

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.545

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.427-437

Оптимизация пропорций композиционного вяжущего с комплексными добавками

Нгуен Зоан Тунг Лам¹, Светлана Васильевна Самченко¹, Танг Ван Лам²,
Виктория Андреевна Щецова¹

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИИ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Ханойский горно-геологический университет; г. Ханой, Вьетнам

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема повышения прочности и долговечности портландцементного камня актуальна. Для улучшения свойств цементного вяжущего на этапе изготовления цементных композитов могут быть использованы тонкодисперсные добавки неорганического происхождения, которые оказывают влияние на процессы гидратации и твердения бетона. Введение тонкодисперсных добавок-наполнителей минерального и неорганического происхождения позволяет уплотнить структуру цементного камня (ЦК), а следовательно, и самого бетона за счет значительного снижения пористости, повысить его прочность, непроницаемость и морозостойкость, уменьшить усадку. Кроме того, это дает возможность экономить клинкер, увеличивает водоудерживающую способность бетонных смесей, препятствуя их расслоению при совместном использовании с суперпластификаторами.

Материалы и методы. Изучено влияние составов вяжущего на механические свойства композиционного вяжущего с помощью планирования экспериментов Бокса – Уилсона. Прочность на сжатие ЦК в возрасте 7 и 28 суток определялась в соответствии с методом обработки результатов по ГОСТ 30744–2001. Исследование проведено в лаборатории кафедры строительного материаловедения МГСУ.

Результаты. Полученные результаты представлены в виде поверхности уравнения регрессии второго уровня, описывающей зависимость прочности ЦК на сжатие от содержания комплексной расширяющей и пуццолановой добавки. В результате проведенных экспериментов получен оптимальный состав смеси с использованием комплексных добавок.

Выводы. Основываясь на результатах исследования, авторы продолжают изучение свойств вяжущих материалов на основе комплексной расширяющей и пуццолановой добавки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композиционная добавка, прочность на сжатие, цементный камень, оптимизация, планирование экспериментов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лам Н.З.Т., Самченко С.В., Лам Т.В., Щецова В.А. Оптимизация пропорций композиционного вяжущего с комплексными добавками // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 427–437. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.427-437

Автор, ответственный за переписку: Нгуен Зоан Тунг Лам, nguyendoantunglam1110@gmail.com.

Optimization of proportions of a composite binder that has multi-component additives

Nguyen Doan Tung Lam¹, Svetlana V. Samchenko¹, Tang Van Lam²,
Victoria A. Shvetsova¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Hanoi University of Mining and Geology; Hanoi, Vietnam

ABSTRACT

Introduction. The problem of increasing the strength and durability of Portland cement stone is not new, but it is still highly relevant. To improve the properties of the cement binder at the stage of manufacturing cement composites, finely dispersed additives of inorganic origin can be used. They affect processes of hydration and curing of concrete. Finely dispersed additives, being fillers of mineral and inorganic origin, compact the structure of the cement stone, and, consequently, concrete itself due to substantial porosity reduction. They also increase its strength, impermeability and frost resistance and reduce shrinkage. Besides, these additives allow saving clinker and improve the water-retaining capacity of concrete mixes, preventing their segregation, if used together with superplasticizers.

Materials and methods. The effect of binder compositions on mechanical properties of a composite binder was studied using the Box-Wilson experimental design method. The compressive strength of cement stone was determined at the age of 7 and 28 days using the method of result processing according to GOST 30744–2001. The study was conducted at the laboratory of Department of Building Materials Engineering of Moscow State University of Civil Engineering.

Results. The results are presented as the surface of the second level regression equation, describing the dependence of compressive strength of the cement stone on the composition of multi-component expanding and pozzolanic additives. The optimal composition of the mix, having multi-component additives, was obtained as a result of the experiments.

Conclusions. In the future the authors will contribute the results of this study to their research into the properties of binders, containing multi-component expanding and pozzolanic additives.

KEYWORDS: composite additive, compressive strength, cement stone, optimization, planning of experiments

FOR CITATION: Lam N.D.T., Samchenko S.V., Lam T.V., Shvetsova V.A. Optimization of proportions of a composite binder that has multi-component additives. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):427-437. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.427-437 (rus.).

Corresponding author: Nguyen Doan Tung Lam, nguyendoantunglam1110@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме повышения прочности и долговечности портландцементного камня по-прежнему уделяется достаточно много внимания [1]. Портландцемент (ПЦ) на протяжении более 200 лет является основным строительным материалом, из которого изготавливается широкая номенклатура строительных материалов и изделий [2–4]. Сегодня цементная промышленность в мире выпускает разнообразных цементы: сульфатостойкий, тампонажный, напрягающий, кислотоупорный, гидрофобный, глиноземистый и другие, выбираемые для применения с учетом будущих условий эксплуатации бетонных композитов [5, 6].

Проведение мероприятий с целью повышения прочности цемента возможно как на стадии его производства, так и в процессе применения. Одним из широко используемых в настоящее время приемов для достижения этой цели является применение различных добавок, влияющих на процессы размывания клинкера, а также на гидратацию и твердение цемента. Для этого обычно используют такие тонкодисперсные минеральные добавки, как трепел, доменные шлаки различного состава, золу уноса, природный гипс, микрокремнезем, метакеолин и др. Эти добавки не растворяются в воде, они — часть твердой фазы цементного камня (ЦК) и бетона [7–10].

Минеральные добавки делятся на химически активные и инертные. Активные добавки, состоящие в основном из аморфного SiO_2 , способны взаимодействовать со свободным гидроксидом кальция с образованием малорастворимых низкоосновных гидросиликатов кальция во влажной среде или обладают способностью к самостоятельному твердению даже при нормальной температуре. Поэтому их используют для управления процессами структурообразования ЦК и твердеющего бетона [11–16].

Однако данные породы, помимо кремнезема, также могут содержать цеолиты, кварц, известняк, компоненты в виде слюд и т.д., а следовательно, «активность» этих пород в цементах может быть комплексной [17–19]. Так, продукты реакций минералов портландцементного клинкера с диатомитом, трепелом и опокой зависят от состава последних. Глинистые материалы интенсивно взаимодей-

ствуют с гидроксидом кальция с образованием гидроалюмосиликатов кальция [20, 21]. Известняк реагирует с трехкальциевым алюминатом с образованием карбоалюминатов кальция, что оказывает регулирующее воздействие на схватывание цемента и скорость реакций гидратации алита и белита [22, 23]. Активность цеолитов по отношению к ПЦ имеет более сложный характер. В результате реакции разрушается цеолитовая структура, а кремнезем и глинозем связывают гидроксид кальция, образуя гидросиликаты и гидроалюмосиликаты кальция [24, 25].

Благодаря использованию местных осадочных горных пород (диатомит, трепел, опока) можно не только расширить минерально-сырьевую базу при производстве ПЦ, но отойти от классического понимания об активных минеральных добавках, которые ассоциируются с добавками с максимальным содержанием аморфного кремнезема.

Введение тонкодисперсных добавок-наполнителей органического и неорганического происхождения позволяет уплотнить структуру ЦК и бетона, что позволит повысить его плотность, прочностные характеристики и морозостойкость, а также снизить проницаемость и усадку. Кроме того, добавки дают возможность экономить клинкер и увеличивают водоудерживающую способность бетонных смесей, препятствуя их расслоению при совместном использовании с суперпластификаторами [26–28].

В данной работе проведена оптимизация состава композиционного вяжущего с неорганическими добавками природного происхождения при помощи ортогонального центрального планирования второго порядка Бокса – Уилсона, а также исследовано влияние природного гипса второго сорта и трепела Хотынецкого месторождения на прочность при сжатии ЦК.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

1. Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (М500 Д0) с истинной плотностью 3,208 г/см³.

2. Глиноземистый цемент (ГЦ) 40 (SRB 400, Secar, Франция по ГОСТ 969–91) с истинной плотностью 3,196 г/см³. Характеристики использованных цементов приведены в табл. 1.

Табл. 1. Физико-механические характеристики цементов

Table 1. Physico-mechanical characteristics of cements

Вид цемента Type of cement	Удельная поверхность, см ² /г Specific surface area, cm ² /g	Нормальная густота, % Standard consistency, %	Сроки схватывания, мин Setting time, min		Предел прочности на 3 сут, МПа Maximum compressive strength on the 3rd day, MPa	Предел прочности на 28 сут, МПа Maximum compressive strength on the 28th day, MPa
			Начало Beginning	Конец End		
Портландцемент Portland cement	3655	26,50	140	250	–	51,27
Глиноземистый цемент Aluminous cement	3470	27,00	65	280	41,31	43,36

3. Природный гипс (Г) второго сорта в соответствии с ГОСТ 401–2019 (содержание $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ равняется 93,20 %) с истинной плотностью 2,316 г/см³.

4. Трепел (Тр) Хотынецкого месторождения с истинной плотностью 2,395 г/см³.

5. Вода для смешивания бетона соответствует нормативным требованиям ГОСТ 23732–2011.

Методы

Нормальная густота и сроки схватывания цементов определялись в соответствии с ГОСТ 310.3–76.

Активность портландцемента и истинная плотность определялись по ГОСТ 30744–2001.

Активность глиноземистого цемента была определена в соответствии с методикой, приведенной в ГОСТ 969–2019.

Удельная поверхность установлена на приборе ПСХ согласно ГОСТ 21043–87.

Для определения прочности на 7 и 28 сут были приготовлены образцы-кубики размерами $2 \times 2 \times 2$ см при водоцементном отношении, равном 0,4. Образцы до проведения испытаний твердели в нормальных условиях ($t = 20 \pm 2$ °С, $\phi = 95$ %) в камере нормального твердения CURACEM 65-L0013/D. Прочность образцов была определена с использованием гидравлического пресса CONTROLS MCC8 50-C8422 в лаборатории кафедры строительного материаловедения НИУ МГСУ. Для сравнения установлена прочность контрольных образцов, изготовленных и испытанных по аналогичной методике из бездобавочного цемента.

Табл. 2. Диапазон переменных влияющих факторов

Table 2. Values and ranges of factors of influence

Факторы / Factors		Уровни варьирования факторов / Factors variation level				
В качестве переменных As variables	В натуральном виде As components	–1,215	–1	0	+1	+1,215
x_1	% ГЦ / % AC	9,57	10	12	14	14,43
x_2	% Г / % G	6,96	7,5	10	12,5	13,04
x_3	% Тр / % Tr	11,14	12	16	20	20,86

В этом исследовании для разработки смеси используется метод проектирования Бокса – Уилсона. Затем уравнение регрессии второго уровня вычисляется по формуле [29–32]:

$$y = b_o + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \sum_{j=1}^n b_{jj} x_j^2 + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1, j \neq u}^n b_{ju} x_j x_u, \quad (1)$$

где x_j — факторы; x_j, x_u — взаимодействие между факторами; b_o, b_j и b_{ju} — коэффициенты регрессии; n — число факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для нахождения оптимального состава добавок композиционного вяжущего был применен ортогональный центрально-композиционный план второго порядка при трех факторах. В этом исследовании авторы изучают влияние содержания добавок на прочность ЦК через 7 и 28 сут твердения. Входные факторы, влияющие на механические свойства ЦК (табл. 2):

- x_1 — содержание ГЦ от 9,57 до 14,43 %;
 - x_2 — содержание Г от 6,96 до 13,04 %;
 - x_3 — содержание Тр от 11,14 до 20,86 %;
- % ПЦ + % ГЦ + % Г + % Тр = 100 %.

Количество испытаний N определяется по формуле:

$$N = 2^n + 2n + m = 2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 15, \quad (2)$$

где $m = 1$ — количество экспериментов в центре (для оценки функции отклика делали 3 дополнительные попытки в центре плана, не учтенные в общих формулах (1) и (2), $k = 4$); $n = 3$ — количество входов.

После кодирования переменных были проведены соответствующие эксперименты.

Результаты экспериментов представлены в табл. 3–6.

Коэффициент уравнения регрессии рассчитывается по формуле [29–32]:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2} \quad \forall j = \overline{1...n},$$

$$b_{ju} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} x_{ui} y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2 x_{ui}^2} \quad \forall j, u = \overline{1...n}; j \neq u, \quad (3)$$

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - b_{11} \overline{x_1^2} - \dots - b_{nn} \overline{x_n^2}.$$

Результаты расчета представлены в табл. 4.

В результате были получены следующие уравнения регрессии:

$$y_1 = 40,569 - 0,844x_1 - 1,059x_2 - 2,681x_3 - 0,113x_1x_2 + 0,098x_1x_3 + 1,555x_2x_3 + 0,472x_1x_2x_3 - 0,550x_1^2 - 0,495x_2^2 + 0,530x_3^2; \quad (4)$$

$$y_2 = 52,650 - 0,200x_1 - 2,550x_2 - 1,265x_3 + 0,846x_1x_2 - 0,004x_1x_3 + 0,404x_2x_3 + 1,086x_1x_2x_3 - 0,637x_1^2 - 0,885x_2^2 - 3,051x_3^2. \quad (5)$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии (4) и (5) была проверена при помощи критерия Стьюдента

Коэффициент t_{bj} считается существенным, если $|t_{bj}| \geq t_p(v_2)$.

Согласно работе [33], в табл. 3.2: $t_p(v_2) = 3,1824$ ($p = 0,05$, $v_2 = k - 1 = 4 - 1 = 3$ число степеней свободы).

Значение t_{bj} было определено по формуле [29–32]:

$$t_{bj} = \frac{|b_j|}{S_{bj}}. \quad (6)$$

Значение дисперсии коэффициентов регрессии S_{bj} было рассчитано по формуле (7) [29–32]:

Табл. 3. Соотношение добавок в вяжущем, кодированные значения и полученные результаты по методу ортогонального централизованного планирования второго порядка

Table 3. Ratios of additives in the binder, coded values and results obtained according to the second-order orthogonal centralized planning method

Точки плана ПФЭ ² Points of the plan of a complete factorial experiment ²	В натуральном виде Real variable			В качестве переменных Variable coding			Функции отклика и результаты испытаний Response functions and test results	
	% ГЦ % AC	% Г % G	% Тр % Tr	x_1	x_2	x_3	y_1 — прочность ЦК через 7 сут, МПа y_1 — strength of cement stone at 7 days, MPa	y_2 — прочность ЦК через 28 сут, МПа y_2 — strength of cement stone at 28 days, MPa
Ядро плана The core of the plan	10	7,5	12	−1	−1	−1	45,86	52,11
	14	7,5	12	+1	−1	−1	44,69	51,72
	10	12,5	12	−1	+1	−1	42,33	48,78
	14	12,5	12	+1	+1	−1	38,82	47,43
	10	7,5	20	−1	−1	+1	37,80	49,85
	14	7,5	20	+1	−1	+1	35,13	45,10
	10	12,5	20	−1	+1	+1	38,60	43,79
	14	12,5	20	+1	+1	+1	37,37	46,77
Звездные точки Star (axial) points	9,57	10	16	−1,215	0	0	39,95	50,82
	14,43	10	16	1,215	0	0	39,40	51,91
	12	6,96	16	0	−1,215	0	41,91	57,55
	12	13,04	16	0	1,215	0	37,60	44,45
	12	10	11,14	0	0	−1,215	43,97	47,52
	12	10	20,86	0	0	1,215	38,57	48,08
Точки в центре плана Plan center points	12	10	16	0	0	0	40,90	53,79
	12	10	16	0	0	0	40,63	51,63
	12	10	16	0	0	0	41,50	53,59
	12	10	16	0	0	0	40,53	53,94

Табл. 4. Коэффициенты уравнения регрессии

Table 4. Coefficient of the regression equation

y_j		b_j										
		b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
y_1	$R_{сж}^{7, МПа}$ $R_{сж}^{7, МПа}$	40,569	–0,844	–1,059	–2,681	–0,113	0,098	1,555	0,472	–0,550	–0,495	0,530
y_2	$R_{сж}^{28, МПа}$ $R_{сж}^{28, МПа}$	52,650	–0,200	–2,550	–1,265	0,846	–0,004	0,404	1,086	–0,637	–0,885	–3,051

$$S_{bj} = \sqrt{\frac{S_{ll}^2}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}}, \quad (7)$$

где S_{ll}^2 — остаточная дисперсия на одну степень свободы [29–32].

$$S_{ll}^2 = \frac{\sum_{c=1}^k (y_{0c} - \bar{y}_0)^2}{k-1}; \quad (8)$$

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{k} \sum_{c=1}^k y_{0c}, \quad (9)$$

где k — количество повторных экспериментов в центре; y_{0c} — полученное значение c -го эксперимента в центре; $\bar{y}_0$ — среднее значение k экспериментов в центре.

Для уравнения регрессии (4):

$$\sum_{c=1}^4 (y_{01c} - \bar{y}_{01})^2 = 0,5694 \Rightarrow S_{ll}^2 = \frac{0,5694}{4-1} = 0,1898.$$

Значения критерия проверки, коэффициенты уравнения регрессии приведены в табл. 5.

После проверки коэффициентов несущественные коэффициенты отбрасывались. Таким образом, из уравнения (4) было получено уравнение (10):

$$y_1 = 40,569 - 0,844x_1 - 1,059x_2 - 2,681x_3 + 1,555x_2x_3. \quad (10)$$

Для уравнения регрессии (5):

$$\sum_{c=1}^4 (y_{02c} - \bar{y}_{02})^2 = 3,5071 \rightarrow S_{ll}^2 = \frac{3,5071}{4-1} = 1,1690.$$

Значения критерия проверки, коэффициенты уравнения регрессии приведены в табл. 6.

После проверки коэффициентов несущественные коэффициенты отбрасывались. Таким образом, из уравнения (5) было получено уравнение (11):

$$y_2 = 52,650 - 2,550x_2 - 1,265x_3 - 3,051x_3^2. \quad (11)$$

Проверка адекватности модели

Проверка адекватности модели выполнена при помощи критерия Фишера по формулам $F_{\text{рас}}$ (12) и S_{2d} (13) [31]:

$$F_{\text{рас}} = \frac{S_d^2}{S_{ll}^2}; \quad (12)$$

$$S_{2d}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N-g}, \quad (13)$$

где S_d^2 — значение дисперсии; S_{ll}^2 — остаточная дисперсия на одну степень свободы; y_i — значение

Табл. 5. Значения критерия проверки, коэффициенты уравнения регрессии (4)

Table 5. Student coefficients for checking regression equation (4)

b_j	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
b_j	40,569	–0,844	–1,059	–2,681	–0,113	0,098	1,555	0,472	–0,550	–0,495	0,530
$ b_j $	40,569	0,844	1,059	2,681	0,113	0,098	1,555	0,472	0,550	0,495	0,530
S_{bj}	0,2868	0,1316	0,1316	0,1316	0,1540	0,1540	0,1540	0,1540	0,2086	0,2086	0,2086
t_{bj}	141,443	–6,414	–8,043	–20,364	–0,730	0,633	10,095	3,068	–2,634	–2,375	2,541

Табл. 6. Значения критерия проверки, коэффициенты уравнения регрессии (5)

Table 6. Student coefficients for checking regression equation (5)

b_j	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
b_j	52,650	–0,200	–2,550	–1,265	0,846	–0,004	0,404	1,086	–0,637	–0,885	–3,051
$ b_j $	52,650	0,200	2,550	1,265	0,846	0,004	0,404	1,086	0,637	0,885	3,051
S_{bj}	0,7118	0,3267	0,3267	0,3267	0,3823	0,3823	0,3823	0,3823	0,5178	0,5178	0,5178
t_{bj}	73,964	–0,611	–7,805	–3,871	2,214	–0,010	1,056	2,842	–1,231	–1,708	–5,892

i -го эксперимента; $\hat{y}_i$ — значение функции, полученное в соответствии с экспериментом i ; g — количество коэффициентов регрессии.

Соответствующее табличное значение критерия Фишера $F_p(v_1, v_2)$ было найдено по табл. 3.5 [33] (процентные точки F -распределения) при уровне значимости $p = 0,05$.

Для уравнения регрессии (10):

$$\sum_{i=1}^{15} (y_{1i} - \hat{y}_{1i})^2 = 12,393 \rightarrow S_{1d}^2 = \frac{12,393}{15-5} = 1,2393;$$

$$S_{1ll}^2 = 0,1898 \Rightarrow F_{\text{рас}} = \frac{S_{1d}^2}{S_{1ll}^2} = \frac{1,2393}{0,1898} = 6,5295 < F_{0,05}(10; 3) = 8,767.$$

Для уравнения регрессии (11):

$$\sum_{i=1}^{15} (y_{2i} - \hat{y}_{2i})^2 = 86,364 \rightarrow S_{2d}^2 = \frac{86,364}{15-4} = 7,8513;$$

$$S_{2ll}^2 = 1,1690 \Rightarrow F_{\text{рас}} = \frac{S_{2d}^2}{S_{2ll}^2} = \frac{7,8512}{1,1690} = 6,7162 < F_{0,05}(11; 3) = 8,733.$$

Поэтому уравнения (10) и (11) удовлетворяют условию $F_{\text{рас}} < F_{\text{таб}}$.

С помощью компьютерной программы получены изображения поверхности выражения целевой функции для уравнений регрессии (10) и (11), которые представлены на рис. 1, 2.

Анализируя уравнение регрессии (11), замечено, что ГЦ не оказывает влияния на прочность при сжатии на 28 сут твердения. Это может быть объяснено

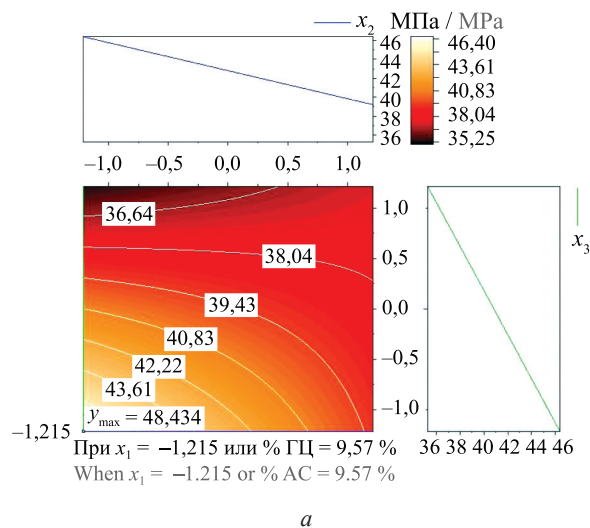
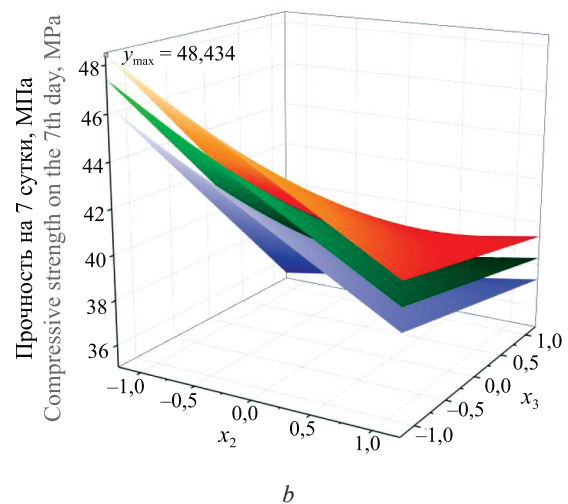


Рис. 1. Поверхность уравнения регрессии (10)

Fig. 1. Second-order surface equation (10)

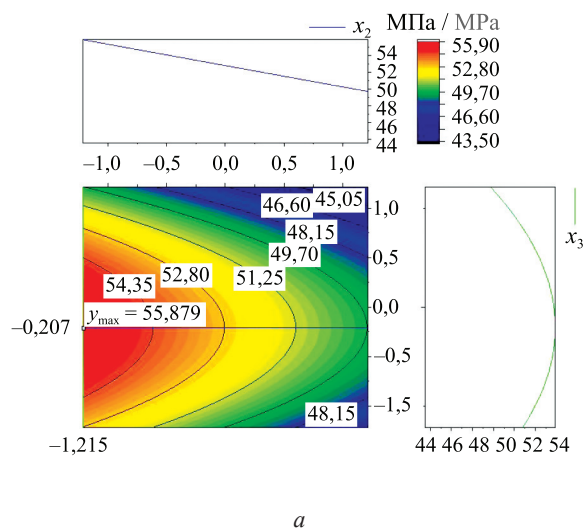
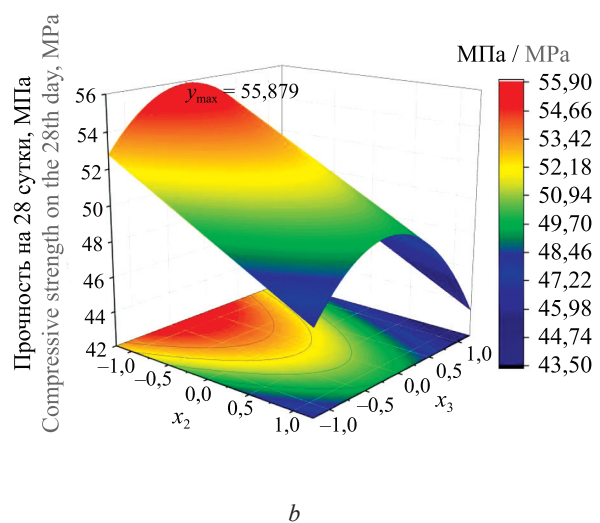


Рис. 2. Поверхность уравнения регрессии (11)

Fig. 2. Surface of the second-order equation (11)

ускоренным процессом твердения ГЦ: он набирает марочную прочность уже на 3 сут твердения. Взаимодействия с другими факторами и квадратичный член для природного гипса отсутствуют. Из этого следует, что зависимость прочности ЦК на 28 сут твердения от количества природного гипса является линейной. При снижении количества гипса в составе вяжущего увеличивается прочность ЦК на 28 сут. Максимальное значение предела прочности при сжатии было достигнуто при количестве гипса, равном около 7 % от массы вяжущего. Если проанализировать полученную функцию относительно количества трепела в составе вяжущего x_3 , то получим уравнение: $y = 55,75 - 1,265x^3 - 3,051x^2$ ($x_2 = -1,215$ для y_{1max}). Зависимость прочности ЦК на 28 сут твердения от количества трепела является квадратичной. Такая функция имеет экстремум в точке $x_3 = -1,265 / (2 \cdot (-3,051)) = -0,207$. Это соответствует количеству трепела, равному 15,17 % от массы композиционного вяжущего. Это значение оптимально с точки зрения связывания гидроксида кальция в низкоосновные гидросиликаты кальция в ходе пуццолановой реакции. Если трепела недостаточно, то часть $\text{Ca}(\text{OH})_2$ остается несвязанной; если избыточное количество, то часть трепела, не вступившего в реакцию, выступает в роли микронаполнителя и приводит к снижению прочности ЦК из-за замены части портландцемента при введении трепела в композиционное вяжущее. Оптимальный состав для получения ЦК максимальной прочности при сжатии на 28 сут твердения представлен в табл. 7.

Анализируя уравнение регрессии (10), отмечено, что для ГЦ (x_1) функция обратно пропорциональная. Возможно, это связано с явлением перекристаллизации метастабильных гидроалюминатов кальция в стабильный трехкальцевый гидроалюминат на 7 сут твердения. Поэтому ЦК с максимальной прочностью на 7 сут твердения был получен при минимальном количестве ГЦ, равном 9,57 % от массы вяжущего. Как было сказано ранее, пик набора прочности глиноземистого цемента приходится на 3 сут твердения. В созданной структуре ЦК образование гидросиликатов кальция (в ходе гидратации портландцемента) приводит к появлению внутренних напряжений и, как следствие, повышению пористости и снижению прочности цементного камня.

Коэффициент взаимодействия факторов x_2 и x_3 имеет положительный знак, что говорит о возможности увеличения предела прочности при сжатии образцов ЦК на 7 сут твердения в том случае, если коэффициенты при x_2 и x_3 будут иметь одинаковые знаки. Коэффициенты при линейных членах x_2 и x_3 являются отрицательными. Максимальная прочность на 7 сут может быть достигнута при минимальных значениях факторов $x_2 = x_3 = -1,215$. Влияние гипса было объяснено выше. Портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образовавшийся в ходе реакции гидратации портландцемента, участвовал в реакциях образования эттрингита и гиббсита. Таким образом, на 7 сут твердения оказалось недостаточно количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$, способного вступить в пуццолановую реакцию с трепелом. Также причиной снижения прочности может быть происхождение трепела. Трепел является горной породой с развитой поверхностью и высокой пористостью. Оптимальный состав для получения ЦК максимальной прочности при сжатии на 7 сут твердения представлен в табл. 7.

Результаты исследуемых оптимальных цементов и их сравнение с бездобавочным портландцементом показаны на рис. 3.



Рис. 3. Кинетика твердения цементного камня оптимальных составов

Fig. 3. Hardening kinetics of the cement stone that has optimal compositions

Из рис. 3 видно, что значение прочности на сжатие состава 2 приблизительно равно значению прочности бездобавочного цемента на 28 сут твердения,

Табл. 7. Оптимальные значения прочности цементного камня на 7 и 28 сут

Table 7. Optimal values of cement stone strength on the 7th and 28th days

Состав Composition	% ГЦ % CA	% Г % G	% Тр % Tr	Кодированное значение фактора Coded factor value		
				x_1	x_2	x_3
$y_{1max} = 48,4$ МПа (Состав 1) $y_{1max} = 48.4$ МПа (Composition 1)	9,57	6,96	11,14	-1,215	-1,215	-1,215
$y_{2max} = 55,8$ МПа (Состав 2) $y_{2max} = 55.8$ МПа (Composition 2)	9,57	6,96	15,17	-1,215	-1,215	-0,207

хотя содержание добавок равно 31,70 % от массы вяжущего. Следовательно, оптимальным составом композиционного вяжущего является состав 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа данных, полученных в ходе эксперимента, можно сделать следующие выводы:

- используя алгоритм экспериментального планирования, найдены уравнения регрессии, описывающие взаимосвязь между целевыми функциями: прочность на сжатие ЦК на 7 и 28 сут твердения;

- полученные уравнения регрессии второго порядка (10) и (11) описывают зависимости прочности при сжатии от содержания добавок в композиционном вяжущем;

- с помощью компьютерных программ получены изображения поверхностей уравнений (10) и (11), представленных на рис. 1, 2;

- оптимальный состав вяжущей смеси с максимальной прочностью на сжатие на 7 и 28 сут твердения приведен в табл. 7.

Представленное исследование входит в цикл работ авторов по изучению свойств композиционного вяжущего, содержащего в своем составе трепел, природный гипс, глиноземистый цемент и портландцемент.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Булгаков Б.И., Танг В.Л., Александрова О.А. Влияние наноразмерных частиц сажи на прочность цементного камня в раннем возрасте // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 18–22. DOI: 10.12737/22441

2. Кривобородов Ю.Р., Самченко С.В. Цементные минералы и их твердые растворы : монография. М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2020. 175 с.

3. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Бикбаев Р.Р., Пиксайкина А.А. Исследование свойств портландцементов с активной минеральной добавкой на основе трепела // Вестник ПГТУ. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 3. С. 7–17. DOI: 10.25686/2542-114X.2019.3.7

4. Hewlett P., Liska M. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Elsevier, 2019. 800 p.

5. Kurdowski W. Cement and concrete chemistry. Springer Dordrecht, 2014. 700 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7945-7

6. Родин А.И. Разработка биоцидных цементов и композитов на их основе : дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2013. 205 с.

7. Баженов Ю.М., Нгуен Динь Чинь, Нгуен Тхе Винь. Высокопрочные бетоны с комплексным применением золы рисовой шелухи, золы-уноса и суперпластификаторов // Вестник МГСУ. 2012. № 1. С. 77–82. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.1.77-82

8. Стельмах С.А., Щербань Е.М., Коробкин А.П., Налимова А.В., Серебряная И.А., Нажуев М.П. Разработка состава композиционного портландцемента на основе золошлаковой смеси Новочеркасской ГРЭС // Вестник СевКавГТИ. 2017. № 3 (30). С. 148–153.

9. Senhadji Y., Escadeillas G., Mouli M., Khelafi H., Benosman A. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar // Powder Technology. 2014. Vol. 254. Pp. 314–323. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.01.046

10. Потрясова Е.В., Жучков Е.А., Ахматов М.К., Фомина Н.Н. Влияние техногенной минеральной добавки на свойства цементных композиций // Строительство — формирование среды жизнедеятельности : сб. мат. семинара молодых ученых XXIV Междунар. науч. конф. 2021. С. 55–60.

11. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М. : Изд-во АСВ, 2006. 368 с.

12. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Федорцов В.А. Повышение коррозионной стойкости цементных композитов активными добавками // Строительство и реконструкция. 2020. № 2. С. 51–60. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-51-60

13. Алексакин С.В., Булгаков Б.И. Мелкозернистый бетон для гидротехнического строительства, модифицированный комплексной органоминеральной добавкой // Вестник МГСУ. 2013. № 8. С. 97–103. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.8.97-103

14. Танг Ван Лам, Нгуен Зоан Тунг Лам. Пуццоланическая активность тонкодисперсных минеральных компонентов различной природы Вьетнама // Техника и технология силикатов. 2021. Т. 28. № 1. С. 7–12.

15. Трунов П.В. Композиционные вяжущие с использованием вулканогенно-осадочных пород Камчатки и мелкозернистые бетоны на их основе : дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2014. 161 с.

16. Ерофеев В.Т., Баженов Ю.М., Балатханова Э.М., Митина Е.А., Емельянов Д.В., Родин А.И. и др. Получение и физико-механические свойства цементных композитов с применением наполнителей и воды затворения месторождений Чеченской Республики // Вестник МГСУ. 2014. № 12. С. 141–151. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.12.141-151

17. Ерофеев В.Т., Калашников В.И., Смирнов В.Ф., Карпушин С.Н., Родин А.И., Красноглазов А.М. и др. Стойкость цементных композитов на биоцидном портландцементе с активной минеральной добавкой в условиях воздействия модельной

среды бактерий // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 1. С. 11–17.

18. Овчаренко Г.И., Викторов А.В., Садрашва А.О. Влияние вида тонкоизмельченных минеральных добавок на прочность цементного камня. Часть 2 // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 1 (673). С. 28–31.

19. Рахимов Р.З., Камалова З.А., Ермилова Е.Ю., Стоянов О.В. Термически обработанный трепел как активная минеральная добавка в цемент // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 13. С. 99–101.

20. Samchenko S., Larsen O., Gurkin A. The effect of dispersion of limestone on the properties of cement mortar // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Pp. 2068–2071. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.076

21. Zunino F., Scrivener K. The reaction between metakaolin and limestone and its effect in porosity refinement and mechanical properties // Cement and Concrete Research. 2021. Vol. 140. P. 106307. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106307

22. Millán Corrales G., González López J.R., Palomab A., Fernandez Jiménez A. Replacing fly ash with limestone dust in hybrid cements // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 243. P. 118169. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118169

23. Hay R., Li L., Celik K. Shrinkage, hydration, and strength development of limestone calcined clay cement (LC3) with different sulfation levels // Cement and Concrete Composites. 2022. Vol. 127. P. 104403. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104403

24. Zhang X., Wang B., Chang J. Variation in mineral composition by hydration and carbonation in calcium hydroxide matrix containing zeolite // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 56. P. 104491. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104491

25. Chenarboni H.A., Lajevardi S.H., MolaAbasi H., Zeighami E. The effect of zeolite and cement stabi-

lization on the mechanical behavior of expansive soils // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 272. P. 121630. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121630

26. Воронин В.В. Эффективные добавки для вяжущих веществ и бетонов // Научные достижения в исследованиях о новых современных строительных материалах : совместный Междунар. науч. симпозиум. Ханой, 2006. С. 98–105.

27. Wang Q., Xiong Z., He J., Lai M., Ho J. Effective solution for improving rheological properties of cement paste containing zeolite // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 351. P. 128780. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128780

28. Wang Q., Zhang J., Ho J.C.M. Zeolite to improve strength-shrinkage performance of high-strength engineered cementitious composite // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 234. P. 117335. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117335

29. Ву Ким Зиен, Баженова С.И., До Минь Чиен, Хоанг Минь Тхуан, Нгуен Ван Зыонг, Нгуен Зоан Тунг Лам. Оптимизация пропорций смеси пенобетона с использованием плана экспериментов Бокса-Уилсона // Инженерный вестник Дона. 2021. № 5. С. 606–620.

30. Хартман К., Лецкий Э.К., Шефер В., Лецкая Н.С., Фомин Г.А. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М. : Мир, 1977. 552 с.

31. Nguyễn Minh Tuyền. Quy hoạch thực nghiệm. Hà Nội : NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2007. 264 tr. (Нгуен Минь Туен. Планирование эксперимента. Ханой : Изд-во Наука и Технологии. 2007. 264 с.).

32. Александрова О.В., Мацевич Т.А., Кирьянова Л.В., Соловьев В.Г. Статистические методы решения технологических задач : учебное пособие. М. : Изд-во МГСУ. 2017. 153 с.

33. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М. : Наука, 1983. 416 с.

Поступила в редакцию 19 декабря 2022 г.

Принята в доработанном виде 22 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Нгуен Зоан Тунг Лам — аспирант кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 5706-4917, ResearcherID: HGU-5702-2022, ORCID: 0000-0001-9061-8426; nguyendoantunglam1110@gmail.com;

Светлана Васильевна Самченко — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 653449, Scopus: 56575166100, ResearcherID: E-9534-2017, ORCID: 0000-0002-3523-593X; samchenko@list.ru;

Танг Ван Лам — кандидат технических наук, преподаватель-исследователь; **Ханойский горно-геологический университет**; 18 Фо Виен, Дык Тханг, Бак Ту Лиен, Ханой, Вьетнам; РИНЦ ID: 3214-6263, Scopus: 57209307830, ResearcherID: G-2948-2018, ORCID: 0000-0002-4857-835X; lamvantang@gmail.com;

Виктория Андреевна Швецова — аспирант кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1074835, Scopus: 57205074852, ResearcherID: AFN-9948-2022, ORCID: 0000-0002-7079-5705; wishhuma@mail.ru.

Вклад авторов:

Нгуен Зоан Тунг Лам — анализ источников и литературы, построение экспериментальной модели, проведение экспериментальной работы, анализ полученных результатов, построение математической модели, формулирование выводов.

Самченко С.В. — идея статьи, научное руководство, формулирование концепции исследования.

Танг Ван Лам — анализ источников и литературы, редактирование текста статьи.

Щецова В.А. — участие в экспериментальной работе, редактирование текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bulgakov B.I., Tang Van Lam, Alexandrova O.V. Effect of nano-sized carbon-black particles on the strength of cement paste at early age. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016; 11:18-22. DOI: 10.12737/22441 (rus.).
2. Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V. *Cement minerals and their solid solutions : monograph*. Moscow, RkhTU name after D.I. Mendeleeva, 2020; 175. (rus.).
3. Erofeev V.T., Rodin A.I., Bikbaev R.R., Piksaykina A.A. Research of properties of portland cement with active mineral additive on the basis of tripoli. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2019; 3:7-17. DOI: 10.25686/2542-114X.2019.3.7 (rus.).
4. Hewlett P., Liska M. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier, 2019; 800.
5. Kurdowski W. *Cement and Concrete Chemistry*. Springer Dordrecht, 2014; 700. DOI: 10.1007/978-94-007-7945-7
6. Rodin A.I. *Development of biocidal cements and composites based on them : diss. ... cand. tech. sciences*. Saransk, 2013; 205. (rus.).
7. Nguyen Dinh Trinh, Nguyen The Vinh, Bazhenov Yu.M. High-strength concretes with integrated use of rice husk ash, fly ash and superplasticizers. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 1:77-82. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.1.77-82 (rus.).
8. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Korobkin A.P., Nalimova A.V., Serebryanaya I.A., Nazhnev M.P. Development of the composition of composite Portland cement based on the ash and slag mixture of the Novocherkassk State District Power Plant. *Vestnik SevKavGTI*. 2017; 3(30):148-153. (rus.).
9. Senhadji Y., Escadeillas G., Mouli M., Khelafi H., Benosman A. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. *Powder Technology*. 2014; 254:314-323. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.01.046
10. Potryasova E.V., Zhuchkov E.A., Akhmatov M.K., Fomina N.N. Influence of technogenic mineral additive on the properties of cement compositions. *Construction the formation of living environment : collection of materials of XXIV international scientific conference on advanced in civil engineering*. 2021; 55-60. (rus.).
11. Bazhenov Yu.M., Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I. *Modified high quality concretes*. Moscow, Publishing House ASV, 2006; 368. (rus.).
12. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Fedortsov V.A. The increasing of corrosive resistance of cement composites by active additives. *Building and Reconstruction*. 2020; (2):51-60. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-51-60 (rus.).
13. Aleksashin S.V., Bulgakov B.I. Fine concrete for hydraulic engineering modified by a multi-component additive. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2013; 8:97-103. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.8.97-103 (rus.).
14. Tang Van Lam, Nguyen Doan Tung Lam. Pozzolanic activity of fine mineral components of various nature of Vietnam. *Technique and Technology of Silicates*. 2021; 28(1):7-12. (rus.).
15. Trunov P.V. *Composite binders using volcanic-sedimentary rocks of Kamchatka and fine-grained concretes based on them : diss. ... cand. tech. sciences*. Belgorod, 2014; 161. (rus.).
16. Erofeev V.T., Bazhenov Yu.M., Balatkhanova E.M., Mitina E.A., Emel'yanov D.V., Rodin A.I. et al. Obtaining and physical mechanical properties of cement composites with the use of fillers and mixing water from the Chechen Republic fields. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 12:141-151. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.12.141-151 (rus.).
17. Erofeev V.T., Kalashnikov V.I., Smirnov V.F., Karpushin S.N., Rodin A.I., Krasnoglazov A.M. et al. Durability of cement composites based on biocidal Portland cement with an active mineral additive under the influence of the model environment of bacteria. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 1:11-17. (rus.).
18. Ovcharenko G.I., Viktorov A.V., Sadrashva A.O. Effect of the type of finely grinding mineral additives on the strength of cement stone. Part 2. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2015; 1(673):28-31. (rus.).
19. Rakhimov R.Z., Kamalova Z.A., Ermilova E.Yu., Stoyanov O.V. Thermally treated tripoli as an active mineral additive in cement. *Vestnik of Kazan Technological University*. 2014; 17(13):99-101. (rus.).
20. Samchenko S., Larsen O., Gurkin A. The effect of dispersion of limestone on the properties of cement

mortar. *Materials Today: Proceedings*. 2019; 19:2068-2071. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.076

21. Zunino F., Scrivener K. The reaction between metakaolin and limestone and its effect in porosity refinement and mechanical properties. *Cement and Concrete Research*. 2021; 140:106307. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106307

22. Millán Corrales G., González López J.R., Palomab A., Fernandez Jiménez A. Replacing fly ash with limestone dust in hybrid cements. *Construction and Building Materials*. 2020; 243:118169. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118169

23. Hay R., Li L., Celik K. Shrinkage, hydration, and strength development of limestone calcined clay cement (LC3) with different sulfation levels. *Cement and Concrete Composites*. 2022; 127:104403. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104403

24. Zhang X., Wang B., Chang J. Variation in mineral composition by hydration and carbonation in calcium hydroxide matrix containing zeolite. *Journal of Building Engineering*. 2022; 56:104491. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104491

25. Chenarboni H.A., Lajevardi S.H., Mola-Abasi H., Zeighami E. The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils. *Construction and Building Materials*. 2021; 272:121630. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121630

26. Voronin V.V. Effective admixtures for binders and concretes. *Scientific achievements in research on new modern building materials : joint international scientific symposium*. Hanoi, 2006; 98-105. (rus.).

27. Wang Q., Xiong Z., He J., Lai M., Ho J. Effective solution for improving rheological properties of cement paste containing zeolite. *Construction and Building Materials*. 2022; 351:128780. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128780

28. Wang Q., Zhang J., Ho J.C.M. Zeolite to improve strength-shrinkage performance of high-strength engineered cementitious composite. *Construction and Building Materials*. 2020; 234:117335. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117335

29. Vu Kim Dien, Bazhenova S.I., Do Minh Chien, Hoang Minh Thuan, Nguyen Van Duong, Nguyen Doan Tung Lam. Optimization of foam concrete mixture ratio using the Box-Wilson experimental plan. *Engineering Journal of Don*. 2021; 5:606-620. (rus.).

30. Khartman K., Letskii E.K., Shefer V., Letskaya N.S., Fomin G.A. *Planning an experiment in the study of technological processes*. Moscow, Mir, 1977; 552. (rus.).

31. Nguyễn Minh Tuyển. Quy hoạch thực nghiệm. Hà Nội, NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2007; 264 tr. [Nguyễn Minh Tuyển. *Experimental planning*. Hanoi, Science and Technology Publishing House, 2007; 264]. (vietn.).

32. Aleksandrova O.V., Matseevich T.A., Kir'yanova L.V., Solov'ev V.G. *Statistical methods for solving technological problems : tutorial*. Moscow, MGSU Publishing House, 2017; 153. (rus.).

33. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. *Mathematical statistics tables*. Moscow, Nauka Publ., 1983; 416. (rus.).

Received December 19, 2022.

Adopted in revised form on February 22, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

B I O N O T E S: **Nguyen Doan Tung Lam** — postgraduate of the Department of Building Material Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 5706-4917, ResearcherID: HGU-5702-2022, ORCID: 0000-0001-9061-8426; nguyendoantunglam1110@gmail.com;

Svetlana V. Samchenko — Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Building Material Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 653449, Scopus: 56575166100, ResearcherID: E-9534-2017, ORCID: 0000-0002-3523-593X; samchenko@list.ru;

Tang Van Lam — Candidate of Technical Sciences, Lecturer-Researcher; **Hanoi University of Mining and Geology**; 18 Pho Yen, Duc Thang, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam; ID RSCI: 3214-6263, Scopus: 57209307830, ResearcherID: G-2948-2018, ORCID: 0000-0002-4857-835X; lamvantang@gmail;

Viktoriya A. Shvetsova — postgraduate of the Department of Building Material Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1074835, Scopus: 57205074852, ResearcherID: AFN-9948-2022, ORCID: 0000-0002-7079-5705; wishhuma@mail.ru.

Contribution of the authors:

Nguyen Doan Tung Lam — literature analysis, experimental model building, experimental work, analysis experimental data, mathematical model building, conclusion for a research paper.

Svetlana V. Samchenko — main idea of article, scientific leadership, creating a plan of research.

Tang Van Lam — literature analysis, editing main body of article.

Viktoriya A. Shvetsova — participation in experimental work, editing main body of article.

The authors declare no conflict of interest.