

УДК 691.32

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.35

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN APRIER

DOI 10.62980/2076-0655-2025-4-15

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО ДЛЯ БЕТОНОВ СУХОГО ЖАРКОГО КЛИМАТА

Ларсен А.О.<sup>1</sup>, Иноземцев С.С.<sup>1</sup>, Иноземцев А.С.<sup>1</sup>, Альобаиди Д.А.Н.<sup>1</sup>, Никулина К.С.<sup>1</sup>, Раббаа И.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

---

### АННОТАЦИЯ

Сухой жаркий климат оказывает значительное влияние на свойства бетонов. В работе представлены результаты экспериментальных исследований при разработке состава композиционного вяжущего, состоящего из портландцемента и доломитового микронаполнителя, полученного активацией отсева дробления доломита в шаровой лабораторной мельнице. Содержание доломитового наполнителя в портландцементе составило 10, 30 и 50%. Показано, что доломитовый микронаполнитель при его содержании в вяжущем, в количестве более 10%, снижает прочность на сжатие. Установлено, что доломитовый наполнитель снижает водопотребность, сокращает время схватывания и уменьшает усадку композиционного вяжущего при твердении. Для оптимизации состава применялся двухфакторный композиционный (ротatableльный) эксперимент с квадратичной моделью, обеспечивающий максимальную прочность при достижении требуемых технологических показателей. Установлен оптимальный состав композиционного вяжущего, состоящего из 67% портландцемента и 23 % доломитового микронаполнителя с удельной поверхностью 600 см<sup>2</sup>/г. Поэтому для повышения трещиностойкости бетона применение доломитового наполнителя в составе композиционного вяжущего для бетонов сухого жаркого климата актуально, что связано с его меньшей усадкой при твердении.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** бетон, карбонатные материалы, отсев дробления доломита, микронаполнитель, композиционное вяжущее, портландцемент

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Ларсен А.О., Иноземцев С.С., Иноземцев А.С., Альобаиди Д.А.Н., Никулина К.С., Раббаа И.О. Оптимизация состава композиционного вяжущего для бетонов сухого жаркого климата // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т.32, № 1. – С. 4-15. DOI 10.62980/2076-0655-2025-4-15, EDN APRIER

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN APRIER

DOI 10.62980/2076-0655-2025-4-15

## OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF COMPOSITE BINDER FOR DRY HOT CLIMATE CONCRETE

Larsen A.O.<sup>1</sup>, Inozemtsev S.S.<sup>1</sup>, Inozemtsev A.S.<sup>1</sup>, Alobaidi D.A.N.<sup>1</sup>, Nikulina K.S.<sup>1</sup>, Rabbaa I.O.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University.

---

### ABSTRACT

A hot dry climate has a significant impact on the properties of concrete. The paper presents the results of experimental studies in the development of the composition of a composite binder consisting of Portland cement and a dolomite micro-filler obtained by activating the screening of dolomite crushing in a ball laboratory mill. The content of dolomite filler in Portland cement was 10, 30 and 50%. It has been shown that dolomite micron filler, when its content in the binder is more than 10%, reduces compressive strength. It has been found that dolomite filler reduces water consumption, reduces setting time and reduces shrinkage of the composite binder during hardening. To optimize the composition, a two-factor composite (rotatable) experiment with a quadratic model was used, which ensures maximum strength when the required technological parameters are achieved. The optimal composition of the composite binder, consisting of 67% Portland cement and 23% dolomite filler with a specific surface area of 600 cm<sup>2</sup>/g, has been established. Therefore, to increase the crack resistance of concrete, the use of dolomite filler as part of a composite binder for concrete in dry, hot climates is relevant, due to its lower shrinkage during hardening.

**KEY WORDS:** concrete, carbonate materials, dolomite quarry waste, filler, blended binder, Portland cement

**FOR CITATION:** Larsen A.O., Inozemtsev S.S., Inozemtsev A.S., Alobaidi D.A.N., Nikulina K.S., Rabbaa I.O. Optimization of the composition of a blended binder for hot dry climate concrete // Technique and technology of silicates. – 2025. Vol. – 32, No1. – Pp. 4 – 15. DOI 10.62980/2076-0655-2025-4-15, EDN APRIER

## ВВЕДЕНИЕ

Сухой жаркий климат оказывает значительное влияние на свойства бетонов, что связано с повышенной температурой и низкой относительной влажностью окружающей среды, прямым солнечным излучением, которые приводят к быстрому испарению воды из свежеложенной бетонной смеси. Такие условия твердения оказывают негативное влияние, что приводит к ухудшению свойств, быстрой потере подвижности, преждевременному схватыванию, значительной усадке и растрескиванию бетонов.

Повышенные температуры и интенсивное испарение воды с поверхности свежеложенной бетонной смеси влекут за собой увеличение деформаций пластической усадки, которая в дальнейшем переходит в усадку высыхания, приводящую к растрескиванию изделий, изменению структуры бетона и снижению их физико-механических показателей. К основным факторам, влияющим на пластическую усадку, относятся водоцементное отношение, содержание тонкодисперсных компонентов, присутствие ускорителей и замедлителей твердения, а также пластифицирующих добавок.

Увеличение срока службы конструкций из цементных бетонов может быть достигнуто применением карбонатных пород, которые применяются для производства крупного заполнителя, дробленых песков и тонкодисперсного наполнителя, входящего в состав композиционного вяжущего и будут повышать стойкость бетона в условиях сухого жаркого климата.

Показано [0], что снижение пластической усадки и предупреждение трещинообразования происходит в случае применения полимерной фибры, роль которой заключается в снижении усадочных деформаций, предотвращении образования и распространения микротрещин и создания перемычек между ними.

Отмечается роль в снижении показателей пластической усадки быстротвердеющих высокомарочных цементов, присутствия модификаторов вязкости на основе целлюлозы. Существенное влияние на трещинообразование при пластической усадке имеет водоцементное отношение. Для уменьшения пластической усадки эффективным способом является применение суперпластификаторов [0].

Введение тонкодисперсных наполнителей в бетонную смесь в больших количествах, имеющих высокую удельную поверхность, может увеличивать пластическую усадку. Установлено [0], что введение микрокремнезема повышает трещинообразование бетона.

Тонкодисперсные карбонатные добавки, вводимые в цемент в количестве до 30 %, участвуют в формировании структуры цементного камня. Применение карбонатных добавок в бетонах способствует уменьшению водопотребности смеси, препятствует ее расслаиваемости и водоотделению, повышает их плотность и однородность, снижает усадку, водопоглощение и тепловыделение [0, 0].

Согласно полиструктурной теории [0], бетоны, изготовленные с использованием минеральных вяжущих, представляют собой полиструктурные материалы, в котором структура нижнего произвольно выбранного масштабного уровня является элементом структуры более высокого уровня. Оптимизация режимов формирования отдельных структур и полиструктуры определяет технологию изготовления бетонов. Микроструктура бетона формируется при совместном взаимодействии минерального вяжущего, воды, микронаполнителя и пластифицирующей добавки. Свойства

## INTRODUCTION

A hot dry climate has a significant impact on the properties of concrete, which is associated with increased ambient temperature and low relative humidity, and direct sunlight, which lead to rapid evaporation of water from the freshly laid concrete mix. Such hardening conditions have a negative impact, which leads to deterioration of properties, rapid loss of mobility, premature setting, significant shrinkage and cracking of concrete.

Elevated temperatures and intense evaporation of water from the surface of the freshly laid concrete mix entail an increase in plastic shrinkage deformations, which later turns into drying shrinkage, leading to cracking of products, a change in the structure of concrete and a decrease in their physical and mechanical properties. The main factors affecting plastic shrinkage include the water-cement ratio, the content of finely dispersed components, the presence of accelerators and retarders of hardening, as well as plasticizing additives.

An increase in the service life of cement concrete structures can be achieved by using carbonate rocks, which are used to produce coarse aggregate, crushed sands and finely dispersed filler, which is part of the composite binder and will increase the resistance of concrete in a dry, hot climate.

It was shown [1] that reduction of plastic shrinkage and prevention of cracking occurs when using polymer fiber, the role of which is to reduce shrinkage deformations, prevent the formation and spread of microcracks and create bridges between them.

The role of cellulose-based viscosity modifiers in reducing the plastic shrinkage of fast-hardening high-quality cements is noted. The water-cement ratio has a significant effect on cracking during plastic shrinkage. To reduce plastic shrinkage, the use of superplasticizers is an effective way [2].

The introduction of the fillers into the concrete mix in large quantities having a high specific surface area can increase plastic shrinkage. It was established [3] that the introduction of silica increases the cracking of concrete.

Finely dispersed carbonate additives introduced into cement in an amount of up to 30% are involved in the formation of the cement stone structure. The use of carbonate additives in concrete helps to reduce the water consumption of the mixture, prevents its delamination and water separation, increases their density and uniformity, reduces shrinkage, water absorption and heat dissipation [4, 5].

According to the polystructural theory [6], concretes made using mineral binders are polystructural materials in which the structure of the lower arbitrarily selected scale level is an element of the structure of a higher level. Optimization of the modes of formation of individual structures and polystructure determines the technology of concrete production. The microstructure of concrete is formed by the combined interaction of a mineral binder, water, a micro filler and a plasticizing additive. The properties of the microstructure depend on the

микроструктуры зависят от количественного соотношения между минеральным вяжущим, микронаполнителем, водой, их дисперсностью и физико-химической активностью наполнителя [0]. В микроструктуре преобладающая роль отводится степени наполнения, дисперсности и активности микронаполнителя [0]. Содержание микронаполнителя разной дисперсности может находиться в широких пределах. При этом вяжущее является основным структурообразующим компонентом.

При производстве доломитовых заполнителей образуется значительное количество отходов. Отсевы дробления щебня из карбонатных пород зачастую представлены гранулометрическим составом, который не соответствует требованиям стандартов для их применения в бетоне. Введение пылевидной части отсева с размером частиц менее 0,160 мм в качестве микронаполнителя в бетон нецелесообразно из-за различной дисперсности и присутствия частиц пылевидной фракции от 32 до 365 мкм (рис. 1).

quantitative ratio between the mineral binder, micro-filler, water, their dispersion and the physico-chemical activity of the filler [7]. In the microstructure, the predominant role is assigned to the degree of filling, dispersion and activity of the micro filler [8]. The content of different dispersion can be in wide ranges. In this case, the binder is the main structure-forming component. A significant amount of waste is generated during the production of dolomite aggregates. Screening of crushed stone from carbonate rocks is often represented by a granulometric composition that does not meet the requirements of standards for their use in concrete.

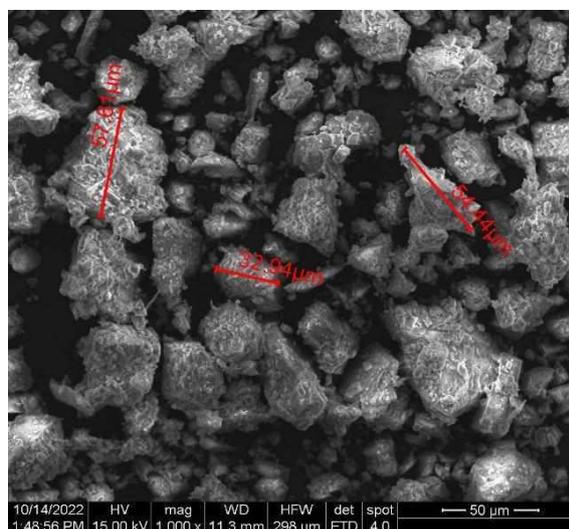
The introduction of a pulverized part of the screening with a particle size of less than 0.160 mm as a micron filler into concrete is impractical due to the different dispersion and the presence of particles of a pulverized fraction from 32 to 365  $\mu\text{m}$  (Fig. 1).

## РИСУНОК 1

### МИКРОСТРУКТУРА ПЫЛЕВИДНОЙ ФРАКЦИИ ОТСЕВА ДРОБЛЕНИЯ ДОЛОМИТА

Figure 1

Microstructure of the dust grains of dolomite quarry waste



Введение микронаполнителей в состав вяжущего оказывает влияние на увеличение плотности цементного камня и способствует упрочнению контактной зоны [0]. Особую роль в составе цементов на основе портландцементного клинкера выполняют карбонатные добавки, оказывающие влияние на формирование прочности цементного камня [0, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, 0].

Для стабилизации состава и свойств наполнителей на основе промышленных отходов применяются специальные технологические приемы, включающие их активацию, в результате которой возрастает реакционная способность наполнителей, повышается их однородность, ускоряются химические реакции как между твердофазными компонентами, так и между твердыми и жидкими, наблюдаются изменения состава и строения измельченного вещества.

Повышенное содержание вяжущего и микронаполнителя в бетоне при низком водосодержании в присутствии суперпластификатора ведет к образованию тонкозернистого геля, способствующего снижению пористости твердой фазы. Гидратация вяжущего происходит в стесненном пространстве при низком водовязущем

The introduction of the fillers into the binder has an effect on increasing the density of cement stone and helps to strengthen the contact zone [9]. A special role in the composition of cements based on Portland cement clinker is played by carbonate additives, which affect the formation of the strength of cement stone [10, 11, 12].

To stabilize the composition and properties of the fillers based on industrial waste, special technological techniques are used, including their activation, as a result of which the reactivity of the fillers increases, their uniformity increases, chemical reactions accelerate both between solid-phase components and between solid and liquid, changes in the composition and structure of the crushed substance are observed.

The increased content of binder and micro filler in concrete with low water content in the presence of a superplasticizer leads to the formation of a fine-grained gel, which helps to reduce the porosity of the solid phase. The hydration of the binder occurs in a confined space with a low water-binding ratio, which makes it possible to obtain concretes with increased performance properties [13].

The chemical composition, dispersion, and method of introducing the micro filler into the binder affect not only the formation of the structure and properties of cement stone, but

отношении, что позволяет получать бетоны, обладающие повышенными эксплуатационными свойствами [0].

Химический состав, дисперсность и способ введения микронаполнителя в состав вяжущего оказывают влияние не только на формирование структуры и свойств цементного камня, но и водопотребность вяжущего [0]. В работе [0] показано, для увеличения удельной поверхности и получения химически активного доломитового наполнителя была проведена механическая активация. В данной работе было изучено влияние активированного доломитового микронаполнителя на свойства композиционного вяжущего. Было показано, что под воздействием механической активации размер частиц наполнителя снижается с 55,78 до 1,4 мкм при изменении его удельной поверхности с 206,5 до 639,9 м<sup>2</sup>/кг.

Отмечается [0], что при введении карбонатных наполнителей водопотребность портландцемента снижается [0]. Присутствие мелких глинистых частиц в карбонатном наполнителе, а также более плотная упаковка частиц в композиционном вяжущем [0, 0] влияют на подвижность раствора, которая может как уменьшаться, так и увеличиваться в зависимости от происхождения и количества карбонатного наполнителя. Это связано с небольшой шероховатостью поверхности, которая уменьшает трение между частицами. Карбонатные породы, такие как кальцит, мел и доломит, имеют круглую или близкую к сферической форму частиц.

Для уменьшения усадочных трещин бетона в сухом жарком климате необходимо уменьшить водоцементное отношение и содержание цементного теста. Повышение трещиностойкости бетона возможно путем применения композиционного вяжущего на основе портландцемента и доломитового микронаполнителя, получаемого путем активации отходов доломитового карьера.

**Целью исследования** является оптимизация состава композиционного вяжущего из портландцемента и доломитового микронаполнителя, а также изучение влияния доломитового наполнителя на водопотребность, сроки схватывания, прочность на сжатие, усадку, а также сравнение его характеристик с портландцементом без наполнителя.

#### **Материалы и методы исследования**

Объектом исследования в работе является цементный камень на основе композиционного вяжущего вещества. Для изготовления образцов в исследовании применялись следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ I 52,5Н «Хайделбергцемент», в соответствии с ГОСТ 31108-2020 с удельной поверхностью 377,3 м<sup>2</sup>/кг, минералогическим и химическим составом, представленными в таблице 1 и 2. Основными свойствами портландцемента являлись сроки схватывания с началом и концом схватывания: 195 и 235 мин; водопотребностью 30,2 %; прочностью на сжатие в возрасте 2 и 28 сут, равной 29,9 и 62,6 МПа соответственно;

- доломитовый микронаполнитель, химический состав которого приведен в табл. 3.

Химический анализ портландцемента и доломитового наполнителя изучался на рентгеновском анализаторе Bruker S4 Pioneer и Bruker S8 Tiger. Минералогический состав портландцемента определялся на лазерном дифрактометре Bruker D2.

also the water consumption of the binder [14]. It was shown in [15] that mechanical activation was performed to increase the specific surface area and obtain a chemically active dolomite filler. In this work, the effect of activated dolomite micro filler on the properties of a composite binder was studied. It was shown that under the influence of mechanical activation, the particle size of the filler decreases from 55.78 to 1.4 μm with a change in its specific surface area from 206.5 to 639.9 м<sup>2</sup>/kg.

It is noted [17] that with the introduction of carbonate fillers, the need for Portland cement decreases [16]. The presence of fine clay particles in the carbonate filler, as well as a denser packing of particles in the composite binder [16, 17], affect the mobility of the solution, which can either decrease or increase depending on the origin and amount of the carbonate filler. This is due to the slight surface roughness, which reduces the friction between the particles. Carbonate rocks such as calcite, chalk, and dolomite have round or near spherical particle shapes.

To reduce shrinkage cracks in concrete in dry, hot climates, it is necessary to reduce the water-cement ratio and the content of cement paste. Increasing the crack resistance of concrete is possible by using a composite binder based on Portland cement and a dolomite micro-filler obtained by activating dolomite quarry waste.

**The purpose of the study** is to optimize the composition of a composite binder made of Portland cement and dolomite filler, as well as to study the effect of dolomite filler on water consumption, setting time, compressive strength, shrinkage, as well as to compare its characteristics with Portland cement without filler.

#### **Materials and methods of research**

The object of research in this work is a cement stone based on a composite binder. The following materials were used to make the samples in the study:

- portland cement CEM I 52.5H “Heidelbergcement”, in accordance with GOST 31108-2020 with a specific surface area of 377.3 м<sup>2</sup>/ kg, mineralogical and chemical composition, presented in Tables 1 and 2. The main properties of Portland cement were the setting time with the beginning and end of setting: 195 and 235 minutes; water consumption of 30.2%; compressive strength at the age of 2 and 28 days, equal to 29.9 and 62.6 MPa, respectively;

- dolomite micron filler, the chemical composition of which is given in Table 3.

The chemical analysis of Portland cement and dolomite aggregate was studied using a Bruker S4 Pioneer and Bruker S8 Tiger X-ray analyzer. The mineralogical composition of Portland cement was determined using a Bruker D2 laser diffractometer.

ТАБЛИЦА 1. МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА ЦЕМ I 52,5Н  
«ХАЙДЕЛЬБЕРГЦЕМЕНТ РУС»

Table 1. Mineralogical composition of Portland cement CEM I 52.5N “Heidelbergcement Rus”

Минералогический состав, % Mineralogical composition, %			
C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
64	14	7	11

ТАБЛИЦА 2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА ЦЕМ I 52,5Н  
«ХАЙДЕЛЬБЕРГЦЕМЕНТ РУС»

Table 2. Chemical composition of Portland cement CEM I 52.5N “Heidelbergcement Rus”

Содержание оксидов, % The content of oxides, %											
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	п.п.п.
21,23	4,78	3,31	62,95	1,65	3,22	0,66	0,12	0,08	0,28	0,06	1,60

ТАБЛИЦА 3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОЛОМИТОВОГО МИКРОНАПОЛНИТЕЛЯ  
Table 3. Chemical composition of dolomite filler

Содержание оксидов, % The content of oxides, %											
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	п.п.п.
2,12	0,69	0,32	35,56	17,38	0,15	0,19	0,08	0,01	0,03	0	45,16

#### Эксперименты и обсуждение результатов

#### Experiments and discussion

Для оптимизации состава композиционного вяжущего с доломитовым микронаполнителем был реализован двухфакторный композиционный (ротатабельный) эксперимент с квадратичной моделью. В качестве факторов варьирования были выбраны содержание микронаполнителя в вяжущем от массы цемента  $X_1$  и удельная поверхность наполнителя  $X_2$ . В табл. 4 представлены факторы, уровни и интервалы варьирования. Для расчета двухфакторного плана и обработки результатов планирования эксперимента применялся программный комплекс «Gradient» [0].

A two-factor compositional (rotatable) experiment with a quadratic model was implemented to optimize the composition of a composite binder with a dolomite filler. The content of filler in the binder from the weight of cement  $X_1$  and the specific surface area of the filler  $X_2$  were chosen as the factors of variation. Table 4 shows the factors, levels, and ranges of variation. The Gradient software package was used to calculate the two-factor plan and process the results of the experiment [18].

Общее количество экспериментальных составов составило  $N = 9$ , количество повторных опытов для каждой точки не менее  $n = 3$ . Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 5.

The total number of experimental formulations was  $N = 9$ , the number of repeated experiments for each point was at least  $n = 3$ . The results of the experiments are presented in Table 5.

ТАБЛИЦА 4. УРОВНИ И ИНТЕРВАЛЫ ВАРЬИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ  
Table 4. Levels and intervals of variation of factors

Факторы Factors		Уровни и варьирования Levels and variations			Интервал варьирования The range of variation	Единицы измерения Units of measurement
Наименование Name	Обозначение Designation	-1	0	+1		
	Кодированные единицы Coded units					
Содержание наполнителя в композиционном вяжущем	$X_1$	10	30	50	20	%
Удельная поверхность микронаполнителя	$X_2$	400	500	600	100	м <sup>2</sup> /кг

ТАБЛИЦА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ  
Table 5. Results of experiments

Точка плана The point of the plan	Значения факторов Values of the factors				$R_{28}$ , МПа $R_{28}$ , MPa	$\epsilon_{yc}$ , мм/м $\epsilon_{shr}$ , mm/m	Нормальная густота, % Standard consistency, %
	Кодированные coded		Натуральные natural				
	$X_1$	$X_2$	$X_1$	$X_2$			
1	-1	-1	10	400	77,2	2,23	30,0
2	1	-1	50	400	50,0	1,90	26,2
3	-1	1	10	600	79,9	1,92	28,0
4	1	1	50	600	57,5	1,59	24,2
5	-1,4142	0	1,72	500	77,0	2,15	29,2
6	1,4142	0	58,28	500	42,7	1,85	25,2
7	0	-1,4142	30	358,58	61,0	2,08	28,2
8	0	1,4142	30	641,42	68,1	1,87	26,2
9	0	0	30	500	63,7	1,96	27,2
10*	–	–	–	–	76,0	2,35	30,2

Примечание: \* – контрольный состав из ЦЕМ I 52,5 Н Note: \* – control composition from CEM I 52.5 N

В результате проведенных исследований были получены модели полиномиальной регрессии, описываемые уравнением (1), характеризующие зависимость основных свойств композиционного вяжущего от содержания микронаполнителя ( $X_1$ ) и его дисперсности ( $X_2$ ):

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 \quad (1)$$

Получены регрессионные модели описывают зависимости водопотребности, предела прочности на сжатие, линейных относительных деформаций усадки от указанных ранее варьируемых факторов.

Уравнение регрессии нормальной густоты имеет вид:

$$НГ (SC) = 27,24 - 0,193X_1 - X_2 + 0,067X_1^2 - 0,067X_2^2$$

Полученное уравнение регрессии свидетельствует о понижающем значении коэффициента  $X_1$ , который относится к содержанию доломитового микронаполнителя. Результаты исследования свойств композиционного вяжущего указывают на снижение водопотребности, несмотря на присутствие частиц доломитового микронаполнителя с размером частиц менее 5 мкм, что согласуется с данными других исследователей [0]. Отмечается уменьшение водопотребности цементов с карбонатными наполнителями по сравнению с водопотребностью портландцемента без наполнителя, даже при большей тонкости помола. Положительное влияние на снижение водопотребности отмечается также в работе [0] при введении карбонатного наполнителя. Увеличение содержания молотого известняка до 20 и 35 % приводит к снижению водопотребности с 26 % до 24,0...22,5 % соответственно. Максимальное снижение водопотребности наблюдается при содержании наполнителя в вяжущем в количестве 50% и удельной поверхностью 600 м<sup>2</sup>/кг. При этом при введении микронаполнителя водопотребность снизилась на 20 % по сравнению с контрольным составом и имеет значение 24,2 %, что соответствует данным других исследователей [0] и объясняется более плотной упаковкой, образуемой при введении в

As a result of the conducted research, polynomial regression models were obtained, described by equation (1), characterizing the dependence of the basic properties of a blended binder on the content of a filler ( $X_1$ ) and its dispersion ( $X_2$ ):

Regression models are obtained that describe the dependences of water demand, compressive strength, and linear relative shrinkage deformations on the previously mentioned variable factors.

The regression equation of normal density has the form:

The obtained regression equation indicates a decreasing value of the coefficient  $X_1$ , which refers to the content of the dolomite microneedle. The results of the study of the properties of the composite binder indicate a decrease in water consumption, despite the presence of dolomite micron filler particles with a particle size of less than 5  $\mu\text{m}$ , which is consistent with the data of other researchers [19]. There is a decrease in the water consumption of cements with carbonate fillers compared with the water consumption of Portland cement without filler, even with a higher fineness of grinding. A positive effect on reducing water consumption is also noted in [20] with the introduction of a carbonate filler. An increase in the content of ground limestone to 20 and 35% leads to a decrease in water consumption from 26% to 24.0...22.5%, respectively. The maximum reduction in water consumption is observed when the filler content in the binder is 50% and the specific surface area is 600 м<sup>2</sup>/kg. At the same time, when a micro-filler was introduced, the water consumption decreased by 20% compared to the control composition and has a value of 24.2%, which corresponds to the data of other researchers [20] and is explained by the denser packaging formed when a dolomite filler with an average

портландцемент со средним размером частиц 22,9 мкм доломитового микронаполнителя со средним размером частиц 1,4 мкм, и вытеснением части жидкости из межзернового пространства [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. При введении от 30 до 50 % наполнителя с удельной поверхностью 600 м<sup>2</sup>/кг водопотребность снижается от 13 до 20 %, что подтверждается данными других исследователей [0]. Это можно объяснить присутствием частиц размером 1,4 мкм в большем количестве, лучшей плотностью упаковки частиц, что также соответствует данным других исследователей [0, 0].

Уравнение регрессии прочности на сжатие в возрасте 28 сут. имеет вид:

$$R_{28} = 63,7 - 12,26X_1 + 2,53X_2 + 1,2X_1X_2 - 0,94X_1^2 + 1,41X_2^2$$

Согласно [0], композиционные цементы с содержанием 20 % доломитового и известнякового микронаполнителя имеют более низкую прочность на сжатие, чем портландцемент без наполнителя, независимо от времени твердения. Указанная зависимость прослеживается в установленных уравнениях регрессии (отрицательный коэффициент перед  $X_1$ ). Однако, исследование влияния удельной поверхности наполнителя и его содержания на прочностные свойства композиционного вяжущего в возрасте 28 сут. твердения показало, что наибольшая прочность, равная 79,9 МПа в возрасте 28 сут. твердения, достигается при содержании 10% доломитового наполнителя с удельной поверхностью 600 м<sup>2</sup>/кг по сравнению с контрольным составом (76,0 МПа). О существенно меньшем по величине и противоположном по направлению влиянию указывает коэффициент перед  $X_2$ . При введении 10% доломитового микронаполнителя не наблюдается существенного увеличения прочности на сжатие, несмотря на снижение содержания химически активной цементной составляющей в композиционном вяжущем. Прочностные свойства также не снижаются при введении 10 % микронаполнителя с удельной поверхностью 400 м<sup>2</sup>/кг. Подобной эффект может быть связан с уменьшением водопотребности вяжущего. Дополнительно повышение прочности композиционного вяжущего в присутствии доломитового микронаполнителя может объясняться проявлением им химической активности, что связано с присутствием карбоната кальция (CaCO<sub>3</sub>) в доломите [0]. Карбонат кальция в небольших количествах может вступать в реакцию с алуминатами клинкера с образованием гидрокарбонатов [0, 0], которые, в свою очередь, повышают стойкость этtringита [0, 0, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. При взаимодействии трехалюминатового алюмината цемента и тонко измельченного карбоната кальция образуется гидрокарбоалюминат кальция 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaCO<sub>3</sub>·12H<sub>2</sub>O [0,29], который способствует формированию кристаллической структуры затвердевшей цементной матрицы. Появление дополнительных кристаллических кристаллогидратов в структуре первоначально формирующегося цемента обеспечивает формирование более плотной, затвердевшей структуры цементного теста, уменьшает капиллярную пористость и улучшает структуру поверхности в зоне межфазного перехода между наполнителем и цементным тестом [17]. Это утверждение может объяснить увеличение прочности. Снижение прочности связано с высоким содержанием наполнителя, а также с эффектом «разбавления», который наблюдается при высоком содержании наполнителя в количестве от 30 до 50 %, в результате чего прочность цемента снижается в возрасте 28

particle size of 1.4 μm was introduced into Portland cement with an average particle size of 22.9 μm, and the displacement of part of the liquid from the intergranular space [21]. With the introduction of 30 to 50% filler with a specific surface area of 600 m<sup>2</sup>/kg, water consumption decreases from 13 to 20%, which is confirmed by the data of other researchers [23]. This can be explained by the presence of particles with a size of 1.4 μm in a larger number, a better packing density of particles, which also corresponds to the data of other researchers [13, 23].

The regression equation of compressive strength at the age of 28 days. it has the form:

According to [24], composite cements with a content of 20% dolomite and limestone fillers have lower compressive strength than Portland cement without filler, regardless of the curing time. This dependence can be traced in the established regression equations (negative coefficient before  $X_1$ ). However, a study of the effect of the specific surface area of the filler and its content on the strength properties of the composite binder at the age of 28 days of hardening showed that the highest strength was 79.9 MPa at the age of 28 days. Hardening is achieved with a content of 10% dolomite filler with a specific surface area of 600 m<sup>2</sup>/kg compared to the control composition (76.0 MPa). A significantly smaller and opposite influence is indicated by the coefficient before  $X_2$ . With the introduction of 10% dolomite micron filler, there is no significant increase in compressive strength, despite a decrease in the content of the chemically active cement component in the composite binder. The strength properties also do not decrease with the introduction of 10% μm filler with a specific surface area of 400 m<sup>2</sup>/kg. This effect may be associated with a decrease in the water consumption of the binder. Additionally, an increase in the strength of the composite binder in the presence of a dolomite microneedle may be explained by its chemical activity, which is associated with the presence of calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) in dolomite [15]. Calcium carbonate in small amounts can react with clinker aluminates to form bicarbonates [20, 26], which, in turn, increase the resistance of ettringite [25, 26, 27]. The interaction of tricalcium cement aluminate and finely ground calcium carbonate forms calcium dicarboaluminate 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaCO<sub>3</sub>·12H<sub>2</sub>O [28,29], which contributes to the formation of the crystalline structure of the hardened cement matrix. The appearance of additional crystalline hydrates in the structure of the initially formed cement ensures the formation of a denser, hardened cement paste structure, reduces capillary porosity and improves the surface structure in the zone of interfacial transition between the filler and cement paste [17]. This statement may explain the increase in strength. The decrease in strength is associated with a high filler content, as well as with the "dilution" effect, which is observed with a high filler content in the amount of 30 to 50%, resulting in a decrease in cement strength at the age of 28 days by 10 and 24%, respectively. With a filler content of 30 to 50%, dolomite filler acts as an inert material that weakens the original cement structure and leads to a decrease in strength.

сут. на 10 и 24 % соответственно. При содержании наполнителя в количестве от 30 до 50 % доломитовый наполнитель выступает как инертный материал, который ослабляет первоначальную структуру цемента и приводит к снижению прочности.

Уравнение регрессии линейных относительных деформаций усадки имеет вид:

$$\varepsilon_{yc} = 1,963 - 0,136X_1 - 0,114X_2 - 0,001X_1X_2 + 0,0013X_1^2 - 0,0138X_2^2$$

Полученные уравнения регрессии демонстрирует общий положительный эффект на снижение деформаций усадки. В одинаковой степени для варьируемых факторов отмечается наличие отрицательных коэффициентов. Установлено, что минимальное значение усадки имеет состав, содержащий 50 % наполнителя и имеющий удельную поверхность 600 м<sup>2</sup>/кг. Максимальные значения усадки наблюдаются у контрольного состава и состава с 10 % содержанием микронаполнителя с удельной поверхностью 400 м<sup>2</sup>/кг.

Эффективность использования композиционного вяжущего с доломитовым микронаполнителем в условиях сухого жаркого климата оценивается изменением качества, представляемым комплексной характеристикой, учитывающей как прочностные показатели в соответствии с нормативными требованиями к нему, так и показателями, отражающими особые свойства материала, в том числе пониженную водопотребность и деформативные свойства. При оценке эффективности разрабатываемого вяжущего применялся критерий качества  $k_i$ , являющийся одним из методов системного анализа и многокритериальной оптимизации [30]. Полученные критерии качества представлены в табл. 6.

$$k_i = \frac{I_i}{I_{c,i}}, \quad (2)$$

где  $I_i$  – значение свойства;  $I_{c,i}$  – контрольное значение свойства.

The regression equation of linear relative shrinkage deformations has the form:

The obtained regression equations demonstrate an overall positive effect on reducing shrinkage deformations. The presence of negative coefficients is equally noted for the variable factors. It was found that the minimum shrinkage value has a composition containing 50% filler and having a specific surface area of 600 m<sup>2</sup>/kg. The maximum shrinkage values are observed in the control composition and a composition with a 10% content of a micron filler with a specific surface area of 400 m<sup>2</sup>/kg. The effectiveness of using a composite binder with a dolomite micro-filler in a dry, hot climate is assessed by a change in quality represented by a complex characteristic that takes into account both strength indicators in accordance with regulatory requirements for it, and indicators reflecting the special properties of the material, including reduced water consumption and deformative properties. When evaluating the effectiveness of the binder being developed, the  $k_i$  quality criterion was used, which is one of the methods of system analysis and multi-criteria optimization [30]. The obtained quality criteria are presented in Table 6.

$I_i$  is the value of the property;  $I_{c,i}$  is the control value of the property.

**ТАБЛИЦА 6. КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО С ДОЛОМИТОВЫМ МИКРОНАПОЛНИТЕЛЕМ**

**Table 6. Quality criteria for composite binder with dolomite filler**

Показатель Indicator	Формула Formula	Примечание Note
Критерий прочности на сжатие	$K_{28} = \frac{R_i}{R_0}$	$R_i$ и $R_0$ – предел прочности на сжатие при возрасте 28 сут. разработанного и контрольного состава
Критерий линейных относительных деформаций усадки $Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2$	$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{yc0}}{\varepsilon_{yci}}$	$\varepsilon_{yc0}$ и $\varepsilon_{yci}$ – линейные относительные деформации усадки контрольного и разработанного состава
Критерий нормальной плотности цементного теста	$K_{НГ} = \frac{НГ_0}{НГ_i}$	$НГ_0$ и $НГ_i$ – нормальная плотность цементного теста контрольного и разработанного состава

Оценка эффективности разрабатываемого композиционного вяжущего с доломитовым микронаполнителем проводилась по обобщённому критерию качества ( $F_k$ ) с помощью аддитивно-мультипликативной функции вида [30]:

$$F_k = \sqrt[3]{K_{28} \cdot K_\varepsilon \cdot K_{НГ}}, \quad (3)$$

The efficiency of the developed composite binder with dolomite filler was evaluated according to a generalized quality criterion ( $F_k$ ) using an additive multiplicative function of the form [30]:

где  $K_{28}, K_{\epsilon}, K_{НГ}$  – коэффициенты, характеризующие водопотребность, прочность вяжущего на сжатие в возрасте 28 сут. и линейные относительные деформации усадки.

Значения обобщённого критерия качества  $F_k$  представлены в табл. 7.

$K_{28}, K_{\epsilon}, K_{SC}$  are the coefficients characterizing the water demand, compressive strength of the binder at the age of 28 days. and linear relative shrinkage deformations.

The values of the generalized quality criterion  $F_k$  are presented in Table 7.

ТАБЛИЦА 7. ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИМИЗАЦИИ

Table 7. Values of optimization parameters

Параметры Parameters	Значения Values								
$X_1$	10	50	10	50	1,72	58,28	30	30	30
$X_2$	400	400	600	600	500	500	358,58	641,42	500
$F_k$	1,03	0,98	1,11	1,12	1,05	0,95	0,99	1,09	1,04

Значения  $F_k$  использовались в дальнейшем для получения уравнения регрессии, имеющего вид:

$$F(X_1, X_2) = 1,040 - 0,023 \cdot X_1 + 0,045 \cdot X_2 - 0,015X_1 \cdot X_2 - 0,010X_1^2 + 0,010X_2^2 \quad (4)$$

Графическая интерпретация  $F(X_1, X_2)$  представлена на рис. 2. Изменение обобщённого критерия качества  $F_k$  учитывает совместное влияние факторов  $X_1$  и  $X_2$  на параметры качества композиционного вяжущего, имеющего вид экстремальной зависимости с максимумом вблизи границы фактора пространства  $S_{уд}(X_2) = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

The values of  $F_k$  were used later to obtain a regression equation having the form:

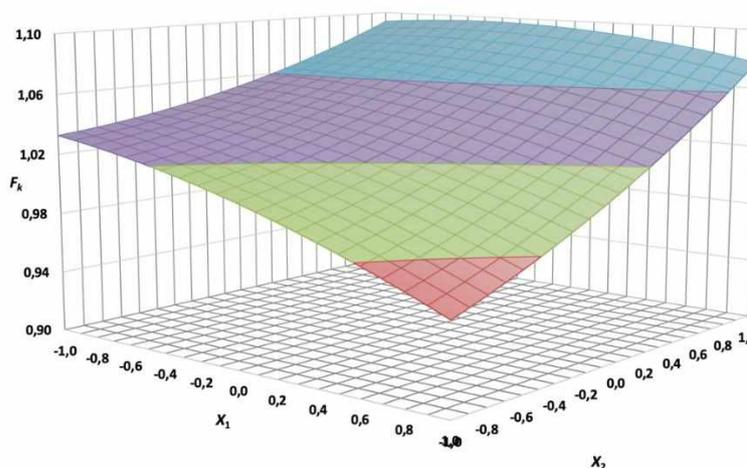
The graphical interpretation of  $F(X_1, X_2)$  is shown in Fig. 2. The change in the generalized quality criterion  $F_k$  takes into account the combined influence of factors  $X_1$  and  $X_2$  on the quality parameters of the composite binder, which has the form of an extreme dependence with a maximum near the boundary of the space factor  $S_s(X_2) = 600 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

**РИСУНОК 2.**

**ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ  
УРАВНЕНИЯ  $F(X_1, X_2)$**

Figure 2.

Graphical representation of the equation  $F(X_1, X_2)$



Анализ полученного уравнения регрессии используется в дальнейшем для оптимизации состава вяжущего путем нахождения первых производных по  $X_1$  и  $X_2$  с учетом того, что график  $X_2 \in [-1; 1]$  является допустимыми границами при помолу доломита (рис. 1). Результаты расчета показывают соответствие  $F \rightarrow \max$  при  $X_1 = 23\%, X_2 = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Указанные технологические параметры позволили получить композиционное вяжущее с лучшими параметрами качества. Полученные значения концентрации показатели удельной поверхности доломитового микронаполнителя приняты как оптимальные и использованы в дальнейших исследованиях.

The analysis of the obtained regression equation is used later to optimize the binder composition by finding the first derivatives in  $X_1$  and  $X_2$ , taking into account that the graph  $X_2 \in [-1; 1]$  is the acceptable boundaries for grinding dolomite (Fig. 1). The calculation results show the correspondence of  $F \rightarrow \max$  при  $X_1 = 23\%, X_2 = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$ . These technological parameters made it possible to obtain a composite binder with the best quality parameters. The obtained concentration values and the specific surface area of the dolomite micro filler were accepted as optimal and used in further studies.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Установлено, что увеличение содержания наполнителя в композиционном вяжущем приводит к снижению водопотребности. Максимальное снижение водопотребности наблюдается при содержании доломитового наполнителя с удельной поверхностью  $600 \text{ м}^2/\text{кг}$  в вяжущем в количестве 50 %. Водопотребность снижается на 20 % по

**CONCLUSIONS**

1. It has been established that an increase in the filler content in the composite binder leads to a decrease in water consumption. The maximum reduction in water consumption is observed when the content of dolomite filler with a specific surface area of  $600 \text{ m}^2 / \text{kg}$  in the

сравнению с портландцементным вяжущим без наполнителя.

2. Присутствие доломитового микронаполнителя в композиционном вяжущем оказывает влияние на сроки схватывания. Установлено, что композиционное вяжущее с содержанием доломитового микронаполнителя в количестве 50% и удельной поверхностью 600 м<sup>2</sup>/кг имеет самые малые сроки схватывания.

3. Установлено, что введение доломитового микронаполнителя снижает прочность на сжатие. Наибольшая прочность, равная 79,9 МПа в возрасте 28 сут твердения, достигается при содержании 10% доломитового наполнителя с удельной поверхностью 600 м<sup>2</sup>/кг по сравнению с контрольным составом (76,0 МПа).

4. Увеличение удельной поверхности наполнителя с 400 до 600 м<sup>2</sup>/кг повышает прочность вяжущего с 53,0 до 57,4 МПа, что на 25% ниже прочности портландцемента без наполнителя.

5. Установлено, что при содержании доломитового наполнителя в количестве 50% и удельной поверхностью 600 м<sup>2</sup>/кг вяжущее имеет значения линейных относительных деформаций усадки на 21% меньше по сравнению с контрольным составом.

6. Максимальные значения линейных относительных деформаций усадки наблюдаются у портландцемента без наполнителя и при содержании доломитового микронаполнителя в количестве 10 % с удельной площадью поверхности 400 м<sup>2</sup>/кг.

7. Установлен оптимальный состав композиционного вяжущего, состоящего из 77% портландцемента и 23% доломитового микронаполнителя с удельной поверхностью 600 см<sup>2</sup>/г.

#### Литература:

1. S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, L. Baquerizo, P. Lura. Susceptibility of Portland cement and blended cement concretes to plastic shrinkage cracking // *Cement and Concrete Composites*. 2018, № 85. Pp. 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.002>
2. M. Wyrzykowski, C. Di Bella, D. Sirtoli, N. Toropovs, P. Lura. Plastic shrinkage of concrete made with calcined clay-limestone cement // *Cement and Concrete Research*. 2025, N. 189, P. 107784
3. Kayondo M., Combrinck R., Boshoff W.P. State-of-the-art review on plastic cracking of concrete // *Construction and Building Materials* 2019, N. 225. Pp. 886–899.
4. Kouznetsova T.V.; Samchenko S.V. Resistance of the calcium sulphoaluminate phases to carbonation. *Cement. Wapno. Beton*, 2014, №5, Pp. 317–322.
5. L. Courard, D. Herfort, Y. Villagran. Limestone Powder, In book *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4*.
6. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов, В. Н. Выровой, А. Н. Бобрышев и др. Ташкент: Фан, 1991. - 342 с.
7. В. И. Соломатов, М. К. Тахиров, Мд. Тахер Шах. Интенсивная технология бетонов. Москва: Стройиздат, 1989. – 264 с.
8. В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, Н. А. Аббасханов. Бетон как композиционный материал: Обзор. Ташкент: УзНИИТИ, 1985. - 31 с.
9. Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: Изд-во АСВ, 2006. - 368 с.
10. Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G., Lothenbach, B. Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements // *Cement & Concrete Composites*. 46 (2014). P. 99 – 108 <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.007>

binder is 50%. Water consumption is reduced by 20% compared to a Portland cement binder without filler.

2. The presence of dolomite micron filler in the composite binder affects the setting time. It has been established that a composite binder with a dolomite micron filler content of 50% and a specific surface area of 600 м<sup>2</sup>/kg has the shortest setting time.

3. It was found that the introduction of a dolomite micro filler reduces the compressive strength. The highest strength, equal to 79.9 MPa at the age of 28 days of hardening, is achieved with a content of 10% dolomite filler with a specific surface area of 600 м<sup>2</sup>/kg compared with the control composition (76.0 MPa).

4. Increasing the specific surface area of the filler from 400 to 600 м<sup>2</sup>/kg increases the strength of the binder from 53.0 to 57.4 MPa, which is 25% lower than the strength of Portland cement without filler.

5. It was found that with a dolomite filler content of 50% and a specific surface area of 600 м<sup>2</sup>/kg, the binder has linear relative shrinkage deformations of 21% less than the control composition.

6. The maximum values of linear relative shrinkage deformations are observed in Portland cement without filler and with a dolomite micro filler content of 10% with a specific surface area of 400 м<sup>2</sup>/kg.

7. The optimal composition of a composite binder consisting of 77% Portland cement and 23% dolomite filler with a specific surface area of 600 cm<sup>2</sup>/g has been established.

#### References:

1. S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, L. Baquerizo, P. Lura. Susceptibility of Portland cement and blended cement concretes to plastic shrinkage cracking // *Cement and Concrete Composites*. 2018, № 85. Pp. 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.002>
2. M. Wyrzykowski, C. Di Bella, D. Sirtoli, N. Toropovs, P. Lura. Plastic shrinkage of concrete made with calcined clay-limestone cement // *Cement and Concrete Research*. 2025, N. 189, P. 107784
3. Kayondo M., Combrinck R., Boshoff W.P. State-of-the-art review on plastic cracking of concrete // *Construction and Building Materials* 2019, N. 225. Pp. 886–899.
4. Kouznetsova T.V.; Samchenko S.V. Resistance of the calcium sulphoaluminate phases to carbonation. *Cement. Wapno. Beton*, 2014, №5, Pp. 317–322.
5. L. Courard, D. Herfort, Y. Villagran. Limestone Powder, In book *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4*.
6. Polystructural theory of composite building materials / V.I. Solomatov, V.N. Vyrov, A.N. Bobryshev, et al. Tashkent: Fan, 1991. - 342 p.
7. V. I. Solomatov, M. K. Takhirov, Md. Taher Shah. Intensive concrete technology. Moscow: Stroyizdat, 1989. – 264 p.
8. V. I. Solomatov, V. N. Vyrovoy, N. A. Abbaskhanov. Concrete as a composite material: Review. Tashkent: UzNIINTI, 1985. - 31 p.
9. Yu. M. Bazhenov, V. S. Demyanova, V. I. Kalashnikov. Modified high-quality concrete. M.: Publishing House ASV, 2006. - 368 p.
10. Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G., Lothenbach, B. Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements // *Cement & Concrete Composites*. 46 (2014). P. 99 – 108 <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.007>

11. Самченко, С. В. Термодинамическая оценка влияния карбоната кальция на гидратацию цемента / С. В. Самченко, Н. И. Кудряшов, А. Ю. Гуркин // *Техника и технология силикатов*. – 2020. – Т. 27, № 1. – С. 6-12. – EDN WCHLDQ.
12. В.В. Тимашев, Колбасов В.И. Свойства цементов с карбонатными добавками // *Цемент*. 1981. №10, С. 10-12.
13. Samchenko, S.V.; Larsen, O.A.; Kozlova, I.V.; Alpackiy, D.G.; Alobaidi, D.A.N. Concrete Modification for Hot Weather Using Crushed Dolomite Stone. *Buildings* 2023,13,2462. <https://doi.org/10.3390/buildings13102462>
14. Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. Модифицированные высококачественные бетоны. М. : Изд-во АСВ, 2006. 368 с.
15. Ларсен О. А., Альобаиди Д. А. Н., Наруть В.В., Матюшин Е.В., Бутенко К. А., Веселов В.К. Получение доломитового микронаполнителя для бетонов, эксплуатируемых в условиях сухого жаркого климата // *Техника и технология силикатов*. 2023. Т.30. No 1. С. 56 – 65.
16. Boos, P.; Hardtl, R. *Experience Report Portland Limestone Cement*; Report HeidelbergCement Technology Center: Heidelberg, Germany, 2004; p. 34.
17. Bentz, D.P.; Jones, S.Z.; Lootens, D. Minimizing Paste Content in Concrete Using Limestone Powders – Demonstration Mixtures. National Institute of Standards and Technology; Technical Note; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA, 1906.
18. Данилов А.М., Гарькина И.А., Королева О.В., Смирнов В.А. Математические методы при разработке и управлении качеством материалов специального назначения // *Строительные материалы*. 2010. № 3. С. 112-117. EDN: MSTUCD
19. Voglis N., Kakali G., Chaniotakis E., Tsivilis S. Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements // *Cement and Concrete Composites* 27 (2005) 191–196.
20. Tsivilis S., Chaniotakis E., Badogiannis E., Pahoulas G., Ilias A. A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements // *Cement and Concrete Composites*, 1999. № 21. Pp. 107-116.
21. Новиков, Н. В. Баритсодержащие радиационно-защитные строительные материалы / Н. В. Новиков, С. В. Самченко, Г. Э. Окольников // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – Т. 21, № 1. – С. 94-98. – DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-94-98. – EDN YFXCST.
22. I. V. Topcu, H. Baylavli, The use of concrete wastes as a limestone replacement in limestone-blended cement production // *Kuwait Journal Science* 2019. 46, 2. Pp. 67-73.
23. L. Courard, R. Degeimbre, A. Darimont, F. Michel, X. Willem, S. Flamant Some effects of limestone aggregates as a partial replacement of cement in solutions of the composition. In: Banthia N (ed.) *ConMat'05 Third International Conference on Building Materials: Performance, Innovation and Design Implications*. Vancouver, Canada (2005) (August 22-24, 2005)
24. С.В. Самченко, О.В. Александрова, А.Ю. Гуркин. Свойства цементных композитов на основе известняка в зависимости от его гранулометрического состава // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. Вып. 7. С. 999–1006. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.999-1006
25. Barbhuiya, S. Effects of fly ash and dolomite powder on the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* 2011, 25(8), 3301–3305.
26. J. Stark, B. Moser, F. Bellmann, Nucleation and growth of C-S-H phases on mineral admixtures, *Advances in Construction Materials* (2007) 531-538.
27. Структурообразующая роль микрокальцита в цементных композициях для 3D-печати / Г. С. Славчева, В. А. Солонина, Ю. Ф. Панченко [и др.] // *Техника и технология силикатов*. – 2024. – Т. 31, № 4. – С. 313-322. – DOI 10.62980/2076-0655-2024-313-322. – EDN ZAQLZO.
11. Samchenko, S. V. Thermodynamic assessment of the effect of calcium carbonate on cement hydration / S. V. Samchenko, N. I. Kudryashov, A. Yu. Gurkin // *Technique and technology of silicates*. - 2020. - Vol. 27, No. 1. - Pp. 6-12. - EDN WCHLDQ.
12. V. V. Timashev, V. I. Kolbasov Properties of cements with carbonate additives // *Cement*. 1981. No. 10, Pp. 10-12.
13. Samchenko, S.V.; Larsen, O.A.; Kozlova, I.V.; Alpackiy, D.G.; Alobaidi, D.A.N. Concrete Modification for Hot Weather Using Crushed Dolomite Stone. *Buildings* 2023,13,2462. <https://doi.org/10.3390/buildings13102462>
14. Yu. M. Bazhenov, V. S. Demyanova, V. I. Kalashnikov. Modified high-quality concrete. Moscow: ASV Publishing House, 2006. 368 p.
15. Larsen O. A., Al'obaidi D. A. N., Naruts V. V., Matyushin E. V., Butenko K. A., Veselov V. K. Use of dolomite filler in concrete for dry hot climate // *Technique and technology of silicates*. 2023.Vol. 30. No 1. Pp 56 – 65.
16. Boos, P.; Hardtl, R. *Experience Report Portland Limestone Cement*; Report HeidelbergCement Technology Center: Heidelberg, Germany, 2004; p. 34.
17. Bentz, D.P.; Jones, S.Z.; Lootens, D. Minimizing Paste Content in Concrete Using Limestone Powders – Demonstration Mixtures. National Institute of Standards and Technology; Technical Note; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA, 1906.
18. Danilov A.M., Garkina I.A., Koroleva O.V., Smirnov V.A. Mathematical methods in the development and quality management of special-purpose materials // *Construction materials*. 2010. No. 3. P. 112-117. EDN: MSTUCD
19. Voglis N., Kakali G., Chaniotakis E., Tsivilis S. Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements // *Cement and Concrete Composites* 27 (2005) 191–196.
20. Tsivilis S., Chaniotakis E., Badogiannis E., Pahoulas G., Ilias A. A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements // *Cement and Concrete Composites*, 1999. № 21. Pp. 107-116.
21. Novikov, N. V. Barite-containing radiation-protective building materials / N. V. Novikov, S. V. Samchenko, G. E. Okolnikova // *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research*. - 2020. - Vol. 21, No. 1. - P. 94-98. - DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-94-98. - EDN YFXCST.
22. I. B. Topcu, H. Baylavli, The use of concrete wastes as a limestone replacement in limestone-blended cement production // *Kuwait Journal Science* 2019. 46, 2. Pp. 67-73.
23. L. Courard, R. Degeimbre, A. Darimont, F. Michel, X. Willem, S. Flamant Some effects of limestone aggregates as a partial replacement of cement in solutions of the composition. In: Banthia N (ed.) *ConMat'05 Third International Conference on Building Materials: Performance, Innovation and Design Implications*. Vancouver, Canada (2005) (August 22-24, 2005)
24. S.V. Samchenko, O.V. Aleksandrova, A.Yu. Gurkin. Properties of cement composites based on limestone depending on its granulometric composition // *Bulletin of MGSU*. 2020. Vol. 15. Issue. 7. Pp. 999–1006. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.999-1006
25. Barbhuiya, S. Effects of fly ash and dolomite powder on the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* 2011, 25(8), 3301–3305.
26. J. Stark, B. Moser, F. Bellmann, Nucleation and growth of C-S-H phases on mineral admixtures, *Advances in Construction Materials* (2007) 531-538.
27. Structure-forming role of microcalcite in cement compositions for 3D printing / G. S. Slavcheva, V. A. Solonina, Yu. F. Panchenko [et al.] // *Technique and technology of silicates*. – 2024. – Vol. 31, No. 4. – Pp. 313-322. – DOI 10.62980/2076-0655-2024-313-322. – EDN ZAQLZO.
28. Briki, Y.; Zajac, M.; Haha, M.B.; Scrivener, K. Impact of limestone fineness on cement hydration at early age. *Cement and Concrete Research*. 2021, №147. P.106515.

28. Briki, Y.; Zajac, M.; Naha, M.B.; Scrivener, K. Impact of limestone fineness on cement hydration at early age. *Cement and Concrete Research*. 2021, №147. P.106515.

29. Самченко, С. В. Карбонизация гидратных составляющих портландцемента, алюминатного и сульфоалюминатного цемента / С. В. Самченко, Е. М. Макаров // Техника и технология силикатов. – 2013. – Т. 20, № 3. – С. 27-29. – EDN REPQZR.

30. Королев Е.В. Техничко-экономическая эффективность новых технологических решений. Анализ и совершенствование // Строительные материалы. 2017. No 3. С. 85–88.

29. Samchenko, S. V. Carbonization of hydrate components of Portland cement, aluminate and sulfoaluminate cements / S. V. Samchenko, E. M. Makarov // *Technique and technology of silicates*. - 2013. - Vol. 20, No. 3. - Pp. 27-29. - EDN REPQZR.

30. Korolev E. V. Technical and economic efficiency of new technological solutions. Analysis and improvement // *Construction materials*. 2017. No. 3. Pp. 85-88.

**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».**

**The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”. Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”**

**Ларсен Оксана Александровна** – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
E-mail: [larsen.oksana@mail.ru](mailto:larsen.oksana@mail.ru)

**Иноземцев Сергей Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
E-mail: [inozemcevss@mgsu.ru](mailto:inozemcevss@mgsu.ru)

**Иноземцев Александр Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
E-mail: [inozemcevas@mgsu.ru](mailto:inozemcevas@mgsu.ru)

**Альобаиди Дия Абдулкадим Насер** – аспирант кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
E-mail: [dhevaa.alobaidi@gmail.com](mailto:dhevaa.alobaidi@gmail.com)

**Никулина Ксения Александровна** - студентка-магистр, инженер научно-исследовательского института строительных материалов и технологий ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ),  
E-mail: [butenkoka@yandex.ru](mailto:butenkoka@yandex.ru)

**Раббаа Илья Омарович** - студент-магистр, инженер научно-исследовательского института строительных материалов и технологий ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ),  
E-mail: [ilya\\_rabbaa@mail.ru](mailto:ilya_rabbaa@mail.ru)

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Larsen Oksana Alexandrovna** – PhD., Associate Professor; Federal State Educational Institution of Higher Education “National Research Moscow State University of Civil Engineering”,  
E-mail: [larsen.oksana@mail.ru](mailto:larsen.oksana@mail.ru)

**Inozemtsev Sergey Sergeevich** - PhD., Associate Professor; Federal State Educational Institution of Higher Education “National Research Moscow State University of Civil Engineering”,  
E-mail: [inozemcevss@mgsu.ru](mailto:inozemcevss@mgsu.ru)

**Inozemtsev Alexander Sergeevich** - PhD., Associate Professor; Federal State Educational Institution of Higher Education “National Research Moscow State University of Civil Engineering”,  
E-mail: [inozemcevas@mgsu.ru](mailto:inozemcevas@mgsu.ru)

**Alobaidi Diya Abdulkadim Naser** – postgraduate student, Federal State Educational Institution of Higher Education “National Research Moscow State University of Civil Engineering”,  
E-mail: [dhevaa.alobaidi@gmail.com](mailto:dhevaa.alobaidi@gmail.com)

**Nikulina Ksenia Alexandrovna** - master's student, engineer of the Research Institute of Building Materials and Technologies of Federal State Educational Institution of Higher Education “National Research Moscow State University of Civil Engineering”,  
E-mail: [butenkoka@yandex.ru](mailto:butenkoka@yandex.ru)

**Rabbaa Ilya Omarovich** - master's student, engineer of the Research Institute of Building Materials and Technologies of Federal State Educational Institution of Higher Education “National Research Moscow State University of Civil Engineering”,  
E-mail: [ilya\\_rabbaa@mail.ru](mailto:ilya_rabbaa@mail.ru)

*The authors declare that there is no conflict of interest.*