

УДК 666.946.2

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.55

Научная специальность ВАК: 2.6.17 Материаловедение (технические науки)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЖУЩЕГО С КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ НА ОСНОВЕ СУЛЬФОАЛЮМИНАТА КАЛЬЦИЯ

Нгуен Зоан Тунг Лам<sup>1</sup>, Самченко С. В.<sup>1</sup>, Зорин Д. А.<sup>1</sup>, Сизяков И. Д.<sup>1</sup>, Ву Ким Зиен<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный университет

<sup>2</sup>Колледж промышленности и строительства, г. Уонг Би, Вьетнам

### АННОТАЦИЯ

Усадка одна из главных проблем связанных с твердением бетонных и железобетонных конструкций, зависящим от вида бетона и его качества. Негативное влияние усадки можно предотвратить, используя добавки с обычным портландцементом, которые позволяют получить безусадочные и расширяющиеся цементы. Применяя в качестве добавки гипс и смешивая его с цементным клинкером, путем совместного помола можно получить расширяющийся цемент, так же применяя активные минеральные добавки (АМД), обладающие пуццолановой активностью, можно получить цементный камень с более плотной структурой, с низкой пористостью, с высокими физико-механическими характеристиками и с более низкой усадкой. Применение АМД в безусадочных и расширяющихся цементных, так же выгодно с экономической и экологической точки зрения, так как экономят клинкер при производстве цемента. В данной работе в качестве АМД выступает трепел. Было изучено влияние добавок на деформативные свойства вяжущего при помощи метода планирования эксперимента. Деформации цемента определялись на 2,3,7,14 и 28 сутки в соответствии со стандартными методиками исследования и обработки результатов деформативных свойств цементного камня. Отчет о исследованиях представлен графическом варианте в виде пространственной поверхности, полученной методом регрессии второго порядка. Регрессионная зависимость описывает влияние активной минеральной расширяющей добавки на деформирование цементного камня при твердении. Опытным путем получены составы с наибольшим эффектом расширения и с наибольшей усадкой с применением комплексных добавок. Используя результаты исследования, можно прогнозировать деформационные свойства вяжущего с комплексной добавкой.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сульфалоюминат кальция, сульфалоюминатный цемент, трепел, композиционная добавка, деформация цемента, гипс, планирование экспериментов, уравнение регрессии.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Нгуен Зоан Тунг Лам Исследование деформационных характеристик вяжущего с комплексной добавкой на основе сульфалоюмината кальция / Нгуен Зоан Тунг Лам, Самченко С.В., Зорин Д.А., Сизяков И.Д., Ву Ким Зиен // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 1. – С. 47-58.

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

PM MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY

## STUDY OF DEFORMATION CHARACTERISTICS OF BINDER WITH COMPLEX ADDITIVE BASED ON CALCIUM SULFOALUMINATE

Nguyen Doan Tung Lam<sup>1</sup>, Samchenko S. V.<sup>1</sup>, Zorin D. A.<sup>1</sup>, Sizyakov I. D.<sup>1</sup>, Vu Kim Dien<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering

<sup>2</sup>College of Industrial and constructional, Uong Bi, Viet Nam

### ABSTRACT

Shrinkage is one of the main problems related to the hardening of concrete and reinforced concrete structures, which varies depending on the type of concrete and its quality. The negative effects of shrinkage can be prevented by using admixtures with ordinary Portland cement, which produce non-shrinking and expansive cement. The author used gypsum as an additive, mixed it with cement clinker, and obtained expanded cement. Additionally, by using activated mineral additives (AMD) with pozzolanic activity, the author obtained a cement stone with a denser structure, low porosity, and high physical properties. From an economic and environmental perspective, the use of AMD in non-shrinking and expanding cement is also beneficial, as it saves clinker in cement production. The influence of additives on the deformation properties of the binder was studied using the experimental design method. The deformation of cement at the ages of 2, 3, 7, 14, and 28 days was determined according to standard methods for researching the deformation characteristics of cement stone. The research results are presented in surface form and represented by a quadratic regression equation. The regression equation describes the influence of active mineral expansion additives on the deformation of cement stone during hardening. The results obtained include a composition with the maximum expansion effect and a composition with maximum shrinkage when using complex additives. These results can be used in the future to predict the deformation properties of the binder.

**KEY WORDS:** composite additives, cement deformation, gypsum, tripoli, calcium sulfoaluminate, sulfoaluminate cement, experimental planning, regression equation.

**FOR CITATION:** Nguyen Doan Tung Lam Study of the deformation characteristics of the binder with the complex additive based on calcium sulfoaluminate / Nguyen Doan Tung Lam, Samchenko S.V., Zorin D.A., Sizyakov I.D., Vu Kim Dien // Technique and technology of silicates. – 2024. Vol. – 31, No 1. – Pp. 47 – 58.

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на все усилия ученых и строителей большинство бетонов подвергаются образованию трещин при твердении. Растрескивание может быть вызвано различными причинами, такими как температурные колебания, изменение влажности, а также воздействие внешней или внутренней среды. Разрушение цемента и бетона из-за образования трещин обычно связано с растрескиванием на ранних сроках твердения.

Понятно, что предотвращение образования трещин на ранних сроках твердения имеет значение для набора проектной прочности цементов и сохранения требуемых характеристик во время всего срока эксплуатации изделия или сооружения.

Размер усадки при высыхании затвердевшего цементного теста очень важен для применения цементов. Усадка может вызывать растрескивание вокруг заполнителя бетона, а соответственно влияет на прочность бетона. Усадка цемента при твердении в первую очередь обусловлена усадкой при высыхании. Видимые трещины, вызванные усадкой в изделиях из цемента, которые образуются в условиях сдерживания изменения объема из-за распорных устройств, арматурных стержней и крупного заполнителя, влияют на долговечность изделий [1-3], а также на структурные характеристики бетона [4,5]. Следовательно, необходимо прогнозировать, контролировать и, в некоторых случаях, избегать усадку цемента при твердении.

Добавки для цементов бывают самых разных видов, их количество доходит до нескольких десятков категорий, каждая из которых способствует улучшению определенных свойств цементных вяжущих или бетонов. Постоянно ведутся исследования в направлении повышения прочности и долговечности и многие добавки стали почти незаменимыми для применения в цементных и бетонных смесях. [6-8].

Для уменьшения усадки и снижения вероятности образования трещин, было предложено множество методов, таких как внутреннее отверждение [9,10], изменение пропорции цементной смеси, использование расширяющих добавок [11-14] или волокон и другие способы.

Например, включение сульфоалюминатной добавки и трепела может привести к снижению усадочной деформации цементного теста при твердении [15,16].

Большое внимание уделяется ремонту и усилению существующих бетонных конструкций. Одной из проблем цементных ремонтных смесей является сцепление с существующим основанием и уменьшение усадки при твердении. По оценкам, затраты на реконструкцию и ремонт бетонных сооружений могут достигать 50% от стоимости строительства. Чаще всего необходимость в реконструкции или ремонте вызваны изменениями в назначении эксплуатации конструкции, например увеличение нагрузки или изменение архитектуры, старение бетона и снижение несущей способности конструкции [17-21]. Поэтому возникает необходимость разработки новых материалов и технологий для получения инновационных цементных составов.

**Цель исследования:** изучить влияние комплексной добавки на основе сульфоалюмината кальция, природного гипса и трепела деформационные характеристики вяжущей композиции.

## INTRODUCTION

Currently, concrete structures experience cracking during the hardening process. There are many different causes, including the difference in temperature inside and outside the concrete structure, and changes in moisture. Poor cement quality also contributes to cracking in the early stages of hardening.

Preventing the formation of cracks in the early stages of hardening is important for achieving the design strength of cement and maintaining the required characteristics during the lifespan of the product or structure.

Shrinkage, particularly drying shrinkage, is a critical factor when using cement. It can cause cracks around the concrete aggregate, thus affecting the strength of the concrete. Cement shrinkage mainly occurs during concrete hardening. Visible shrinkage cracks in cement products form when spacers, steel reinforcement, or concrete aggregates prevent volume reduction, affecting the product's durability [1-3], as well as the structural properties of concrete [4,5]. Therefore, predicting, controlling, and in some cases avoiding cement shrinkage during hardening is necessary.

Cement additives come in different types, each designed to improve certain properties of cement and concrete based on them. Research is constantly conducted to increase strength and durability, and many additives have become almost indispensable for use in cement and concrete mixtures [6,7,8]. To reduce shrinkage and the possibility of cracking, various methods have been proposed, such as internal curing [9,10], altering the cement mixture ratio, using expansion additives [11-14], or fibers and other methods.

For instance, including sulfoaluminate and tripoli additives can lead to reduced shrinkage deformation of cement paste during hardening [15,16].

Attention has also been paid to the repair and reinforcement of existing concrete structures. One challenge with cement repair mixtures is achieving adhesion to the existing substrate and reducing shrinkage during hardening. It is estimated that the cost of rebuilding and repairing concrete structures can amount to up to 50% of the construction cost. Typically, the need for rebuilding or repair is due to changes in the structure's intended use, such as increased loading or architectural changes, aging of concrete, and reduced load-carrying capacity of the structure [17-21]. Therefore, studying the deformation characteristics of composite adhesives with calcium sulfoaluminate-based additives is extremely necessary.

**The aim of the study:** to investigate the effect of complex additive based on calcium sulfoaluminate, natural gypsum and trepel deformation characteristics of binder composition.

Материалы и методы исследования

Materials and methods of research

**Материалы.** Портландцемент (ПЦ) - ЦЕМ I 42,5Н (М500 Д0) с плотностью  $\rho = 3,205 \text{ г/см}^3$  и удельной поверхностью  $S_{уд} = 3650 \text{ см}^2/\text{г}$ . Минералогический состав сульфоалюминатного цемента (САЦ) представлен САК с содержанием не менее 50%, белита  $\text{C}_2\text{S}$  не более 35%,  $\text{C}_4\text{AF}$  не более 10%, с истинной плотностью  $\rho = 3,045 \text{ г/см}^3$  и удельной поверхностью  $S_{уд} = 4600 \text{ см}^2/\text{г}$ . Природный гипс (Г) второго сорта (содержание  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  равняется 93,20%) имеет истинную плотность  $\rho = 2,316 \text{ г/см}^3$ , где удельная поверхность равна  $S_{уд} = 2235 \text{ см}^2/\text{г}$ . Трепел (Тр) Хотынецкого месторождения имеет истинную плотностью  $\rho = 2,395 \text{ г/см}^3$  и удельную поверхность  $S_{уд} = 6355 \text{ см}^2/\text{г}$ . Вода предназначена для образцов подготовлена в соответствии с нормативным требованиям ГОСТ 23732–2011. Портландцемент, сульфоалюминатный цемент, природный гипс, соответствуют требованиям нормативных документов: ГОСТ Р 56727–2015, ТУ 5745-008-00281306-18, ГОСТ 4013–2019, соответственно.

**Методы.** Определение истинной плотности проводилось в соответствии с методикой описанной в ГОСТ 30744-2001, определение удельной поверхности по ГОСТ 21043-87. Деформация цемента на 2,3,7,14 и 28 сутки были определены на стандартных образцах размером балочки  $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$  при водоцементном отношении, равном 0,5 с помощью автоматического растворосмесителя Automix CONTROLS и форм для определения деформации цементного раствора CONTROLS 62-L0009. Линейные деформации образцов определялись при помощи устройства CONTROLS 62-L0035/A в лаборатории кафедры строительного материаловедения НИУ МГСУ. Расчет деформаций цементного камня выполнялся в соответствии с ГОСТ Р 56727-2015 и ГОСТ 11052-74. Для анализа результатов испытаний применялся ортогональный центрально-композиционный план второго порядка (методом Вокс-Уилсона) [22-25]. Уравнение второго уровня, рассчитанное по формуле (1), представлено ниже:

**Materials.** Portland cement (PC) - CEM I 42.5N (M500 D0) with a density ( $\rho$ ) of  $3.205 \text{ g/cm}^3$  and a specific surface area of  $3650 \text{ cm}^2/\text{g}$ . The mineral composition of sulfoaluminate cement (SAC) contains no less than 50% SAC, no more than 35% belite ( $\text{C}_2\text{S}$ ), and no more than 10%  $\text{C}_4\text{AF}$ , with a true density of  $3.045 \text{ g/cm}^3$  and a specific surface area of  $4600 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Natural gypsum (G) of the second grade, with a  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  content of 93.20%, a true density of  $2.316 \text{ g/cm}^3$ , and a specific surface area of  $2235 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Trepel (Tr) with a true density of  $2.395 \text{ g/cm}^3$  and a specific surface area of  $6355 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Mix water meets the requirements of GOST 23732-2011. Portland cement, sulfoaluminate cement, and natural gypsum are in compliance with GOST R 56727–2015, TU 5745-008-00281306-18, and GOST 4013–2019, respectively.

**Methods.** The true density and specific surface were determined according to GOST 30744-2001 and GOST 21043-87. The deformation of cement on days 2, 3, 7, 14, and 28 was determined on samples sized  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$  with a water-cement ratio of 0.5, using an Automix CONTROLS automatic mortar mixer and forms for determining the deformation of cement mortar (CONTROLS 62-L0009). Linear deformations of the samples were determined using a device for comparing lengths (CONTROLS 62-L0035/A) in the laboratory of the Department of Building Materials Science at the National Research University MGSU. The calculation of cement deformation was carried out according to GOST R 56727-2015, taking into account the measurement error according to GOST 11052-74. In this work, an orthogonal central composite design of the second order (Box-Wilson method) was used to process the test results [22-25]. The second-level regression equation was calculated using formula (1):

$$f = e_0 + \sum_{j=1}^n e_j X_j + \sum_{j=1}^n e_{jj} X_j^2 + \sum_{u=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq u}}^n e_{ju} X_j X_u \quad (1)$$

где:  $x_j$  - факторы;  
 $x_i x_j$  - взаимодействие между факторами;  
 $e_0, e_j$  и  $e_{ji}$  - коэффициенты регрессии;  
 $n$  – число факторов.

where:  $x_j$  - factors;  
 $x_i x_j$  - interaction between factors;  
 $e_0, e_j$  and  $e_{ji}$  - regression coefficients;  
 $n$  – number of factors.

**Эксперименты и обсуждение результатов**

**Experiments and discussion**

Необходимость ортогонального центрально-композиционного плана (ОЦКП) второго порядка обусловлена сложным взаимодействием добавок в композиционном вяжущем между собой и портландцементом. Оценка влияния добавки проводилась при изменении трех факторов. Ищущие влияния добавок на деформации цементного камня проводились в течение 28 суток его твердения. Варьируемые факторы, влияющие на деформационные свойства цементного камня (таблица 1):

To study the influence of the content of additives in the composite binder, a second-order orthogonal central compositional design with three factors was utilized. In this research, the authors investigated the effect of additive content on the deformation of cement mortar over 28 days of curing. The input factors influencing the deformation properties of cement mortar are presented in Table 1:

- $x_1$  – содержания САЦ от 10% до 14% от массы вяжущего;
  - $x_2$  – содержания Г от 7,5% до 12,50% от массы вяжущего;
  - $x_3$  – содержания Тр от 12% до 20% от массы вяжущего;
- Масса вяжущего:  $\% \text{ПЦ} + \% \text{САЦ} + \% \text{Г} + \% \text{Тр} = 100\%$ .

- $x_1$  – sulfoaluminate cement content from 10% to 14% by weight of the binder;
  - $x_2$  – Natural gypsum content from 5% to 10% by weight of the binder;
  - $x_3$  – Trepel content from 12% to 20% by weight of the binder;
- Binder mass:  $\% \text{PC} + \% \text{SAC} + \% \text{G} + \% \text{Tr} = 100\%$ .

**ТАБЛИЦА 1. ДИАПАЗОНЫ ВАРЬИРУЕМЫХ ФАКТОРОВ**  
**Table 1. Values and ranges of influencing factors**

Факторы Factors		Уровни варьирования факторов Levels of variation		
В качестве переменных Real variable	В натуральном виде Real variable	-1	0	+1
x <sub>1</sub>	%САЦ %SAC	10	12	14
x <sub>2</sub>	%Г %G	5	7,5	10
x <sub>3</sub>	%Тр %Tr	12	16	20

Количество испытаний N определяется по формуле (2): The number of experiments N was determined by formula (2):

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

Где: m = 1 – количество экспериментов в центре экспериментального плана, n = 3 – количество входов.

Where: m = 1 – the number of repeated experiments in the center, n = 3 – the number of input factors

Необходимым этапом перед экспериментом является кодирование переменных. Результаты представлены в таблице 2.

After coding the variables, the corresponding experiments were conducted. The results of these experiments are presented in Table 2.

**ТАБЛИЦА 2 КОНЦЕНТРАЦИЯ ДОБАВОК В ВЯЖУЩЕМ, КОДИРОВАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО МЕТОДУ ОЦКП ВТОРОГО ПОРЯДКА**  
**Table 2. The ratio of additives in the binder according to the second-order orthogonal central planning method**

№ п/п Ser. No.	В натуральном виде Real variable			В качестве переменных Variable coding			Функции отклика и результаты испытаний Response functions and test results				
	%САЦ %SAC	%Г %G	%Тр %Tr	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>7</sub>	f <sub>14</sub>	f <sub>28</sub>
1	10	5	12	-1	-1	-1	0,384	0,465	0,496	0,457	0,493
2	14	5	12	+1	-1	-1	0,135	0,121	0,079	0,068	0,061
3	10	10	12	-1	+1	-1	1,373	2,140	3,608	3,838	3,806
4	14	10	12	+1	+1	-1	6,865	7,497	7,726	7,781	7,785
5	10	5	20	-1	-1	+1	-0,037	-0,179	-0,219	-0,238	-0,242
6	14	5	20	+1	-1	+1	0,211	0,131	0,151	0,160	0,151
7	10	10	20	-1	+1	+1	2,085	2,844	4,295	4,516	4,610
8	14	10	20	+1	+1	+1	4,127	6,179	6,722	6,756	6,746
9	9,57	7,5	16	-1,215	0	0	2,300	2,659	2,715	2,693	2,663
10	14,43	7,5	16	1,215	0	0	0,878	1,148	1,097	1,124	1,211
11	12	4,46	16	0	-1,215	0	0,133	0,040	0,037	0,035	0,046
12	12	10,54	16	0	1,215	0	1,796	2,808	4,427	4,709	4,771
13	12	7,5	11,14	0	0	-1,215	2,669	2,780	2,775	2,793	2,804
14	12	7,5	20,86	0	0	1,215	2,500	3,098	3,285	3,308	3,350
15	12	7,5	16	0	0	0	2,542	2,583	2,529	2,548	2,546
16	12	7,5	16	0	0	0	2,155	2,191	2,225	2,269	2,265
17	12	7,5	16	0	0	0	2,691	2,685	2,681	2,690	2,669

В котором:  $f_2$  - функция отклика, представляющая линейная деформация цемента на 2 сутки (мм/м),  
 $f_3$  - функция отклика, представляющая линейная деформация цемента на 3 сутки (мм/м),  
 $f_7$  - функция отклика, представляющая линейная деформация цемента на 7 сутки (мм/м),  
 $f_{14}$  - функция отклика, представляющая линейная деформация цемента на 14 сутки (мм/м),  
 $f_{28}$  - функция отклика, представляющая линейная деформация цемента на 28 сутки (мм/м).  
 (1мм/м = 0,1% линейное расширение (усадка)).  
 Коэффициенты регрессионных зависимостей рассчитывался по формуле (3) [22-25]:

$$e_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} f_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2} \quad \forall_j = \overline{1 \dots n} \quad ; \quad e_{ju} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} x_{ui} f_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2 x_{ui}^2} \quad \forall_{j,u} = \overline{1 \dots n}; j \neq u \quad ; \quad e_0 = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N} - e_{11} \overline{x_1^2} - \dots - e_{nn} \overline{x_n^2} \quad (3)$$

Уравнения регрессии с рассчитанным коэффициентами:

$$f_2 = 1,971 + 0,530x_1 + 1,441x_2 - 0,235x_3 + 0,942x_1x_2 - 0,369x_1x_3 - 0,210x_2x_3 - 0,493x_1x_2x_3 - 0,133x_1^2 - 0,555x_2^2 + 0,541x_3^2 \quad (4)$$

$$f_3 = 2,129 + 0,623x_1 + 1,962x_2 - 0,079x_3 + 1,091x_1x_2 - 0,171x_1x_3 + 0,002x_2x_3 - 0,335x_1x_2x_3 - 0,053x_1^2 - 0,378x_2^2 + 0,648x_3^2 \quad (5)$$

$$f_7 = 2,189 + 0,414x_1 + 2,481x_2 - 0,031x_3 + 0,824x_1x_2 - 0,113x_1x_3 + 0,041x_2x_3 - 0,310x_1x_2x_3 - 0,118x_1^2 + 0,103x_2^2 + 0,643x_3^2 \quad (6)$$

$$f_{14} = 2,225 + 0,391x_1 + 2,568x_2 - 0,030x_3 + 0,772x_1x_2 - 0,115x_1x_3 + 0,032x_2x_3 - 0,311x_1x_2x_3 - 0,144x_1^2 + 0,170x_2^2 + 0,629x_3^2 \quad (7)$$

$$f_{28} = 2,253 + 0,394x_1 + 2,577x_2 - 0,020x_3 + 0,769x_1x_2 - 0,127x_1x_3 + 0,051x_2x_3 - 0,334x_1x_2x_3 - 0,151x_1^2 + 0,169x_2^2 + 0,621x_3^2 \quad (8)$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивалась по критерию Стьюдента. Если  $|t_{ej}| \geq t_p(v_2)$ , то коэффициент  $t_{ej}$  значимый. Согласно [26] в табл. 3.2  $\Rightarrow t_p(v_2) = 4,30$  ( $p = 0,05$ ,  $v_2 = k - 1 = 3 - 1 = 2$  число степеней свободы). Величина  $t_{ej}$  была определена по формуле (9) [22-25]:

$$t_{ej} = \frac{|e_j|}{S_{ej}} \quad (9)$$

Дисперсия коэффициентов регрессии ( $S_{ej}$ ) была рассчитана по формуле (10) [22-25]:

$$S_{ej} = \sqrt{\frac{S_{II}^2}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}} \quad (10)$$

Где:  $S_{II}^2$  - остаточная дисперсия на одну степень свободы.

$$S_{II}^2 = \frac{\sum_{c=1}^k (f_{0c} - \bar{f}_0)^2}{k - 1} \quad (11)$$

$$\bar{f}_0 = \frac{1}{k} \sum_{c=1}^k f_{0c} \quad (12)$$

Где:  $k$  - количество проводимых экспериментов в центре плана;

$\bar{f}_0$  - среднее количество испытаний в центре;

In which:  $f_2$  is the Linear deformation equation of cement on day 2 (mm/m),  
 $f_3$  - Linear deformation equation of cement on day 3 (mm/m),  
 $f_7$  - Linear deformation equation of cement on day 7 (mm/m),  
 $f_{14}$  - Linear deformation equation of cement on day 14 (mm/m),  
 $f_{28}$  - Linear deformation equation of cement at day 28 (mm/m).  
 (1mm/m = 0.1% linear expansion (shrinkage)).  
 The regression equation coefficient was calculated using formula (3) [22-25]:

As a result, the following regression equations were obtained:

The significance of the regression equation coefficients was tested using the Student's t-criterion. The coefficient  $|t_{ej}|$  is considered significant if it is greater than or equal to  $t_p(v_2)$ . According to [26] in Table 3.2,  $t_{p(v_2)} = 4,30$  ( $p = 0,05$ ;  $v_2 = k - 1 = 3 - 1 = 2$  degrees of freedom). The value of  $t_{ej}$  was determined using formula (9) [22-25]:

The dispersion value of the regression coefficients ( $S_{ej}$ ) was calculated using formula (10) [22-25]:

Where:  $S_{II}^2$  - residual dispersion per degree of freedom.

Where:  $k$  is the number of repeated experiments in the center;

$\bar{f}_0$  is the average value of  $k$  experiments in the center;

$f_{oc}$  – полученное значение по результатам  $c$ -го эксперимента в центре плана.

Проверка адекватности модели: оценка адекватности модели выполнена по критерию Фишера по формулам  $F_{\text{расц}}$  (13) и  $S_{2d}$  (14) [24]:

$$F_{\text{расц}} = \frac{S_e^2}{S_{\text{II}}^2} \quad (13)$$

$$S_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (e_i - \hat{e}_i)^2}{N - g} \quad (14)$$

Где:  $S_{\text{II}}^2$  – остаточная дисперсия на одну степень свободы;

$S_d^2$  – значение дисперсии;

$g$  – количество коэффициентов регрессии;

$y_i$  – значение  $i$ -го эксперимента;

$\bar{y}_i$  – значение функции, полученное в соответствии с экспериментом  $i$ .

Значение критерия Фишера, соответствующее табличное значение критерия Фишера  $F_p$ , ( $v_1, v_2$ ) было найдено по таблице 3.5 [26] (процентные точки  $F$ -распределения), при уровне значимости  $p = 0,05$ . Полученное соотношение  $F_p < F_{\text{табл}}$  говорит о положительном прохождении проверки по данному критерию. Успешная проверка по критериям Стьюдента и Фишера, позволяет принять гипотезу об адекватности регрессионной модели, после чего можно представить уравнения регрессии в виде полиномов первой и второй степени, представленные ниже:

$$f_2 = 1,971 + 0,530x_1 + 1,441x_2 + 0,942x_1x_2 - 0,493x_1x_2x_3 \quad (15)$$

$$f_3 = 2,129 + 0,623x_1 + 1,962x_2 + 1,091x_1x_2 + 0,648x_3^2 \quad (16)$$

$$f_7 = 2,189 + 0,414x_1 + 2,481x_2 + 0,824x_1x_2 + 0,643x_3^2 \quad (17)$$

$$f_{14} = 2,225 + 0,391x_1 + 2,568x_2 + 0,772x_1x_2 + 0,629x_3^2 \quad (18)$$

$$f_{28} = 2,253 + 0,394x_1 + 2,577x_2 + 0,769x_1x_2 - 0,334x_1x_2x_3 + 0,621x_3^2 \quad (19)$$

Получена основная поверхность, выраженная целевой функцией уравнения регрессии (19) на рис. 1. Уравнение (19), описывающие деформации материала на 28 суток, является главным показателем деформативных характеристик композиционного вяжущего, так как большая часть компонентов композиционного вяжущего вступило в реакцию гидратации цемента именно в возрасте 28 суток.

Общие комментарии к полученным зависимостям, описывающим процесс деформирования цемента в различном возрасте, следующие: основная часть коэффициентов уравнений регрессии, в том числе и свободные члены, увеличиваются во всем диапазоне проведения эксперимента. По рис. 1 и уравнениям (15), (16), (17), (18), (19) видно, что комплексное влияние сульфоалюминатного цемента, где главный компонент сульфоалюминат кальция, и гипса приводит к расширению в большей части рассматриваемого диапазона исследования по времени гидратации. Другими словами, при увеличении содержания сульфоалюмината кальция и гипса в композиционном вяжущем приводит во всем диапазоне исследования, к увеличению деформаций в сторону расширения цементного камня.

Рассматривая уравнение регрессии (19), можно сделать вывод, что влияние добавления гипса в композиционное вяжущее играет большую роль в расширении цементного камня. Такой вывод можно сделать исходя из коэффициента перед  $x_2 = +2,577$ . Образование этtringита обусловлено наличием в растворе ионов кальция, сульфат-ионов и ионов алюминия, благоприятная среда в цементном тесте

$f_{oc}$  is the obtained value of the  $c$ -th experiment in the center.

Checking the adequacy of the model: To check the adequacy of the model, it was performed using the Fisher criterion using the formulas  $F_{\text{расц}}$ (13) and  $S_{2d}$  (14) [24]:

Where:  $S_{\text{II}}^2$  is the residual dispersion per degree of freedom;

$S_e^2$  - dispersion value;

$g$  - number of regression coefficients;

$y_i$  – value of the  $i$ -th experiment;

$\bar{y}_i$  – function value obtained in accordance with experiment  $i$ .

The corresponding table value of the Fisher criterion  $F_p$ , ( $v_1, v_2$ ), was found in Table 3.5 [26], which lists the percentage points of the  $F$  distribution, with a significance level of  $p = 0.05$ . The resulting ratio  $F_p < F_{\text{таб}}$  allows us to accept the hypothesis regarding the adequacy of the regression model. After verifying the above criteria, the regression equations obtained are presented below.

Images representing the expression surface of the objective function for regression equations (19) are presented in Fig. 1. The assessment of the deformation characteristics of cement is largely based on equation (19), especially when measuring deformation at the age of 28 days, since most of the components of the composite binder have reacted with the cement hydration by this age.

We observe that the corresponding regression coefficients of the equations, including the free terms, increase throughout the experiment. From Fig. 1 and equations (15), (16), (17), (18), (19), it is evident that the complex influence of sulfoaluminate cement, where the main component is calcium sulfoaluminate, and gypsum leads to an expansion in most of the considered range of research on hydration time. In other words, an increase in the contents of calcium sulfoaluminate and gypsum in the composite binder results in an increase in the expansion of cement stone throughout the entire research range.

Considering the regression equation (19), it is clear that the  $x_2$  variable (the amount of gypsum in the binder mixture) has a coefficient equal to  $+2.577$ , which is the largest in the regression equation and, therefore, has a significant impact on the expansion of cement stone. Calcium sulfate reacts with Portland cement and SAC minerals and their hydration products to form ettringite. The formation of ettringite is due to the presence of calcium ions, sulfate ions and aluminum ions in the solution, a favorable environment in the cement test is formed in the presence of

образуется в том числе при наличии сульфата кальция, минералов САЦ вступающими в реакцию между собой и минералами портландцемента [19,20], согласно реакциям (20-27)

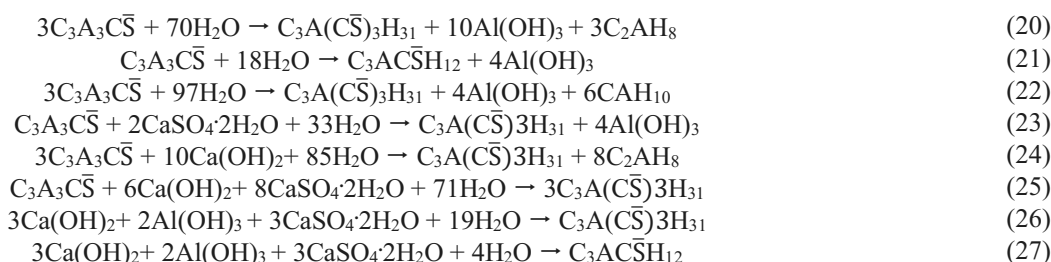
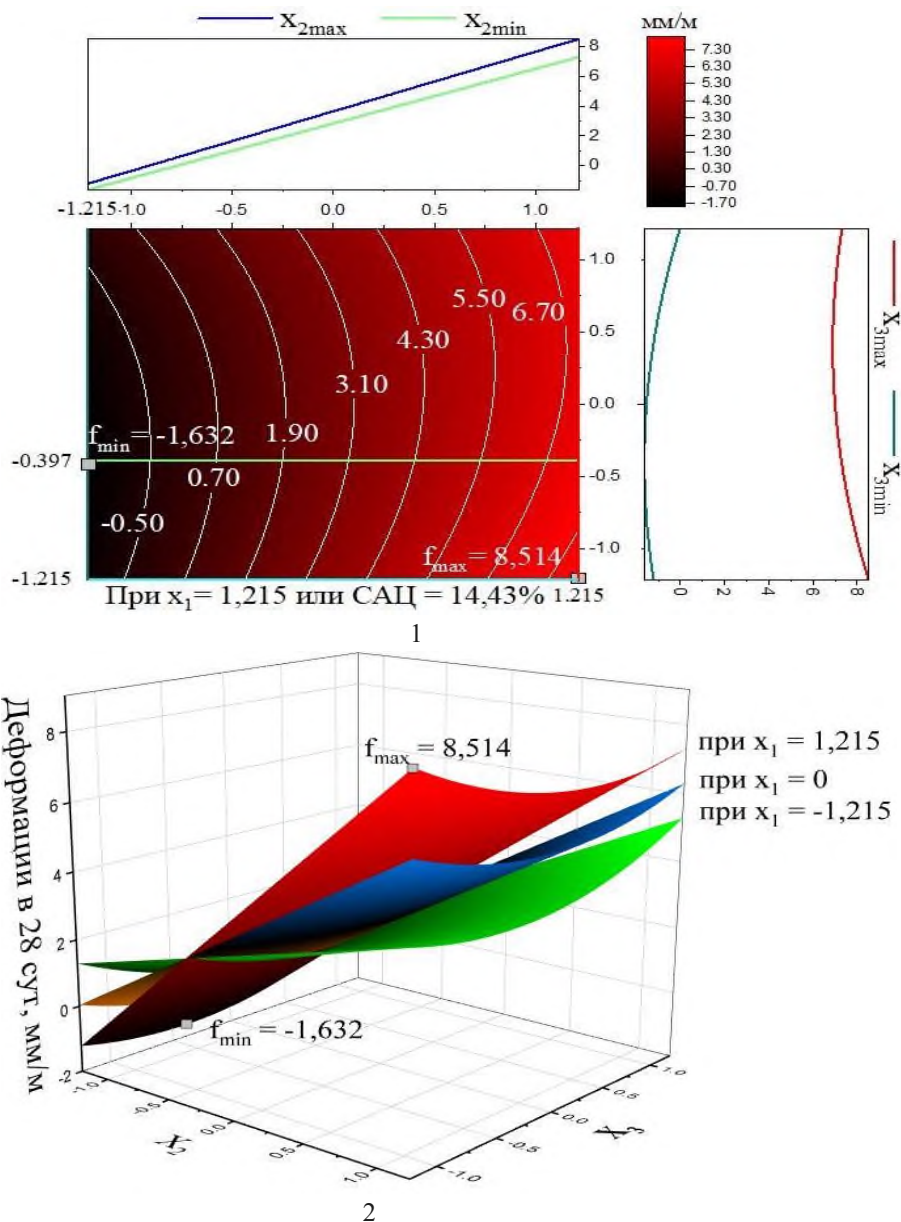
calcium sulfate, SAC minerals reacting with each other and Portland cement minerals [19,20]: according to the reactions (20-27)

РИСУНОК 1

ПОВЕРХНОСТЬ УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИИ (19)

Figure 1

Regression surface (19)



Появление портландита возможно при взаимодействии портландцемента и минерала  $C_3A(C\bar{S})_3H_{31}$  в САЦ с водой. Наличие в трепеле аморфного кремнезёма обуславливает пуццолановую реакцию в композиционном вяжущем, реакция представлена ниже:



Положительный знак при линейных членах  $x_1$  (концентрация САЦ) говорит о положительном влиянии на расширение цементного камня в период твердения.

The appearance of portlandite is possible through the interaction of Portland cement and the  $C_3A(C\bar{S})_3H_{31}$  mineral in SAC with water. In the presence of tripoli, a pozzolanic reaction occurs:

The coefficients for the linear terms  $x_1$  (the amount of SAC, respectively) have a positive sign. Therefore, an increase in the amount of this component in the binder leads

Коэффициент при  $b_1 = + 0,394$  наименьший, следовательно отдельное влияние данного фактора приводит к расширению цементного камня слабее, чем при использовании комплекса САЦ с гипсом  $b_{12} = 0,769$ . Квадратичный коэффициент при  $b_{33} = 0,621$ , это говорит о том, что добавление трепела во всем исследуемом диапазоне показывает положительное влияние на деформирование цементного камня, особенно в звездных точках. Пористая структура трепела и его развитая площадь поверхности, дает добавке высокие абсорбирующие свойства. Возможно, трепел в составе вяжущего приводит к увеличению набухания цементного камня, а абсорбированная трепелом вода, взаимодействует с продуктами гидратации и гипсом с образованием этtringита.

Взаимное влияние первых двух факторов варьирования, говорит о присутствии положительных коэффициентов взаимного влияния двух факторов САЦ и гипса, численные значения которых значительно превосходят коэффициенты при линейных членах уравнения, свидетельствует о том, что большое значение на исследуемые свойства имеет соотношения между факторами варьирования. Так как в результате их взаимодействия образуется этtringит, что и было показано выше. Трепел в свою очередь участвует в реакции с  $Ca(OH)_2$ , САЦ + гипс, так же участвуют во взаимодействии с портландитом, чем и объясняется совместное влияние 3-факторов на деформацию.

При  $x_1 = 1,215$ ;  $x_2 = 1,215$ ;  $x_3 = - 1,215$  (рис.1) расширение цементного камня (19) достигает максимального значения равного 8,514 мм/м или 0,8514%. При этом значении переменных содержание САЦ равно 14,43%, гипса – 10,54%, трепела – 11,14%.

В работе применялась программа MatLab для нахождения состава с минимальными деформациями, другими словами, с максимальной усадкой равной - 1,632 мм/м, при значении коэффициентов  $x_1 = +1,215$ ;  $x_2 = - 1,215$ ;  $x_3 = -0,397$  и содержания сульфоалюминатного цемента, гипса, трепела - 14,43%, 4,46%, 14,412%, соответственно. Полученные результаты представлены в таблице 3 и на рисунке 2.

to an increase in the expansion of the cement stone. The coefficient at  $x_1 = +0.394$  is the smallest, indicating that the individual influence of this factor on the expansion of the cement stone is less than when using the SAC complex with gypsum. The quadratic coefficients at  $x_3 = 0,621$  suggest that the addition of tripoli throughout the studied range has a positive effect on the deformation of cement stone. This can be attributed to the porous structure and developed surface of tripoli, which endows the additive with high absorbent properties. As a result, the presence of tripoli in the binder composition leads to an increase in the swelling of cement stone. The water absorbed by tripoli may be involved in the formation of ettringite.

The presence of positive coefficients for the mutual influence of the two factors, SAC and gypsum, whose numerical values significantly exceed the coefficients for the linear terms of the equation, indicates that the relationships between the varying factors greatly influence the studied properties. Their interaction results in the formation of ettringite, as shown above. Tripoli, in turn, participates in the pozzolanic reaction with  $Ca(OH)_2$ , SAC + gypsum, and also interacts with portlandite, explaining the combined influence of three factors on deformation. The negative sign of the triple interaction suggests that a simultaneous increase in tripoli, SAC, and gypsum leads to a decrease in expansion. This can be explained by the expansion of cement stone being associated with the formation of binder hydration products of a larger volume than the original components.

It is evident that the expansion of cement stone (19) reaches a maximum value of 8,514 mm/m or 0,8514% at  $x_1 = 1,215$ ;  $x_2 = 1,215$ ;  $x_3 = -1,215$  (Fig.1). With these variable values, the content of SAC is 14,43%, gypsum is 10,54%, and tripoli is 11,14%.

The MatLab program was utilized to find the composition with minimal deformations (with maximum shrinkage equal to -1,632 mm/m), with coefficients  $x_1 = +1,215$ ;  $x_2 = -1,215$ ;  $x_3 = -0,397$ , and accordingly, the content of aluminous cement equal to 14,43%; gypsum 4,46%; tripoli 14,412%. The results obtained are presented in table 3 and figure 2.

**ТАБЛИЦА 3. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ КОМПОНЕНТОВ**

**Table 3. Values of deformation of cement stone depending on the content of components**

	%САЦ %SAC	%Г %G	%Тр %Tr	Кодированное значение фактора Coded factor value			Деформации цемента, мм/м Cement deformation, mm/m				
				$x_1$	$x_2$	$x_3$	2 сут. 2 d.	3 сут. 3 d.	7 сут. 7 d.	14 сут. 14 d.	28 сут. 28 d.
$f_{28\max} = 8,514$ мм/м (Состав 1) – расширение $f_{28\max} = 8.514$ mm/m (Composition 1) – expansion	14,43	10,54	11,14	1,215	1,215	-1,215	6,641	7,837	7,872	7,888	8,514
$f_{28\min} = -1,632$ мм/м (Состав 2) – усадка $f_{28\min} = -1.632$ mm/m (Composition 2) - shrinkage	14,43	4,46	14,14	1,215	-1,215	-0,397	-0,815	-1,006	-1,437	-1,461	-1,632



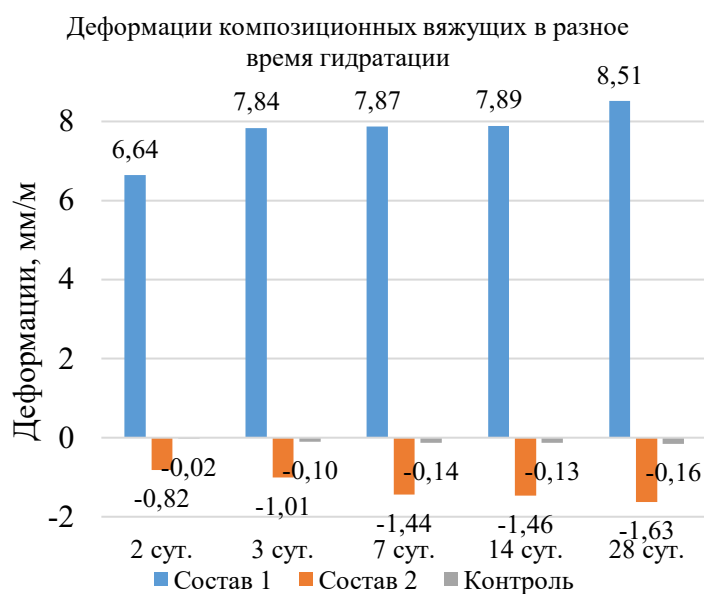
	%САЦ %SAC	%Г %G	%Тр %Tr	Кодированное значение фактора Coded factor value			Деформации цемента, мм/м Cement deformation, mm/m				
				x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	2 сут. 2 d.	3 сут. 3 d.	7 сут. 7 d.	14 сут. 14 d.	28 сут. 28 d.
Контрольный состав (%ПЦ = 100%) Control composition (%PC = 100%)	0	0	0	-	-	-	-0,017	-0,100	-0,135	-0,127	-0,156

РИСУНОК 2

**ДЕФОРМАЦИИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО**

Figure 2

Deformations of cement stone depending on the composite binder composition



**Заключение**

Проведены исследования деформационных свойств композиционного вяжущего на основе портландцемента с комплексной добавкой, имеющей в своем составе сульфоалюминатный цемент, содержащий сульфоалюминат кальция - САК, природный гипс и трепел. Для моделирования результатов экспериментальной работы был построен ортогональный центрально-композиционный план второго порядка. В результате проведенных испытаний получены зависимости изменения деформации цементного камня. На основе проанализированных данных, полученных в ходе эксперимента и обзора литературы, можно сделать следующие выводы:

1. Применен метод математического планирования эксперимента для построения модели деформирования цементного камня в период твердения до 28 сут. Получено 5 уравнений регрессии на 2,3,7,14 и 28 суток твердения;

2. Анализ влияния содержаний САЦ, гипса и трепела на деформирование цементного камня в период твердения подтвердил гипотезу о физических и химических процессах, протекающих в результате твердения композиционного вяжущего. Получены составы вяжущей смеси с максимальной усадкой и максимальным расширением. Значения деформаций изменяются в интервале от -1,630 мм/м до +8,514 мм/м.

3. Построена поверхность, которая изображает зависимость деформации цементного камня в марочном возрасте твердения вяжущего от содержания добавок.

**Conclusions**

The deformation properties of composite binder based on Portland cement with complex additive, which has in its composition sulfoaluminate cement containing calcium sulfoaluminate - SAC, natural gypsum and trepel, have been investigated. To simulate the experimental results, a second-order orthogonal center-composition plan was constructed. As a result of the tests performed, the dependencies of the change in the deformation of the cement stone were obtained. Based on the analyzed experimental data and literature review, the following conclusions can be drawn:

1. The method of mathematical planning of experiment for construction of model of deformation of cement stone in the period of hardening up to 28 days has been applied. 5 regression equations were obtained for 2,3,7,14 and 28 days of curing;

2 Analysis of the influence of SAC, gypsum and trepel contents on the deformation of cement stone during hardening confirmed the hypothesis of physical and chemical processes occurring as a result of composite binder hardening. Compositions of binder mixture with maximum shrinkage and maximum expansion were obtained. The strain values vary in the range from -1.630 mm/m to +8.514 mm/m.

3. The surface, which depicts the dependence of cement stone deformation at the age of hardening of the binder on the content of additives, is constructed.

4. Результаты работы могут использоваться для прогнозирования деформативных свойств вяжущего при проведении исследований.

4. The results of work can be used for prediction of deformative properties of binder during research.

#### Литература:

1. Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V. Sulfate-bearing solid solution of calcium aluminates and ferrites. 9th International Congress on the Chemistry of Cement. New Delhi. 1992. Vol. 3. Pp. 201-215.
2. Osokin A.P., Krivoborodov Y.R., Samchenko S.V. Melt structure and properties clinkers containing calcium sulfoferrites and sulphoalumoferrites. 10th International Congress on the Chemistry of Cement. Gothenburg. 1997. Vol. 1. 8 pp.
3. Кузнецова Т.В., Талабер Й. Глиноземистые цементы. М.: Стройиздат. 1988. 272 с.
4. Hiroshi Sasano, Ippei Maruyama, Mechanism of drying-induced change in the physical properties of concrete: A mesoscale simulation study, Cement and Concrete Research, Volume 143, 2021, 106401, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106401>.
5. Wioletta Soja, Fabien Georget, Hamed Maraghechi, Karen Scrivener, Evolution of microstructural changes in cement paste during environmental drying, Cement and Concrete Research, Volume 134, 2020, 106093, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106093>.
6. D.P. Bentz, M.R. Geiker, K.K. Hansen, Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars, Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 7, 2001, Pages 1075-1085, ISSN 0008-8846, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00519-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00519-1).
7. Pengcheng Lv, Guangcheng Long, Youjun Xie, Jianwei Peng, Shulai Guo, Study on the mitigation of drying shrinkage and crack of limestone powder cement paste and its mechanism, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134325, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134325>.
8. Wenyan Zhang, Huaxia Lin, Mengfen Xue, Shuai Wang, Junsheng Ran, Faqiang Su, Jianping Zhu, Influence of shrinkage reducing admixtures on the performance of cementitious composites: A review, Construction and Building Materials, Volume 325, 2022, 126579, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126579>.
9. Peiliang Shen, Linnu Lu, Yongjia He, Fazhou Wang, Jianxin Lu, Haibing Zheng, Shuguang Hu, Investigation on expansion effect of the expansive agents in ultra-high performance concrete, Cement and Concrete Composites, Volume 105, 2020, 103425, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103425>.
10. Shuling Gao, Zhe Wang, Wenchang Wang, Huafang Qiu, Effect of shrinkage-reducing admixture and expansive agent on mechanical properties and drying shrinkage of Engineered Cementitious Composite (ECC), Construction and Building Materials, Volume 179, 2018, Pages 172-185, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.203>.
11. S. Samchenko and D. Zorin Influence of calcium sulphoalumino-ferrite on the cement stone structure E3S Web Conf., 164 (2020) 14002
12. Samchenko S.V., Kuznetsova T.V. Resistance of the calcium sulphoaluminate phases to carbonation // Cement, Wapno, Beton. 2014. No. 5. Pp. 317-322. WOS:000342730100004

#### References:

1. Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V. Sulfate-bearing solid solution of calcium aluminates and ferrites. 9th International Congress on the Chemistry of Cement. New Delhi. 1992. Vol. 3. Pp. 201-215.
2. Osokin A.P., Krivoborodov Y.R., Samchenko S.V. Melt structure and properties clinkers containing calcium sulfoferrites and sulphoalumoferrites. 10th International Congress on the Chemistry of Cement. Gothenburg. 1997. Vol. 1. 8 pp.
3. Kuznetsova T.V., Talaber Y. Aluminous cements. Moscow: Stroymaterialy. 1988. 272 p. (In Russian).
4. Hiroshi Sasano, Ippei Maruyama, Mechanism of drying-induced change in the physical properties of concrete: A mesoscale simulation study, Cement and Concrete Research, Volume 143, 2021, 106401, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106401>.
5. Wioletta Soja, Fabien Georget, Hamed Maraghechi, Karen Scrivener, Evolution of microstructural changes in cement paste during environmental drying, Cement and Concrete Research, Volume 134, 2020, 106093, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106093>.
6. D.P. Bentz, M.R. Geiker, K.K. Hansen, Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars, Cement and Concrete Research, Volume 31, Issue 7, 2001, Pages 1075-1085, ISSN 0008-8846, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00519-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00519-1).
7. Pengcheng Lv, Guangcheng Long, Youjun Xie, Jianwei Peng, Shulai Guo, Study on the mitigation of drying shrinkage and crack of limestone powder cement paste and its mechanism, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134325, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134325>.
8. Wenyan Zhang, Huaxia Lin, Mengfen Xue, Shuai Wang, Junsheng Ran, Faqiang Su, Jianping Zhu, Influence of shrinkage reducing admixtures on the performance of cementitious composites: A review, Construction and Building Materials, Volume 325, 2022, 126579, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126579>.
9. Peiliang Shen, Linnu Lu, Yongjia He, Fazhou Wang, Jianxin Lu, Haibing Zheng, Shuguang Hu, Investigation on expansion effect of the expansive agents in ultra-high performance concrete, Cement and Concrete Composites, Volume 105, 2020, 103425, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103425>.
10. Shuling Gao, Zhe Wang, Wenchang Wang, Huafang Qiu, Effect of shrinkage-reducing admixture and expansive agent on mechanical properties and drying shrinkage of Engineered Cementitious Composite (ECC), Construction and Building Materials, Volume 179, 2018, Pages 172-185, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.203>.
11. S. Samchenko and D. Zorin Influence of calcium sulphoalumino-ferrite on the cement stone structure. E3S Web Conf., 164 (2020) 14002
12. Samchenko S.V., Kuznetsova T.V. Resistance of the calcium sulphoaluminate phases to carbonation // Cement, Wapno, Beton. 2014. No. 5. Pp. 317-322. WOS:000342730100004

13. Julien Bizzozero, Christophe Gosselin, Karen L. Scrivener. Expansion mechanisms in calcium aluminate and sulfoaluminate systems with calcium sulfate. // *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 56. Pp. 190-202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.011> .
14. Krivoborodov Yu R., Samchenko S.V., Kuznetsova T.V. Structural Changes in Refractory Calcium Aluminate Cement Concrete // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 59. No. 2. Pp. 151–155. <https://doi.org/10.1007/s11448-018-0197-1> .
15. 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. №. 13. С. 99-101.
16. Трофимов К. В. Исследование свойств цементного камня с добавкой трепел. Научный поиск: материалы восьмой научной конференции аспирантов и докторантов. Челябинск. 2016. С. 41-46.
17. Jing Yang, Peng Hou, Yong Pan, Honglei Zhang, Caiqian Yang, Wan Hong, Kefeng Li, Shear behaviors of hollow slab beam bridges strengthened with high-performance self-consolidating cementitious composites, *Engineering Structures*, Volume 242, 2021, 112613, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112613> .
18. M. Iqbal Khan, S. Umer Sial, Galal Fares, Mohamed El-Gawady, Shehab Mourad, Yousef Alharbi, Flexural performance of beams strengthened with a strain-hardening cementitious composite overlay, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 17, 2022, e01645, ISSN 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01645> .
19. Самченко С.В. Формирование и генезис структуры цементного камня: монография. М.: МГСУ, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ. 2016. 248 с.
20. Кузнецова Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы. М: Стройиздат. 1986. 208 с.
21. Кузнецова Т. В., Сычев М. М., Осокин А. П., Корнеев В. И., Судакас Л. Г. Специальные цементы. СПб.: Стройиздат. 1997. 314 с.
22. Нгуен Зоан Тунг Лам, Самченко С. В., Танг Ван Лам, Щвецова В. А. Оптимизация пропорций композиционного вяжущего с комплексными добавками // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 427–437. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.3.427-437> .
23. Хартман К., Лецкий Э.К., Шефер В., Лецкая Н.С., Фомин Г.А. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. 552 с.
24. Nguyễn Minh Tuyền. Quy hoạch thực nghiệm. Hà Nội: NXB Khoa học và Kỹ thuật. 2007. 264 tr.
25. Александрова О.В., Матеевич Т.А., Кирьянова Л.В., Соловьев В.Г. Статистические методы решения технологических задач: учебное пособие. М.: Изд-во МГСУ. 2017. 153 с.
26. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. Москва: Наука. 1983. 416с.
13. Julien Bizzozero, Christophe Gosselin, Karen L. Scrivener. Expansion mechanisms in calcium aluminate and sulfoaluminate systems with calcium sulfate. *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 56. Pp. 190-202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.011> .
14. Krivoborodov Yu R., Samchenko S.V., Kuznetsova T.V. Structural Changes in Refractory Calcium Aluminate Cement Concrete. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 59. No. 2. Pp. 151–155. <https://doi.org/10.1007/s11448-018-0197-1> .
15. Rakhimov R.Z., Kamalova Z.A., Ermilova E.Yu., Stoyanov O.V. Thermally treated tripoli as an active mineral additive in cement. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Vestnik of the Kazan Technological University]*. 2014. N. 13. Pp. 99-101. (In Russian).
16. Trofimov K. V. Investigation of the properties of cement stone with the addition of tripoli. *Scientific search: materials of the eighth scientific conference of graduate students and doctoral students*. Chelyabinsk. 2016. Pp. 41-46. (In Russian).
17. Jing Yang, Peng Hou, Yong Pan, Honglei Zhang, Caiqian Yang, Wan Hong, Kefeng Li, Shear behaviors of hollow slab beam bridges strengthened with high-performance self-consolidating cementitious composites, *Engineering Structures*, Volume 242, 2021, 112613, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112613> .
18. M. Iqbal Khan, S. Umer Sial, Galal Fares, Mohamed El-Gawady, Shehab Mourad, Yousef Alharbi, Flexural performance of beams strengthened with a strain-hardening cementitious composite overlay, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 17, 2022, e01645, ISSN 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01645> .
19. Samchenko, S.V. Formirovaniye i genезis struktury tsementnogo kamnya [Formation and genesis of the structure of cement paste]; monografiya. M.: MGSU, Ay Pi Er Media, EBS ASV. 2016. 248 p. (In Russian).
20. Kuznetsova T.V. Alyuminatnye i sul'foalyuminatnye tsementy [Aluminate and sulfoaluminate cements]. Moscow: Stroyaterialy. 1986. 208 p. (In Russian).
21. Kuznetsova T. V., Sychev M. M., Osokin A. P., Korneev V. I., Sudakas L. G. Spetsial'nye semynty [Special cements]. SPb.: Stroizdat. 1997. 314 p. (In Russian).
22. Nguyen Doan Tung Lam, Samchenko S. V., Tang Van Lam, Shvetsova V. A. Optimization of proportions of a composite binder that has multi-component additives. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023. Vol. 18. Iss. 3. C. 427–437. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.3.427-437> (In Russian).
23. Khartman K., Letskii E.K., Shefer V., Letskaya N.S., Fomin G.A. Planirovanie eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow: Mir. 1977. 552 p. (In Russian).
24. Nguyen Minh Tuyen. Quy hoạch thực nghiệm [Experimental Planning]. Hanoi: Science and Technology Publishing House. 2007. 264 p. (In Vietnamese).
25. 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 p. (In Russian).

26. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. Mathematical statistics tables. Moscow: Nauka [The science]. 1983. 416 p. (In Russian).

---

*Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».*

**Нгуен Зоан Тунг Лам** – аспирант кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»),  
E-mail: [nguyendoantunglam1110@gmail.com](mailto:nguyendoantunglam1110@gmail.com)

**Самченко Светлана Васильевна** – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»),  
E-mail: [samchenko@list.ru](mailto:samchenko@list.ru)

**Зорин Дмитрий Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»), E-mail: [dim-z@yandex.ru](mailto:dim-z@yandex.ru)

**Сизяков Иван Дмитриевич** – аспирант кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»),  
E-mail: [SizyakovID@mgsu.ru](mailto:SizyakovID@mgsu.ru)

**Ву Ким Зиен** – кандидат технических наук, Колледж промышленности и строительства (CIC), г. Уонг Би, Вьетнам, E-mail: [kimdiexdtb@gmail.com](mailto:kimdiexdtb@gmail.com)

**Вклад авторов:** Самченко С.В. - идея, научное руководство, научное редактирование статьи; Нгуен Зоан Тунг Лам – разработка методик, обработка материала, написание статьи; Зорин Д.А. – разработка методик, обработка материала, написание статьи; Сизяков И.Д. – обработка материала, написание статьи, Ву Ким Зиен – научное руководство, научное редактирование статьи.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Nguyen Doan Tung Lam** – Postgraduate student, Department of building materials science, National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU),  
E-mail: [nguyendoantunglam1110@gmail.com](mailto:nguyendoantunglam1110@gmail.com)

**Samchenko Svetlana Vasilevna** – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department of building materials science, National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU),  
E-mail: [samchenko@list.ru](mailto:samchenko@list.ru)

**Zorin Dmitriy Aleksandrovich** – Candidate of technical sciences, Associate professor Department of building materials science, National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU),  
E-mail: [dim-z@yandex.ru](mailto:dim-z@yandex.ru)

**Sizyakov Ivan Dmitrievich** – Postgraduate student, Department of building materials science, National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), E-mail: [SizyakovID@mgsu.ru](mailto:SizyakovID@mgsu.ru)

**Vu Kim Dien** - Candidate of Technical Sciences, College of industrial and constructional (CIC), Uong Bi, Viet Nam. E-mail: [kimdiexdtb@gmail.com](mailto:kimdiexdtb@gmail.com)

**Contribution of the author:** S.V. Samchenko – idea, scientific guidance, scientific editing of the article; Nguyen Doan Tung Lam – development of methods, processing of material, writing of the article; D.A. Zorin – development of methods, material processing, article writing; I.D. Sizyakov – processing of material, writing the article, Vu Kim Dien – scientific guidance, scientific editing of the article.

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