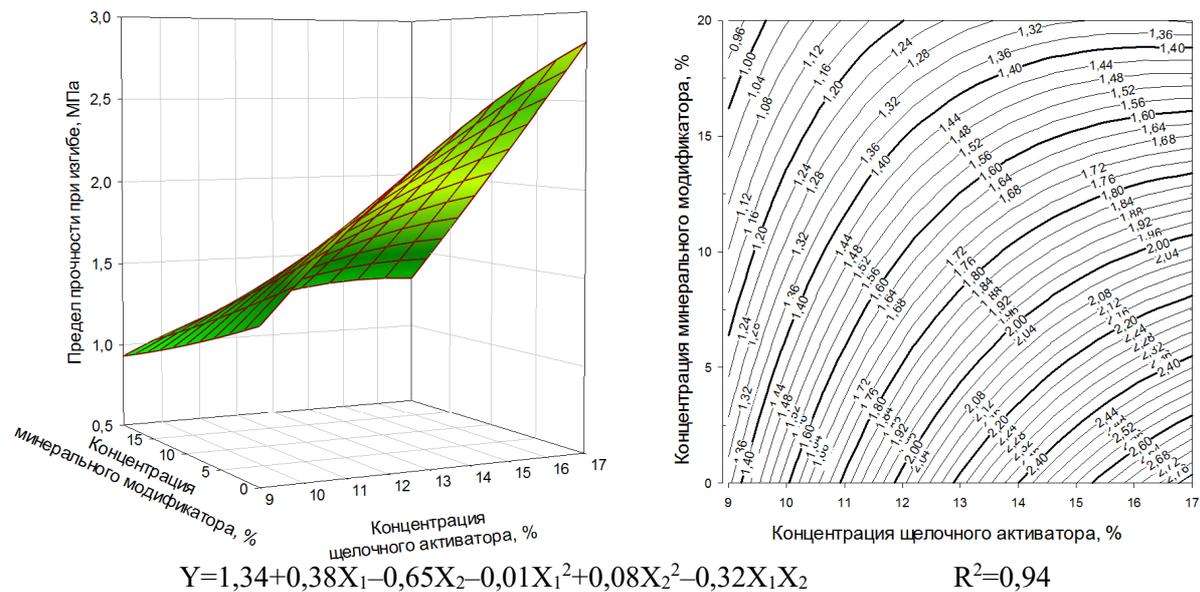


Рис. 4. Зависимость предела прочности при изгибе от содержания щелочного активатора и минерального модификатора (минеральный модификатор: каолин)

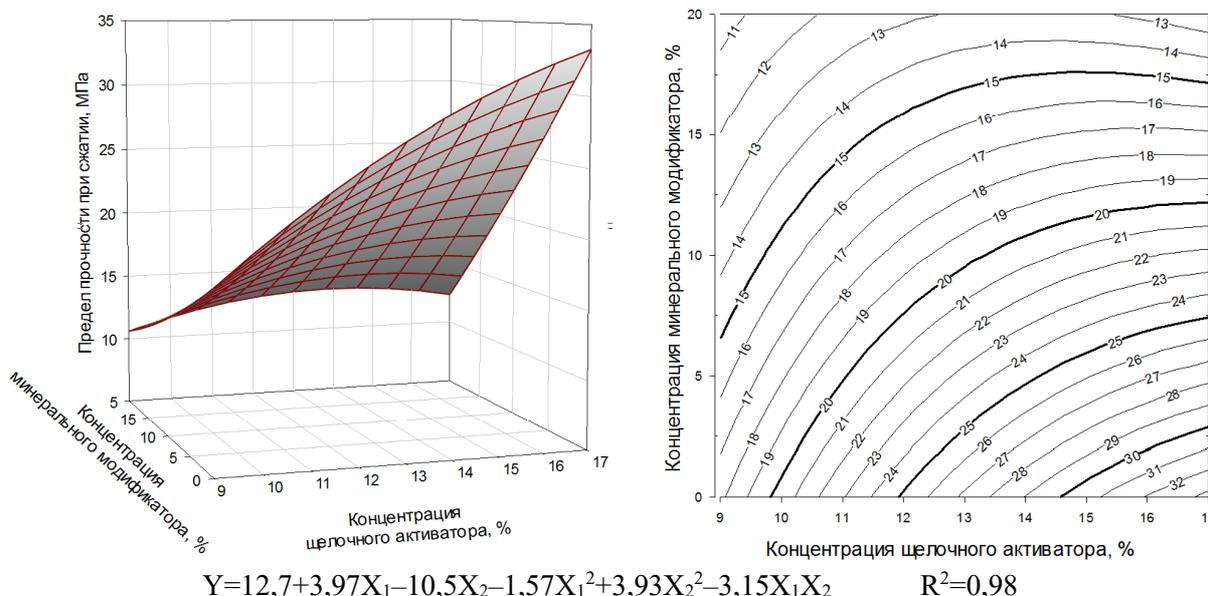


Рис. 5. Зависимость предела прочности при сжатии от содержания щелочного активатора и минерального модификатора (минеральный модификатор: метакаолин)

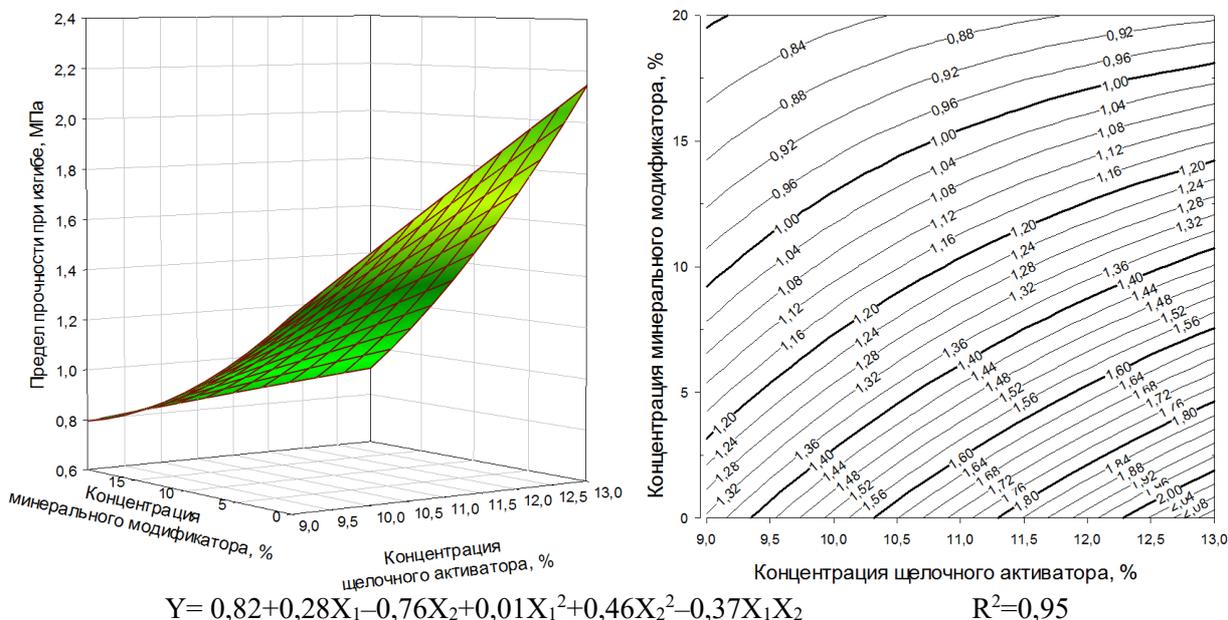


Рис. 6. Зависимость предела прочности при изгибе от содержания щелочного активатора и минерального модификатора (минеральный модификатор: метакаолин)

Анализ полученных экспериментальных данных, а также построенных графических зависимостей (рисунки 1–6) позволил установить следующие закономерности:

- повышение концентрации щелочного активатора в рассматриваемом диапазоне способствует упрочнению формирующейся геопалимерной структуры для трех исследуемых модифицированных паст, что выражается в повышении пределов прочности при сжатии и при изгибе;

- природа минерального модификатора в составе геопалимерной системы по-разному влияет на формирование компрессионной прочности, а также устойчивости к изгибающим нагрузкам. Так, увеличение доли портландцемента в составе

сырьевой смеси способствует повышению прочности на сжатие и на изгиб в пределах концентраций активатора 9–13 %; более высокое содержание щелочи совместно с модификатором ПЦ негативно отражается на формировании прочности геопалимерного каркаса; введение добавок каолина и метакаолина, а также постепенное повышение их концентрации в составе геопалимерной пасты приводит к снижению показателей прочности на сжатие и на изгиб, в большей степени – с использованием метакаолина, в меньшей степени – с использованием каолина;

- характер зависимостей прочностных характеристик консолидированных геопалимерных паст от концентрации минерального модификатора и щелочного активатора в зависимости

от типа модифицирующего агента различен: номограммы, описывающие характер изменения прочности паст, модифицированных портландцементом (рисунки 1, 2) в зависимости от компонентного состава, имеют нелинейную, преимущественно, параболическую зависимость, а номограммы, описывающие аналогичную зависимость для паст, модифицированных метакаолином (рисунки 5, 6), носят преимущественно гиперболический характер. В то же время, характер зависимости номограмм геополимерных паст, содержащих каолин в качестве модификатора (рисунки 3, 4) может быть преимущественно описан как линейный.

В свою очередь, на основании анализа математических зависимостей, описывающих полученные номограммы в виде уравнений регрессии и коэффициента корреляции  $R^2$ , были выявлены и сформулированы ниже приведенные закономерности:

– значимость входных (варьируемых) параметров на компрессионную прочность паст с использованием разных модификаторов весьма неоднозначна: в ПЦ-модифицированной геополимерной системе более значимым фактором является концентрация щелочного активатора ( $X_1$ ), а в системе, модифицированной с помощью метакаолина, наоборот, более значимым фактором является концентрация минерального модификатора ( $X_2$ ); в пасте каолиновым модификатором уравнение регрессии демонстрирует, что оба

фактора варьирования равнозначны (соответствующие коэффициенты в уравнении регрессии сопоставимы между собой). При этом, совместный эффект обоих факторов во всех исследуемых пастах на предел прочности при сжатии не значителен, и в системах с модификацией ПЦ и метакаолином коэффициенты значимости сопоставимы между собой ( $X_1X_2 \approx 3$ ), а в пасте с использованием каолина соответствующий коэффициент в 2 раза ниже ( $X_1X_2 = 1,35$ );

– значимость входных (варьируемых) параметров на предел прочности при изгибе для исследуемых паст равноценна, о чем свидетельствуют соответствующие коэффициенты перед параметрами  $X_1$  и  $X_2$ , которые варьируются в пределах 0,25–0,76 (рисунки 2, 4, 6). Совместное влияние этих факторов (параметр  $X_1X_2$ ) на устойчивость модифицированных геополимерных паст к изгибающим нагрузкам также незначительно и сопоставимо, согласно значениям соответствующих коэффициентов (0,32; 0,37; 0,47).

Важно отметить, что математические зависимости для модифицированных геополимерных паст имеют высокий коэффициент корреляции:  $R^2 \geq 0,9$  или не менее 90 %, что свидетельствует о высокой степени адекватности полученных уравнений регрессии, описывающих характер поведения геополимерных паст в системе параметров «концентрация щелочного активатора – концентрация минерального модификатора – параметр прочности».

Таблица 4

#### Значения пределов прочности при сжатии и изгибе для модифицированного геополимерного вяжущего в зависимости от состава

Тип модификатора	Прочностные характеристики	Концентрация щелочного активатора NaOH, %								
		9			13			17		
		Концентрация минерального модификатора, %								
		0	10	20	0	10	20	0	10	20
ПЦ	$R_{сж.}$	17,7	20,1	22,2	26,5	26,9	27,3	34,1	26,8	25,3
	$R_{изг.}$	1,3	1,8	2,1	2,2	2,3	2,4	2,9	2	1,9
Каолин	$R_{сж.}$	17,7	16,5	15,3	26,5	24,1	20	34,1	24,8	19,1
	$R_{изг.}$	1,3	1,2	0,9	2,2	1,8	1,2	2,9	1,9	1,4
Метакаолин	$R_{сж.}$	17,7	14,6	9,8	26,5	19,7	13,8	34,1	21,3	12,4
	$R_{изг.}$	1,3	1	0,8	2,2	1,4	0,9	2,9	1,9	1

Анализ прочностных характеристик модифицированных геополимерных паст, отраженных в таблице 4, позволил установить, что несмотря на то, что при малых концентрациях щелочного активатора NaOH в диапазоне 9–13 %, введение добавки портландцемента способствует упрочнению геополимерного каркаса. Эффективность этого модификатора при увеличении щелочи в составе вяжущей системы, выраженная приростом прочности на сжатие, постепенно снижается. Так, при минимальной концен-

трации NaOH в выбранном диапазоне (9 %) прирост компрессионной прочности при добавлении модификатора в количестве 10 и 20 % составил 13,5 % и 25,4 %, соответственно, по отношению к бездобавочному составу (17,7 МПа). В то же время, увеличение содержания NaOH до 13 % в составе геополимерной пасты обеспечивает прирост прочности на сжатие 1,5 % и 3 % относительно контрольного состава (26,5 МПа), при введении модификатора ПЦ в количестве 10 и 20 %, соответственно. Важно отметить, что при

дальнейшем увеличении концентрации щелочного агента до 17 %, введение портландцементного модификатора способствует довольно резко снижению компрессионной прочности: на 21,4 % и 25,8 % при содержании ПЩ 10 % и 20 %, соответственно относительно бездобавочного аналога (34,1 МПа).

Для остальных двух модифицирующих агентов: каолина и метакаолина, в отличие от ПЩ, во всем исследуемом диапазоне концентраций NaOH наблюдается снижение компрессионной прочности при введении модификатора. При этом, негативный эффект (снижение прочности относительно бездобавочного состава) от введения модифицирующих добавок каолина и метакаолина усиливается при смещении концентрации щелочи в сторону больших значений:

– для каолина: при 9 % концентрации NaOH имеет место снижение прочности на 6,8 % и 13,5 %, при содержании модификатора 10 % и 20 %, соответственно; при 13% концентрации NaOH – 9 % и 24,5 %, соответственно; при 17 % концентрации NaOH – 27,2 % и 44 %, соответственно;

– для метакаолина: наблюдается более заметный спад прочности. При 9 % концентрации NaOH имеет место снижение компрессионной прочности на 17,5 % и 44,6 %, при содержании модификатора 10 % и 20 %, соответственно; при 13% концентрации NaOH – 25,6 % и 47,9 %, соответственно; при 17% концентрации NaOH – 37,5 % и 63,6 %, соответственно.

Оценка динамики показателей прочности при изгибе для экспериментальных составов модифицированных геополимерных паст показала,

что, в целом, в рассматриваемом диапазоне концентраций щелочного активатора введение любого минерального модификатора среди используемых в рамках исследования, негативно отражается на устойчивости геополимерного каркаса к изгибающим нагрузкам. Исключение составляет модификация портландцементом в диапазоне концентраций щелочного активатора 9–13 %, где наблюдается эффект упрочнения по мере увеличения доли модификатора в составе пасты. Однако, также, как и в случае с компрессионной прочностью, при повышении содержания NaOH в вяжущей системе от 9 до 13 % эффект упрочнения имеет затухающий характер. Так, при 9 %-м содержании NaOH в геополимерной системе, введение модификатора в количестве 10 и 20 % провоцирует увеличение прочности на изгиб на 38 % и 61 %, соответственно; увеличение концентрации щелочи до 13 % обеспечивает прирост прочности на изгиб лишь на 4,5 % и 9 %, при содержании ПЩ в количестве 10 и 20 %, соответственно.

На основании проведенного анализа характера изменения прочностных показателей геополимерных паст в системе параметров «тип модификатора – концентрация модификатора – концентрация щелочного активатора» был сформирован последовательный ряд эффективности модифицирующего действия среди рассматриваемых минеральных компонентов в геополимерной системе, который демонстрирует, что наибольшей модифицирующей эффективностью с точки зрения формирования прочностного геополимерного каркаса характеризуется портландцемент, а наименьшей – метакаолин (рис. 7).

### Увеличение модифицирующей эффективности в геополимерной системе

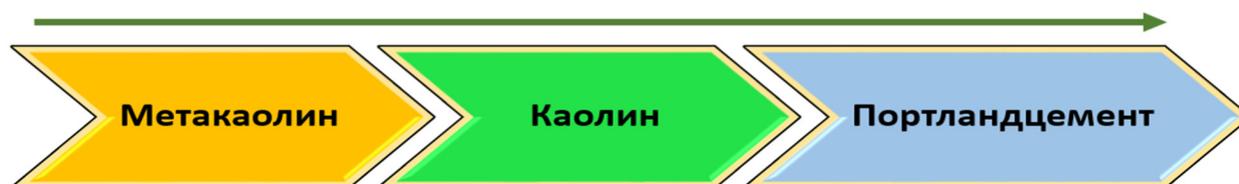


Рис. 7. Последовательный ряд эффективности модифицирующего действия минеральных компонентов в геополимерной системе

Анализ графических зависимостей (рисунки 1–6) и данных таблицы 4 позволил установить, что:

– рациональный состав модифицированного геополимерного вяжущего с использованием портландцемента следующий: концентрация щелочного активатора NaOH – 13 %; содержание минерального модификатора – 20 %;

– рациональные составы модифицированного геополимерного вяжущего с использованием каолина и метакаолина идентичны между собой: концентрация щелочного активатора NaOH – 17 %; содержание минерального модификатора – 10 %.

Таким образом, следует отметить, что использование минерального компонента с более высокой модифицирующей эффективностью

позволяет обеспечивать формирование наиболее прочного каркаса при меньшем содержании щелочного активатора.

Анализ взаимосвязи концентрации минерального модификатора и прочностных показателей модифицированных геополлимерных паст в

диапазоне оптимальных концентраций щелочного активатора (рис. 8) позволил установить идентичность характера изменения прочностей на сжатие и изгиб.

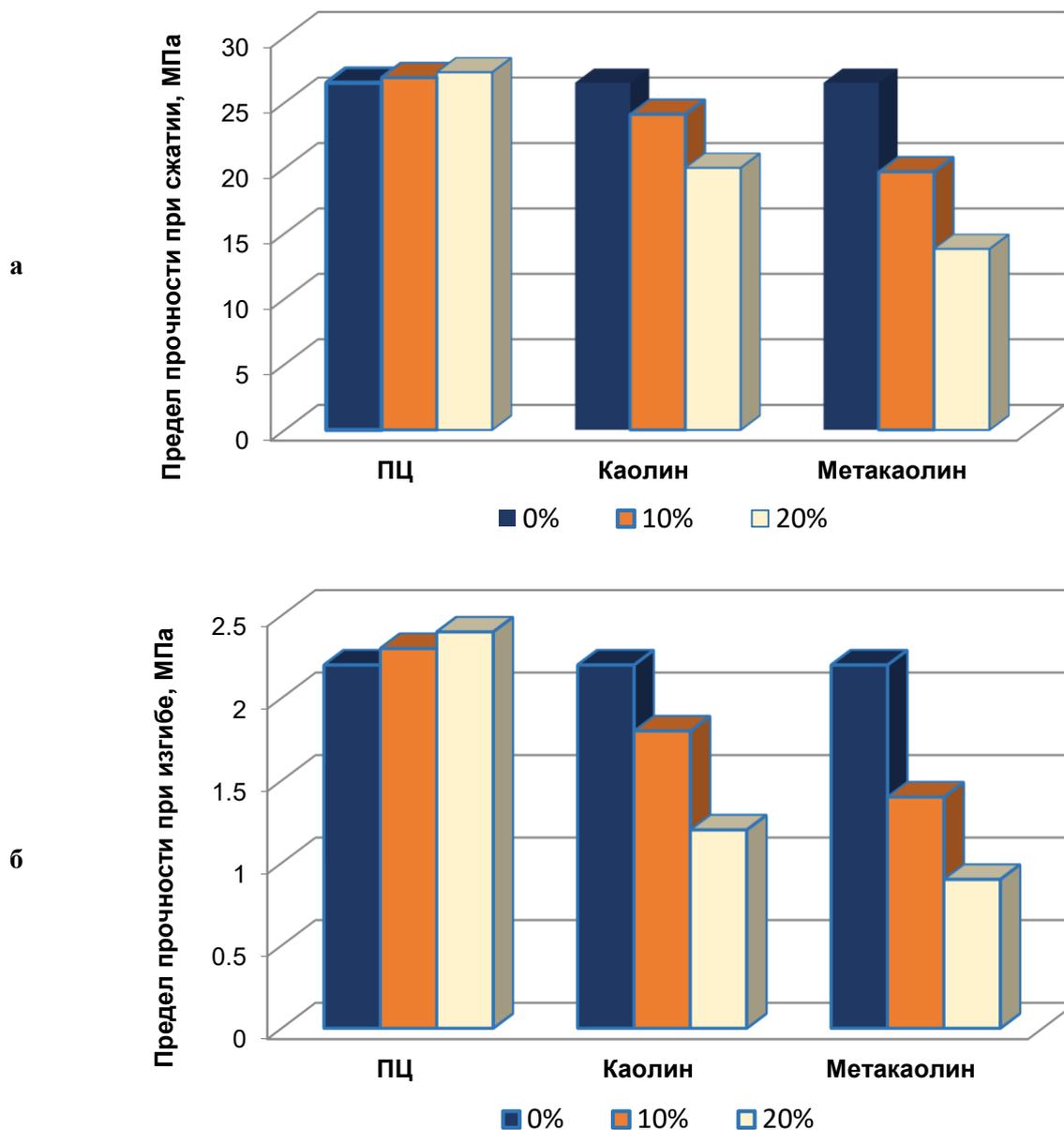


Рис. 8. Взаимосвязь концентрации минерального модификатора и предела прочности при сжатии (а) и изгибе (б) геополлимерных паст, модифицированных: портландцементом (ПЦ), каолином и метакаолином

Оценка характера взаимосвязи устойчивости модифицированных геополлимерных систем к сжимающим и изгибающим нагрузкам в зависимости от типа и концентрации минерального модификатора (рис. 9, 10) показала, что повышение концентрации минерального модификатора способствует снижению градиента между прочностью на сжатие и прочностью на изгиб: для ПЦ-

модифицированных паст; и увеличению градиента – для паст с использованием каолина и метакаолина.

Графическая зависимость, отраженная на рисунке 10, позволила установить, что  $R_{сж}/R_{изг}$  соотношение для ПЦ-модифицированных геополлимерных вяжущих при повышении концентрации минерального модификатора имеет тенденцию к незначительному снижению.

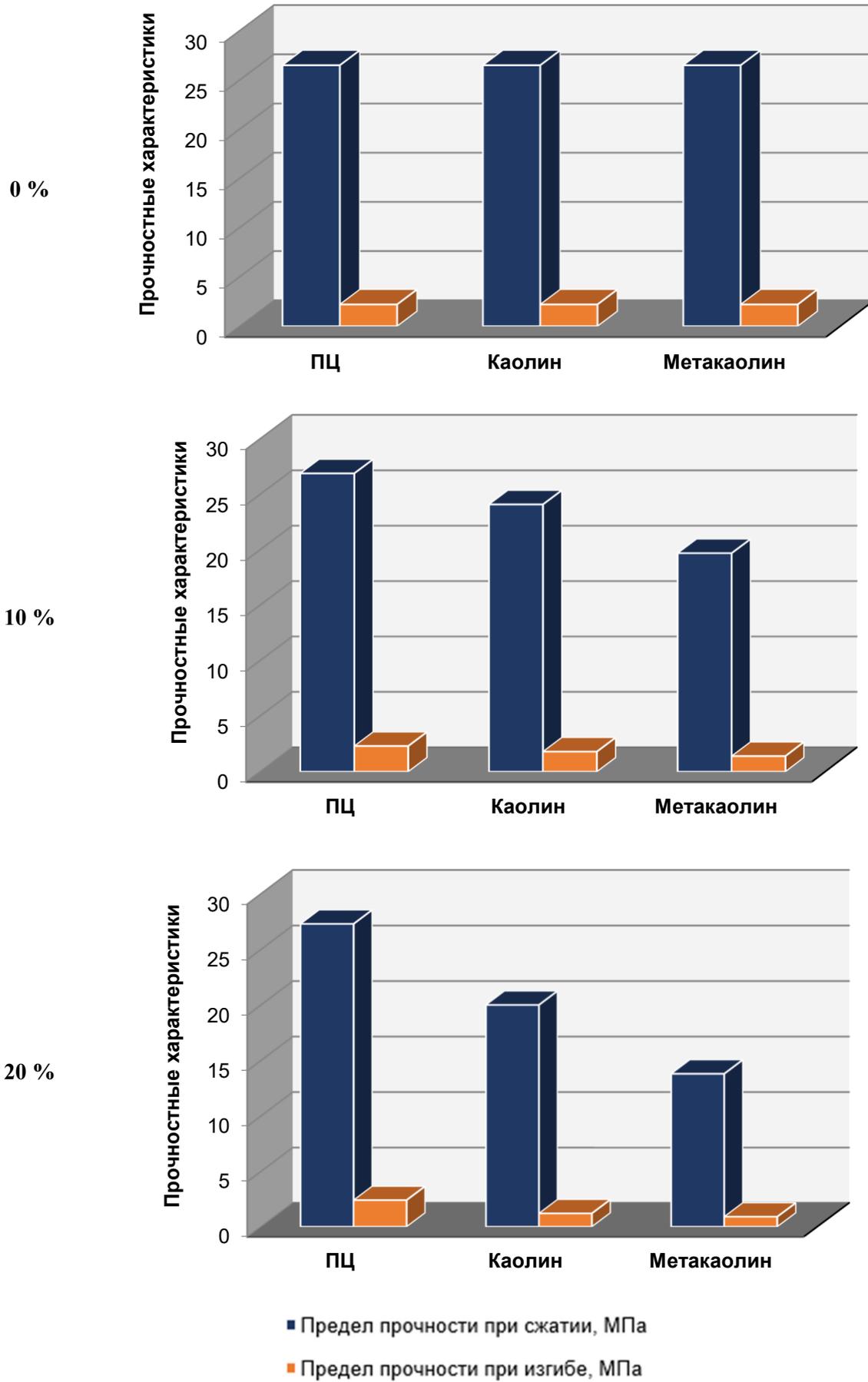


Рис. 9. Влияние концентрации минерального модификатора на вариацию соотношения  $R_{сж}/R_{изг}$  в геополимерных вяжущих, модифицированных: портландцементом (ПЦ), каолином и метакаолином

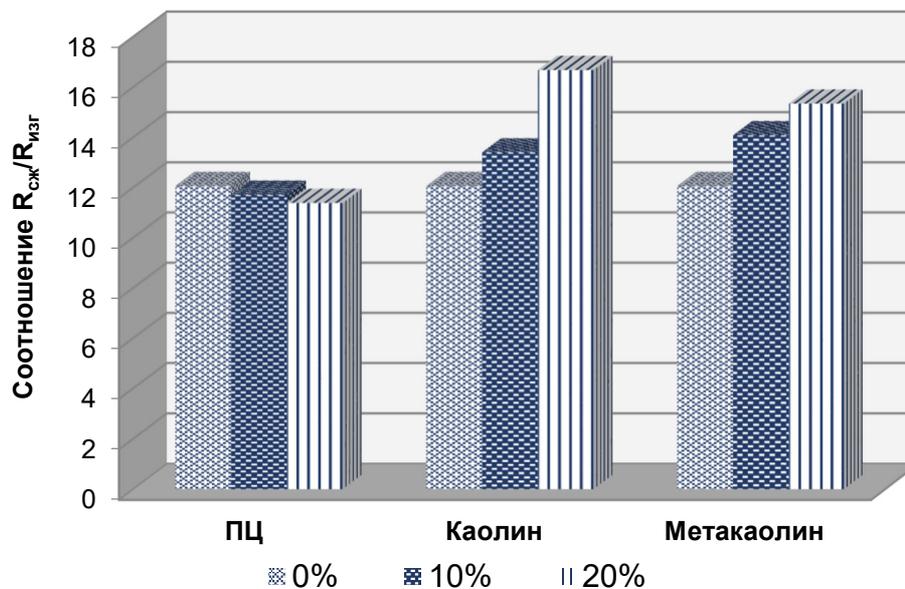


Рис. 10. Соотношения  $R_{сж}/R_{изг}$  для модифицированных геополимерных вяжущих в зависимости от концентрации и типа минерального модификатора: портландцемента (ПЦ), каолина и метакаолина

В свою очередь, аналогичный показатель для паст, модифицированных каолином и метакаолином, заметно растет при увеличении концентрации модификатора в вяжущей системе. Таким образом, использование ПЦ-модификатора в оптимальном диапазоне концентраций щелочи способствует снижению хрупкости твердеющего геополимерного каркаса. В свою очередь, использование добавок каолина и метакаолина, наоборот, способствуют повышению хрупкости геополимерного камня.

**Выводы.** Результаты анализа данных проведенного исследования показали, что введение используемых модифицирующих агентов не дало желаемого результата: повышение предела прочности при сжатии и изгибе, за исключением добавки портландцемента. Максимальное увеличение компрессионной прочности ( $\approx$  на 25 %) по сравнению с бездобавочной системой «зола-уноса – щелочной активатор» обеспечивается при концентрации щелочи – 9 % и содержании ПЦ – 20 %. Дальнейшее повышение концентрации этого модификатора экономически нецелесообразно. С другой стороны, введение модифицирующих компонентов в виде каолина и метакаолина негативно отражается на формировании прочности в выбранных условиях твердения.

Однако, достигаемая цель введения модификатора не сводится лишь к решению задачи повышения прочности вяжущего. Данные вяжущие системы рассматриваются с позиций поиска эффективности модификатора различной функциональности.

*Источник финансирования.* Исследования выполнены в рамках реализации нацпроекта

«Наука и университеты», научная тема «Создание лаборатории качества среды обитания человека и энергоэффективности городского хозяйства (FZRR-2022-0007)», рег. номер 1022072100016-6-2.1.3.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Chindaprasirt P., De Silva P., Sagoe-Crentsil K., Hanjitsuwan S. Effect of  $SiO_2$  and  $Al_2O_3$  on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems // Journal of Materials Science. 2012. Vol. 47. Pp. 4876–4883. DOI: 10.1007/s10853-012-6353-y.
- Barbosa V.F.F., MacKenzie K.J.D. Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate // Materials Research Bulletin. 2003. Vol.38(2). Pp. 319–331. DOI: 10.1016/S0025-5408(02)01022-X.
- Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Teslya A.Yu., Kozhukhova M.I., Yakovlev E.A. High temperature effect on structure formation and performance of hybrid geopolymers // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol.1353. № 012066. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012066.
- Christelle N.B., Herve T K., Daniel F., Rüscher C., Kamseu E., Leonelli C. Water resistance and thermal behavior of metakaolin-phosphate-based geopolymer cements // Journal of Asian Ceramic Societies. 2018. №6. DOI: 10.1080/21870764.2018.1507660.
- Papa E., Landi E., Miccio F., Medri V.  $K_2O$ -Metakaolin-Based Geopolymer Foams: Production, Porosity Characterization and Permeability Test //

Materials. 2022. Vol.15. №1008. DOI: 10.3390/ma15031008.

6. Tuntachon S., Kamwilaisak K., Somdee T., Mongkoltanaruk W., Sata V., Boonserm K., Wongs A., Chindaprasirt P. Resistance to algae and fungi formation of high calcium fly ash geopolymer paste containing  $TiO_2$  // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 25. № 100817. DOI:10.3390/ma15031008.

7. Vasilenko M.I., Lebedev M.S., Goncharova E.N., Kozhukhova N.I., Kozhukhova M.I. The study of ecological impact of fly ash-based geopolymer binders on soil and aquatic biota // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 791. № 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/791/1/012049.

8. Bakharev T. Resistance of Geopolymer Materials to Acid Attack // Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35. Pp. 658–670. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.06.005.

9. Lee W.-H., Cheng T.-W., Ding Y.-C., Lin K.-L., Huang C.-P. Geopolymer technology for the solidification of simulated ion exchange resins with radionuclides // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 235. Pp. 19–27. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.01.027.

10. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. 5<sup>th</sup> edition. Saint Quentin: Institut Géopolymère, 2020. 674 p.

11. Aliabdo A.A., Elmoaty A.E.M.A., Salem H.A. Effect of water addition, plasticizer and alkali

line solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 121. Pp. 694–703. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.062.

12. Pacheco-Torgal F., Castro-Gomes J., Jalali S. Tungsten mine waste geopolymeric binder: Preliminary hydration products investigations // Construction and Building Materials. 2009. Vol. 23(1). Pp. 200–209. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.01.003.

13. Graytee A., Sanjayan J.G., Nazari A. Development of a high strength fly ash based geopolymer in short time by using microwave curing // Ceramics International. 2018. Vol. 44. Pp. 8216–8222. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.02.001.

14. Elyamany H.E., Abd E.A.E.M., Elshaboury A.M. Setting time and 7-day strength of geopolymer mortar with various binders // Construction and Building Materials. 2018. Vol.187. Pp. 974–983. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.025.

15. Hardji D., Rangan B.V. Development and properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete by Research. Report GC1. Perth: Curtin University of Technology, 2005. 94 p.

16. Yuan J., He P., Jia D., Yang C., Yan S., Yang Z., Duan X.M., Wang S.J., Zhou Y. Effect of curing temperature and  $SiO_2/K_2O$  molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers // Ceramics International. 2016. Vol. 42. Pp. 16184–16190. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.07.139.

### Информация об авторах

**Кожухова Наталья Ивановна**, кандидат технических наук, доцент 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. Мл. научный сотрудник, Лаборатория качества среды обитания человека и энергоэффективности городского хозяйства Московский политехнический университет, 107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38.

**Буковцова Александра Игоревна**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и эксплуатации горно-металлургических комплексов. E-mail: 9507131581@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия, Белгородская обл., 309516, г. Старый Оскол, микрорайон им. Макаренко, д. 42.

**Плющенко Наталья Юрьевна**, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: natasha\_tgv@mail.ru. НИУ Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

**Жерновская Ирина Васильевна**, старший преподаватель, кафедра высшей математики. E-mail: ziv\_1111@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

---

Поступила 15.12.2023 г.

© Кожухова Н.И., Буковцова А.И., Плющенко Н.Ю., Жерновская И.В., 2024

<sup>1,2</sup>Kozhukhova N.I., <sup>3</sup>Bukovtsova A.I., <sup>4</sup>Plyushchenko N.Yu., <sup>1</sup>Zhernovskaya I.V.

<sup>1</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University

<sup>3</sup>Stary Oskol Technological Institute named after. A.A. Ugarov, branch of the National Research Technological University "MISiS"

<sup>4</sup>Moscow State University of Civil Engineering

## EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF GEOPOLYMER MODIFICATION WITH MINERAL FILLERS FROM THE POINT OF VIEW OF THE FORMATION OF STRENGTH CHARACTERISTICS

**Abstract.** Geopolymers, due to their positive features, can fully compete with traditional Portland cement analogues, and often have other valuable properties that can significantly expand the scope of application of mineral binders for construction purposes. This seems possible due to a wide range of raw materials of different origins, as well as a result of the use of modifying additives of different nature, morphology and, as a consequence, functionality. As part of this work, the effect of some formulation factors was studied: the concentration of the alkaline activator, as well as the type and content of the modifying agent on the strength characteristics of a geopolymer binder based on fly ash. The results of the study made it possible to establish that an increase in the concentration of the alkaline component negatively affects the effect of the modifier. Modification of the geopolymer binder with Portland cement in the NaOH concentration range from 9 to 13% leads to strengthening of the geopolymer system with an increase in its content. With a further increase in the concentration of the alkaline activator, it initiates a softening effect from the introduction of Portland cement. In turn, modification with kaolin and metakaolin leads to a decrease in compressive and bending strength characteristics throughout the entire range of alkali concentrations under consideration. Moreover, the higher the alkalinity of the geopolymer matrix, the more pronounced the softening effect takes place.

**Keywords:** geopolymer, fly ash, modifying agent, strength properties.

### REFERENCES

- Chindaprasirt P., De Silva P., Sagoe-Crentsil K., Hanjitsuwan S. Effect of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. *Journal of Materials Science*. 2012. Vol. 47. Pp. 4876–4883. DOI: 10.1007/s10853-012-6353-y.
- Barbosa V.F.F., MacKenzie K.J.D. Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate. *Materials Research Bulletin*. 2003. Vol. 38(2). Pp. 319–331. DOI: 10.1016/S0025-5408(02)01022-X.
- Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Teslya A.Yu., Kozhukhova M.I., Yakovlev E.A. High temperature effect on structure formation and performance of hybrid geopolymers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1353. No. 012066. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012066.
- Christelle N. B., Herve T. K., Daniel F., Rüscher C., Kamseu E., Leonelli C. Water resistance and thermal behavior of metakaolin-phosphate-based geopolymer cements. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2018. No. 6. DOI: 10.1080/21870764.2018.1507660.
- Papa E., Landi E., Miccio F., Medri, V. K<sub>2</sub>O-Metakaolin-Based Geopolymer Foams: Production, Porosity Characterization and Permeability Test. *Materials*. 2022. Vol. 15. No. 1008. DOI: 10.3390/ma15031008.
- Tuntachon S., Kamwilaisak K., Somdee T., Mongkoltanaruk W., Sata V., Boonserm K., Wongsa A., Chindaprasirt P. Resistance to algae and fungi formation of high calcium fly ash geopolymer paste containing TiO<sub>2</sub>. *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 25. No. 100817. DOI: 10.3390/ma15031008.
- Vasilenko M.I., Lebedev M.S., Goncharova E.N., Kozhukhova N.I., Kozhukhova M.I. The study of ecological impact of fly ash-based geopolymer binders on soil and aquatic biota. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 791. No. 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/791/1/012049.
- Bakharev, T. Resistance of Geopolymer Materials to Acid Attack. *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35. Pp. 658–670. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.06.005.
- Lee W.-H., Cheng T.-W., Ding Y.-C., Lin K.-L., Huang C.-P. Geopolymer technology for the solidification of simulated ion exchange resins with radionuclides. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 235. Pp. 19–27. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.06.005.
- Davidovits J. *Geopolymer Chemistry and Applications*. 5<sup>th</sup> edition. Saint Quentin: Institut Géopolymère, 2020. 674 p.
- Aliabdo A.A., Elmoaty A.E.M.A., Salem H.A. Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopoly-

mer concrete performance. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 121. No. 694e703. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.062.

12. Pacheco-Torgal F., Castro-Gomes J., Jalali S. Tungsten mine waste geopolymeric binder: Preliminary hydration products investigations. *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23(1). Pp. 200–209. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.01.003.

13. Graytee A., Sanjayan J.G., Nazari A. Development of a high strength fly ash based geopolymer in short time by using microwave curing. *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. Pp. 8216–8222. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.02.001.

14. Elyamany H.E., Abd E.A.E.M., Elshaboury A.M. Setting time and 7-day strength of geopolymer mortar with various binders. *Constr. Build. Master*. 2018. Vol. 187. Pp. 974–983. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.025.

15. Hardji D., Rangan B.V. Development and properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete by Research Report GC1. Perth: Curtin University of Technology, 2005. 94 p.

16. Yuan J., He P., Jia D., Yang C., Yan S., Yang Z., Duan X.M., Wang S.J., Zhou Y. Effect of curing temperature and  $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$  molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. Pp. 16184–16190. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.07.139.

#### *Information about the authors*

**Kozhukhova, Natalia I.** PhD, Assistant professor. Department of Material Science and Material Technology. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46. Junior research worker, Laboratory of human environment quality and urban energy efficiency Moscow Polytechnic University, 107023, Moscow, Bolshaya Semyonovskaya St., 38

**Bukovtsova, Alexandra I.** PhD, Assistant professor. Department of construction and operation of mining and metallurgical complexes. E-mail: 9507131581@mail.ru. Stary Oskol Technological Institute named after. A.A. Ugarov, branch of the National Research Technological University "MISIS", Russia, Belgorod region, 309516, Stary Oskol, Makarenko microdistrict, 42.

**Plyushchenko, Natalya Yu.** Senior lecturer. Department of heat and gas supply and ventilation. E-mail: natasha\_tgv@mail.ru. Moscow State University of Civil Engineering, Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26

**Zhernovskaya, Irina V.** Senior lecturer, Department of Advanced Mathematics. E-mail: ziv\_1111@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46

---

*Received 15.12.2023*

#### **Для цитирования:**

Кожухова Н.И., Буковцова А.И., Плющенко Н.Ю., Жерновская И.В. Оценка эффективности модификации геополимерной системы минеральными наполнителями с точки зрения формирования прочностных характеристик // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №1. С. 8–20. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-8-20

#### **For citation:**

Kozhukhova N.I., Bukovtsova A.I., Plyushchenko N.Yu., Zhernovskaya I.V. Evaluation of the effectiveness of geopolymer modification with mineral fillers from the point of view of the formation of strength characteristics. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 1. Pp. 8–20. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-8-20