

Научно-исследовательский журнал «*Chemical Bulletin*»

<https://cb-journal.ru>

2025, Том 8, № 3 / 2025, Vol. 8, Iss. 3 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 666.9.035

DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-4-7

## Высокодисперсный модификатор цементных композитов на основе природного волластонита

<sup>1</sup> Лукутцова Н.П. \*

<sup>1</sup> Карпиков Е.Г.,

<sup>1</sup> Ковтков И.В.,

<sup>1</sup> Протасов А.В.,

<sup>1</sup> Брянский государственный инженерно-технологический университет,

\* Ответственный автор E-mail: [natluk58@mail.ru](mailto:natluk58@mail.ru)

**Аннотация: цели:** разработка высокодисперсного модификатора на основе природного волластонита, обеспечивающего получение изделий строительного назначения с улучшенными физико-механическими свойствами.

**Методы.** Оценка исходного сырья и влияния его высокодисперсной суспензии, полученной методом ультразвукового диспергирования, на структуру и свойства цементного камня и мелкозернистого бетона определялась методами регламентированными ГОСТ Р 56593-2015 и ГОСТ 10060-2012, а так же посредством сканирующей электронной микроскопии, лазерной дифракции, азотной порометрии и рентгенофазового анализа.

**Результаты.** Установлена пуццоланическая активность высокодисперсной добавки волластонита составляющая 87,3 мг/г, и подтвержденная ослаблением интенсивности рентгеновских рефлексов портландита на 18,2 % в образцах цементного камня с модификатором. Отмечается скорректированная степень морозостойкости модифицированного мелкозернистого бетона, что обусловлено целостной однородной микроструктурой и снижением общей пористости цементного камня с 0,0043 до 0,0019 см<sup>3</sup>/г, т.е. в 2,4 раза, относительно контрольных образцов, при повышенной концентрации кристаллических фаз ватерита  $\mu$ -CaCO<sub>3</sub> и вайракита Ca(AlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O. Выявлено, что цементный камень с высокодисперсным модификатором, обладает увеличенной в относительном выражении на 32,4 и 5,4 % концентрацией кристаллических фаз алита 3CaO·SiO<sub>2</sub> и белита  $\beta$ -2CaO·SiO<sub>2</sub>, соответственно.

**Выводы.** Доказана и научно обоснована возможность применения минерального порошка некондиционного природного волластонита с удельной поверхностью 45786 см<sup>2</sup>/см<sup>3</sup> и размером частиц 2,17 мкм в качестве модификатора структуры и свойств мелкозернистого бетона. Высокодисперсная суспензия волластонита со средним размером частиц 0,405 мкм, полученная методом ультразвукового диспергирования, в течение 5 минут, исходного сырья в водной среде стабилизатора на основе эфира поликарбоксилата, при содержании 10 % от массы цемента в составе мелкозернистого бетона позволяет изготавливать изделия с прочностью при изгибе 6,8 МПа, при сжатии – 58,5 МПа и маркой по морозостойкости F500.

**Ключевые слова:** волластонит, высокодисперсная суспензия, активность, цементный камень, пористость, мелкозернистый бетон, морозостойкость

**Для цитирования:** Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г., Ковтков И.В., Протасов А.В. Высокодисперсный модификатор цементных композитов на основе природного волластонита // Chemical Bulletin. 2025. Том 8. № 4. 7. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-4-7

Поступила в редакцию: 23 июня 2025 г.; Одобрена после рецензирования: 13 сентября 2025 г.; Принята к публикации: 15 ноября 2025 г.

## Highly dispersed modifier of cement composites based on natural wollastonite

<sup>1</sup> Lukutsova N.P.,

<sup>1</sup> Karpikov E.G.,

<sup>1</sup> Kovtkov I.V.,

<sup>1</sup> Protasov A.V.,

<sup>1</sup> Bryansk State Technological University of Engineering,

\* Corresponding author E-mail: [natluk58@mail.ru](mailto:natluk58@mail.ru)

**Abstract: Objectives:** development of a highly dispersed modifier based on natural wollastonite, which ensures the production of construction products with improved physical and mechanical properties.

**Methods.** The evaluation of the raw materials and the effect of their highly dispersed suspension obtained by ultrasonic dispersion on the structure and properties of cement stone and fine-grained concrete was performed using methods specified in GOST R 56593-2015 and GOST 10060-2012, as well as scanning electron microscopy, laser diffraction, nitrogen porometry, and X-ray phase analysis.

**Results.** The pozzolanic activity of the highly dispersed wollastonite additive was determined to be 87.3 mg/g, and it was confirmed by a 18.2% decrease in the intensity of Portlandite X-ray reflexes in the modified cement stone samples. The corrected frost resistance of the modified fine-grained concrete is noted, which is due to the integral homogeneous microstructure and the reduction in the total porosity of the cement stone from 0.0043 to 0.0019 cm<sup>3</sup>/g, i.e., by 2.4 times, compared to the control samples, with an increased concentration of crystalline phases of waterite  $\mu$ -CaCO<sub>3</sub> and wairakite Ca(AlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O. It was found that cement stone with a highly dispersed modifier has a relative increase of 32.4% and 5.4% in the concentration of crystalline phases of alite 3CaO·SiO<sub>2</sub> and belite  $\beta$ -2CaO·SiO<sub>2</sub>, respectively.

**Conclusions.** The possibility of using mineral powder of substandard natural wollastonite with a specific surface area of 45786 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> and a particle size of 2.17  $\mu$ m as a modifier of the structure and properties of fine-grained concrete has been proven and scientifically substantiated. A highly dispersed suspension of wollastonite with an average particle size of 0.405  $\mu$ m, obtained by ultrasonic dispersion of the initial raw material in an aqueous medium of a polycarboxylate ester-based stabilizer for 5 minutes, with a content of 10% of the cement mass in fine-grained concrete, allows for the production of products with a bending strength of 6.8 MPa, a compressive strength of 58.5 MPa, and a frost resistance rating of F500.

**Keywords:** wollastonite, highly dispersed suspension, activity, cement stone, porosity, fine-grained concrete, frost resistance

**For citation:** Lukutsova N.P., Karpikov E.G., Kovtkov I.V., Protasov A.V. Highly dispersed modifier of cement composites based on natural wollastonite. Chemical Bulletin. 2025. 8 (4). 7. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-4-7

The article was submitted: June 23, 2025; Approved after reviewing: September 13, 2025; Accepted for publication: November 15, 2025.

### Введение

В условиях развития современного строительного материаловедения, актуальным является модификация цементных систем высокодисперсными добавками, интегрирующимися в их структуру. Вместе с тем к значимым аспектам при получении эффективных модификаторов относится правильный выбор компонентов твердой фазы. Предпочтение отдается сырью, в основе которого находятся родственные минералогическому составу цемента соединения. Одним из путей решения обозначенной проблемы является исследование возможности

применения в качестве высокодисперсной составляющей – волластонита, представляющего собой природный минерал из класса метасиликатов кальция [1-6]. При этом наибольший интерес представляют фракции до 10 мкм, которые относятся к некондиционному сырью.

В современной промышленности выделяется несколько направлений применения волластонита [7]: производство керамики [8], полимеров [9, 10], окрасочных и изоляционных материалов [11], бумаги [12], в литейном производстве [13], а так же медицинском протезировании [14, 15]. Среди про-

чих достоинств минерала, таких как высокая твердость, инертность, цвет и прочее, четко выделяется микроармирующая способность, связанная с игольчатой формой кристаллов [16, 17]. Отмеченная особенность привлекает особое внимание к области изучения его влияния на свойства цементных композитов [18].

Целью работы является разработка высокодисперсного модификатора на основе природного волластонита, обеспечивающего получение изделий строительного назначения с улучшенными физико-механическими свойствами.

#### Материалы и методы исследований

В качестве исходных компонентов высокодисперсной добавки волластонита (ВДДВ) применялись: волластонит «Миволл 05-97» производства ЗАО «Геоком» (Калужская область, п. Полотняный завод, РФ); анионное поверхностно-активное вещество нафталин-формальдегидного типа «С-3» производства ГК ООО «РоссПолимер» (г. Москва,

РФ); высоководоредуцирующая/суперпластифицирующая добавка на основе эфира поликарбоксилата «Master Glenium 430» (ЭПК) производства ООО «БАСФ Строительные системы» (Московская область, Подольский район, РФ). Для изготовления мелкозернистого бетона использовался цемент с минеральной добавкой шлака ЦЕМ II/A-Ш 42,5Н ОАО «Белорусский цементный завод» (г. Костюковичи, Республика Беларусь) и заполнитель кварцевый песок ООО «Агростройинвест» (г. Брянск, РФ).

Методом сканирующей электронной микроскопии изучена микроструктура исходного волластонита, представленная кристаллами столбчатой формы, вытянутыми по длине (рис. 1). Методом лазерной дифракции выполнен гранулометрический анализ и определена удельная поверхность минерального порошка, состоящая  $45786 \text{ см}^2/\text{см}^3$  с модальным диаметром частиц  $2,17 \text{ мкм}$ . (рис. 2).

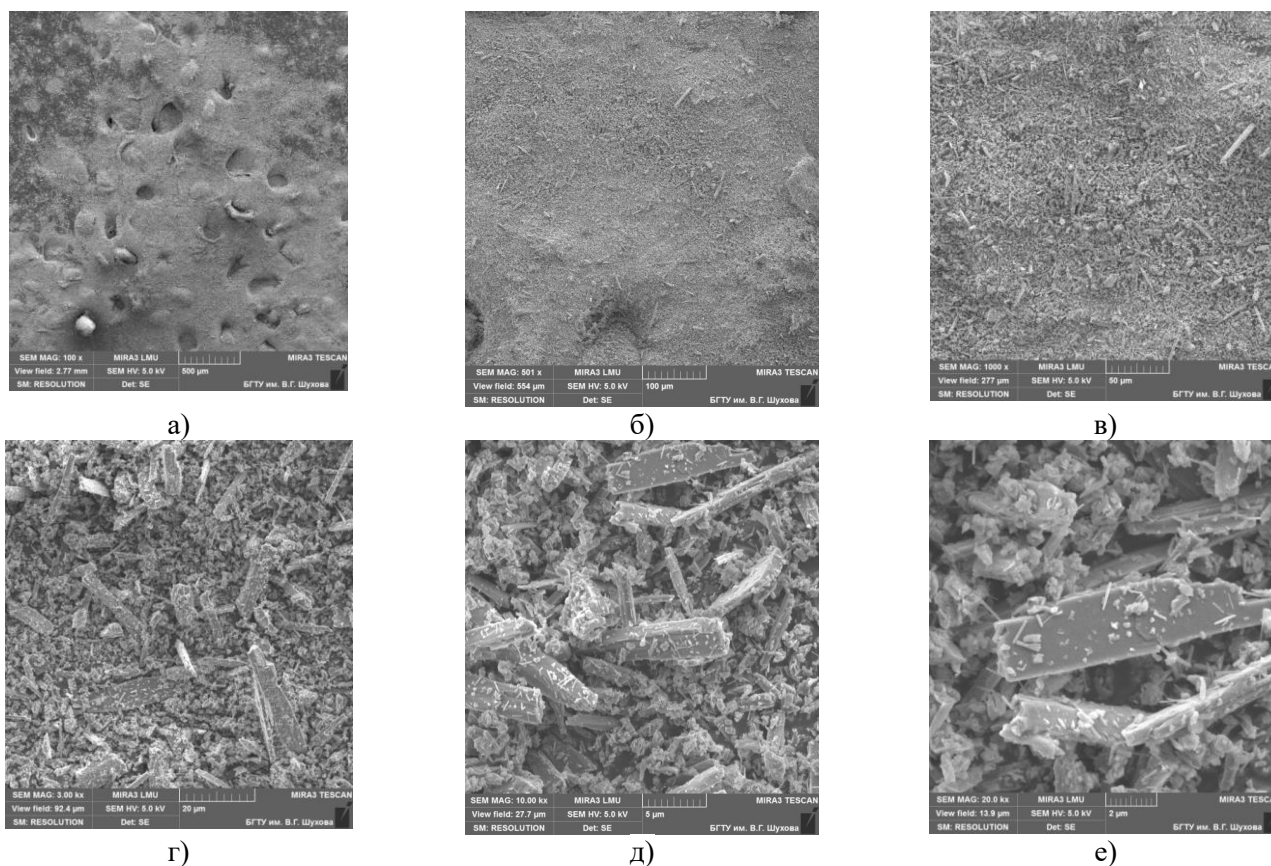


Рис. 1. Микроструктура исходного волластонита: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 500$ ; в –  $\times 1000$ ; г –  $\times 3000$ ; д –  $\times 10000$ ; е –  $\times 20000$ .

Fig. 1. Microstructure of the original wollastonite: а –  $\times 100$ ; б –  $\times 500$ ; в –  $\times 1000$ ; г –  $\times 3000$ ; д –  $\times 10000$ ; е –  $\times 20000$ .

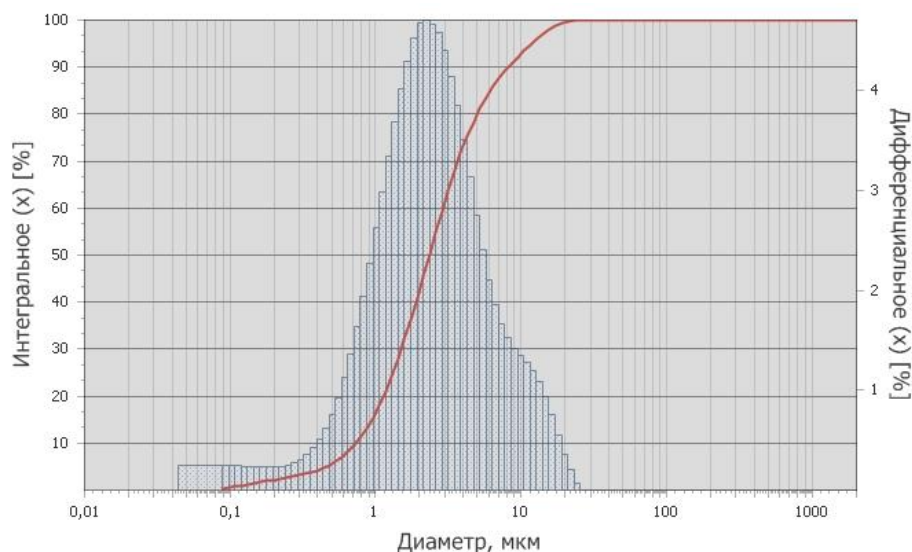


Рис. 2. Гранулометрический состав исходного волластонита.  
Fig. 2. Granulometric composition of the original wollastonite.

Получение водных суспензий высокодисперсной добавки волластонита осуществляли в активаторе ванного типа УЗВ-13/150-ТН-РИЭЛТЕК методом ультразвукового диспергирования (УЗД) при частоте 35 кГц, в водной среде стабилизатора суспензии [19, 20].

На основе ранее опубликованных исследований состава высокодисперсного модификатора [21], с применением методов математического планирования полного факторного эксперимента, а также разработанного и запатентованного компьютерного алгоритма поиска экстремальных значений координат массива Extr.sce [22] и Interp.sce [23] (приложения являются собственной запатентованной разработкой) на базе среды инженерных и научных вычислений Scilab показано, что максимальная эффективность ВДДВ достигается при содержании волластонита 5,3 г/дм<sup>3</sup> (0,53 %), стабилизированного ЭПК объемной концентрацией 2,1 см<sup>3</sup>/ дм<sup>3</sup> (0,21 %), при времени УЗД 5 минут. Разработанная добавка способствует получению мелкозернистого бетона с прочностью при изгибе 6,8 МПа и при сжатии – 58,5 МПа. В случае использования стабилизатора нафталинформальдегидного типа оптимальной концентрацией волластонита является 7,7 г/дм<sup>3</sup> (0,77 %) при содержании С-3 2,7 г/дм<sup>3</sup> (0,27 %) и времени УЗД 5 минут. Указанный состав ВДДВ позволяет изготавливать МЗБ с прочностью при изгибе 6,5 МПа и при сжатии – 44,1 МПа, при условии содержания высокодисперсного модификатора в МЗБ 10 % от массы цемента [21].

Гранулометрический анализ дисперсной фазы волластонита после ультразвуковой обработки показал, что средний размер частиц в высокодисперс-

ной суспензии достигает 0,405 мкм.

С целью изучения механизма действия полученного модификатора, методом поглощения СаО из насыщенного раствора Са(ОН)<sub>2</sub> в соответствии с ГОСТ Р 56593-2015, определена степень пуццоланической активности (ПА) ВДДВ и ее компонентов.

Количество СаО, поглощенного 1 г исследуемого образца из насыщенного раствора Са(ОН)<sub>2</sub>, рассчитывали с учетом дифференциальной поправки на изменение растворимости гидроокиси кальция при изменении температуры по формуле:

$$CaO = 1,4 \cdot 2 \cdot \left[ \frac{V_0 \cdot (V_2 - V_1)}{V_2} \right], \quad (1)$$

где 1,4 – титр раствора 0,05 моль/дм<sup>3</sup> НСl по СаО (дифференциальная поправка), мг/см<sup>3</sup>·г;

$V_0$  – объем НСl, пошедший на титрование 50 см<sup>3</sup> насыщенного раствора Са(ОН)<sub>2</sub> при температуре (20 ± 2) °С, см<sup>3</sup>;

$V_1$  – объем НСl, пошедший на титрование 50 см<sup>3</sup> анализируемого раствора при температуре 85-90 °С, см<sup>3</sup>;

$V_2$  – объем НСl, пошедший на титрование 50 см<sup>3</sup> насыщенного раствора Са(ОН)<sub>2</sub> при температуре 85-90 °С, см<sup>3</sup>.

Для расширения области применения МЗБ, модифицированного ВДДВ, исследованы его морозостойкость и пористость цементного камня (ЦК). Морозостойкость испытывали с применением второго ускоренного метода в соответствии с ГОСТ 10060-2012 путем погружения до насыщения серии основных образцов МЗБ размером 100×100×100 мм в ванну с раствором хлорида натрия массовой долей 5 % и последующим прове-

дением попеременных циклов замораживания при температуре минус  $(18 \pm 2)^\circ\text{C}$  и оттаивания – плюс  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

Образцы считают выдержавшими испытание, если соблюдается соотношение:

$$X''_{\min} \geq 0,9 X'_{\min}, \quad (2)$$

где  $X'_{\min}$  – нижняя граница доверительного интервала для контрольных образцов;

$X''_{\min}$  – нижняя граница доверительного интервала для основных образцов.

Пористости цементного камня определяли методом азотной порометрии посредством сравнения объемов газа-адсорбата, сорбируемого исследуемым и стандартным образцом материала с известной удельной поверхностью.

Распределение кристаллических фаз и их относительных концентраций в ЦК устанавливали ме-

тодом рентгено-фазового анализа (РФА) при помощи сопоставления дифракционной картины с базой эталонных дифрактограмм PDF. Массовые количества кристаллических фаз определены методом корундовых чисел в программном обеспечении PDF-4+ 2021.

### Результаты и обсуждения

Доказано, что высокодисперсная добавка волластонита обладает пуццоланической активностью 87,3 мг/г, сопоставимой с ПА неуплотненного микрокремнезема МК-65 массовой долей  $\text{SiO}_2$  не менее 65 %, в соответствие с ГОСТ Р 58894-2020 составляющей не менее 70 мг/г. В ходе исследования выявлено, что без применения ультразвуковой обработки эффективность связывания  $\text{CaO}$  в присутствии ВДДВ снижается в 2,7 раза, при этом ее компоненты в отдельности демонстрируют достаточно слабую ПА (табл. 1).

Таблица 1

Результаты определения пуццоланической активности ВДДВ.

Table 1

Results of determining the pozzolanic activity of VDDV.

Наименование	Среднее значение $V(\text{HCl})$ , $\text{cm}^3$	Пуццоланическая активность, $\text{CaO}$ , мг/г
Раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , $V_0$	41,7	-
Раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при температуре $(85-90)^\circ\text{C}$ , $V_2$	32,1	-
Анализируемый раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при температуре $(85-90)^\circ\text{C}$ , $V_2$	ВДДВ	87,3
	ВДДВ без УЗД	32,37
	Волластонит	2,44
	ЭПК	3,27

Таблица 2

Результаты испытаний образцов МЗБ, модифицированного ВДДВ.

Table 2

Test results of MZB samples modified with VDDV.

Показатель	Значение показателя			
	ВДДВ с ЭПК		ВДДВ с С-3	
	Контрольные образцы	Основные образцы	Контрольные образцы	Основные образцы
$X'_{cp}$ , МПа	43,86	–	40,12	–
$\sigma'_{cp}$ , МПа	7,83	–	11,88	–
$X''_{cp}$ , МПа	–	61,51	–	50,85
$\sigma''_{cp}$ , МПа	–	9,61	–	10,03
$V$ , %	17,5	15,5	29,5	20
$X'_{\min}$ , МПа	23,74	–	9,59	–
$X''_{\min}$ , МПа	–	36,81	–	25,04
$0,9 X'_{\min}$ , МПа	21,36	–	8,63	–

Морозостойкость модифицированного МЗБ определяли путем испытания серии контрольных и основных образцов. Отмечается, что признаков появления трещин, сколов и шелушения ребер не обнаружено. Согласно установленному соотношению между числом циклов и маркой бетона по морозостойкости принята марка F500, при этом

прочность основных образцов мелкозернистого бетона выше относительно контрольных (не замораживаемых) в 1,3 раза, в присутствии ВДДВ, стабилизированной С-3, и в 1,4 раза, в случае применения стабилизатора на основе эфира поликарбонилата (табл. 2).

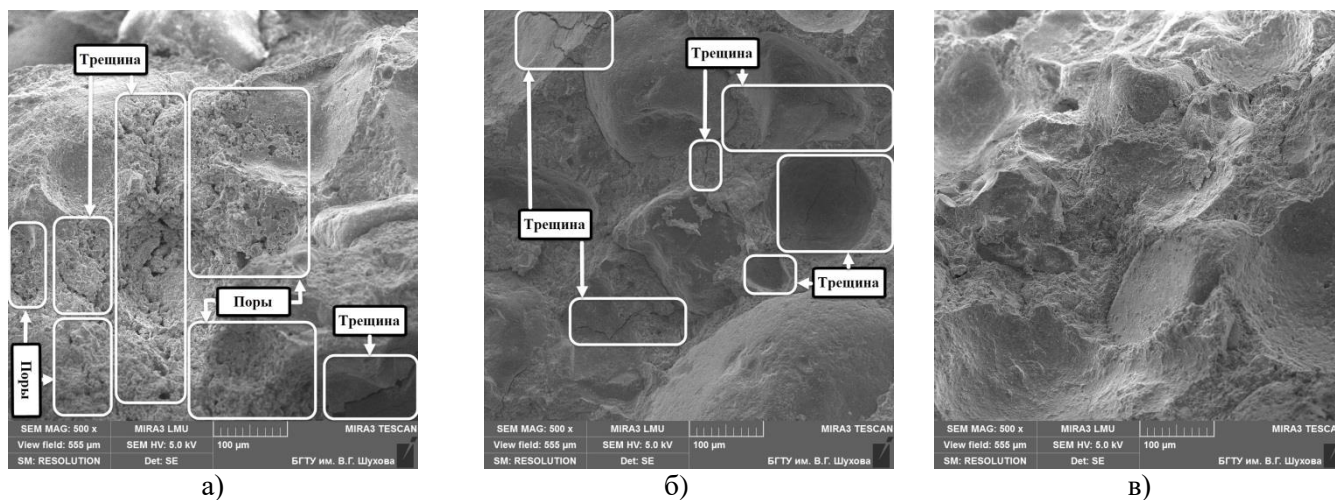


Рис. 2 на 3 исправить. Микроструктура основных образцов МЗБ (увеличение  $\times 500$ ): а – контрольный; б – модифицированный ВДДВ, стабилизированной С-3; в – модифицированный ВДДВ, стабилизированной ЭПК.

Fig. 2. Microstructure of the main samples of MZB (magnification  $\times 500$ ): a – control; b – modified VDDV, stabilized with C-3; c – modified VDDV, stabilized with EPC.

Показано, что МЗБ контрольного состава характеризуется рыхлой дефектной структурой, представленной порами и микротрещинами в стадии раскрытия (рис. 3 а). МЗБ, модифицированный ВДДВ, отличается целостным однородным строением с незначительными трещинами, при стабилизации ПАВ С-3 (рис. 3 б), или их отсутствием, при стабилизации ЭПК (рис. 3 в).

Методом азотной порометрии проанализирована пористость ЦК с ВДДВ. Установлено, что полный объем пор с радиусом меньше 94,6 нм в контрольном образце составляет  $0,0043 \text{ см}^3/\text{г}$ , при этом наибольший объем пор находится в пределах диаметров 142,29 нм – 35,6 %, 15 нм – 28,7 % и 3,5 нм – 15 %.

Модифицирующая добавка на основе волластонита, стабилизированного С-3, введенная в состав цементного камня, способствует формированию полимодального характера распределения мезопор, однако в отличие от контрольного образца преобладающими являются поры со средним диаметром 3,5 нм в количестве 48,7 % от общего объема. Вместе с тем наблюдаются поры средним диаметром 23,9, 4,4 и 8,4 нм, с содержанием 18,1, 17,8 и 13,5 % соответственно, что демонстрирует

смещение размеров в область до 20 нм и свидетельствует об уплотнении структуры цементного камня при введение в его состав ВДДВ с С-3. В то же время полный объем пор с радиусом менее 94,6 нм снижается от  $0,0043$  до  $0,0024 \text{ см}^3/\text{г}$ , т.е. в 1,8 раза, относительно контрольного образца ЦК.

Анализ цементного камня с ВДДВ стабилизированной ЭПК, выявил снижение общей пористости с  $0,0024$  до  $0,0019 \text{ см}^3/\text{г}$ , т.е. в 1,3 раза, относительно ЦК, содержащего ВДДВ с С-3, и от  $0,0043$  до  $0,0019 \text{ см}^3/\text{г}$ , т.е. в 2,4 раза, относительно контрольного немодифицированного ЦК. При этом исследуемый образец имеет мономодальный характер распределения пор, сто процентов которых обладают средним диаметром до 3,5 нм (табл. 3).

Методом РФА установлено распределение кристаллических фаз и их относительных концентраций в образцах цементного камня контрольного состава (рис. 4), модифицированного ВДДВ с ЭПК с содержанием в составе ЦК 10 % от массы цемента (рис. 4) и 100 %, взамен воды затворения (рис.6), а также стабилизированного С-3 в количестве 10 % (рис. 5) и 100 % (рис. 8). Полная замена воды затворения суспензией добавки использовалась для расширенного анализа протекающих процессов структурообразования.

Таблица 3

Дифференциальное распределение пор ЦК относительно их среднего диаметра и объема.

Table 3

Differential distribution of CC pores relative to their average diameter and volume.

Средний диаметр пор, $D_i$ , нм	Дифференциальное распределение пор относительно их среднего диаметра, $dV_i/dD_i$ , $\text{см}^3/\text{нм}\cdot\text{г}$			Дифференциальное распределение пор относительно их объема, $dV_i/V_{\text{sum}}$ , %		
	Контрольный	ВДДВ с С-3	ВДДВ с ЭПК	Контрольный	ВДДВ с С-3	ВДДВ с ЭПК
3,496	$9,9854 \cdot 10^{-4}$	$1,5622 \cdot 10^{-3}$	$1,5934 \cdot 10^{-3}$	16,002	48,705	100
4,420	$3,9032 \cdot 10^{-4}$	$3,9786 \cdot 10^{-4}$	0	8,9709	17,79	0
8,441	$6,1233 \cdot 10^{-5}$	$9,8229 \cdot 10^{-5}$	0	4,3332	13,524	0
14,998	$1,4144 \cdot 10^{-4}$	$4,6362 \cdot 10^{-6}$	0	28,722	1,8317	0
23,943	$3,7206 \cdot 10^{-5}$	$5,4705 \cdot 10^{-5}$	0	6,3446	18,149	0
142,29	$1,8161 \cdot 10^{-5}$	0	0	35,627	0	0

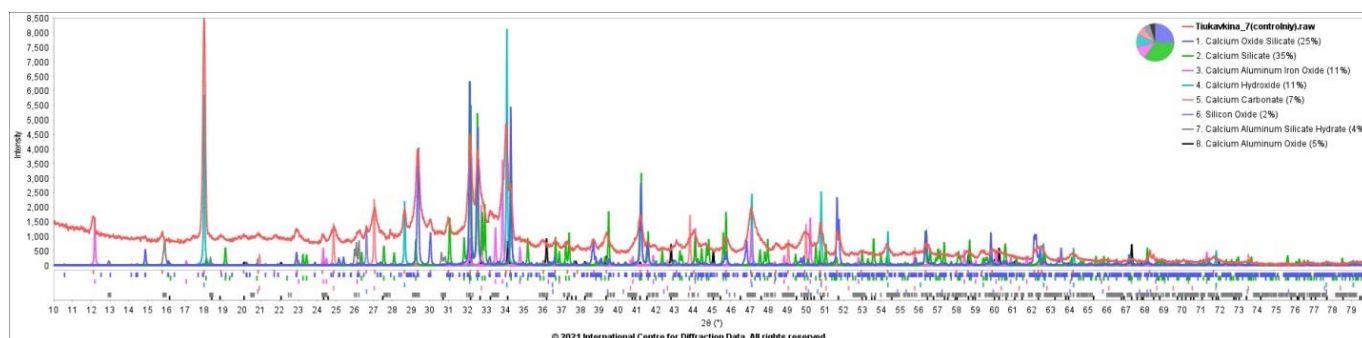


Рис. 4. Рентгенограмма цементного камня контрольного состава.  
Fig. 4. X-ray diffraction pattern of the control composition cement stone.

Установлено, что цементный камень контрольного состава характеризуется смесью из 25% алита  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , 35% белита  $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , 11% четырехкальциевого алюмоферрита  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  и 11% портландита  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Рефлекс интенсивностью 28% в области  $27,1^\circ$ , указывает на наличие

до 7% ватерита  $\mu\text{-CaCO}_3$  и до 2% кварца  $\text{SiO}_2$  с рефлексом на участке  $26,6^\circ$  интенсивностью 28%. Отмечается присутствие до 4% вайракита  $\text{Ca}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  со слабым рефлексом в области  $15,8^\circ$  и до 5% гибонита  $\text{CaAl}_2\text{O}_9$  –  $36,0^\circ$  (рис. 4).

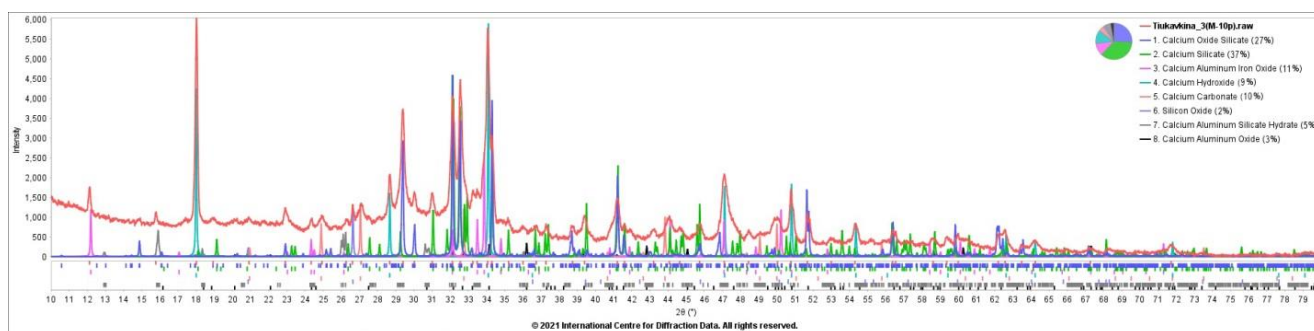


Рис. 5. Рентгенограмма цементного камня, модифицированного ВДДВ (10%), стабилизированного ЭПК.  
Fig. 5. X-ray diffraction pattern of cement stone modified with VDV (10%), stabilized with EPC.

Рентгенограмма на рис. 5 определяется 27% алита  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , 37% белита  $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , 11% четырехкальциевого алюмоферрита  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  и 9% портландита  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Рефлекс интенсивностью 30% в области  $27,1^\circ$  указывает на присутствие до 10% ватерита  $\mu\text{-CaCO}_3$ , а

область  $26,6^\circ$  интенсивностью 28% представлена 2% кварца  $\text{SiO}_2$ . При этом отмечены слабые рефлексы на участке  $15,8^\circ$  и  $36,0^\circ$ , которые характеризуются наличием до 10% вайракита  $\text{Ca}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и до 3% гибонита  $\text{CaAl}_2\text{O}_9$  соответственно (рис. 5).

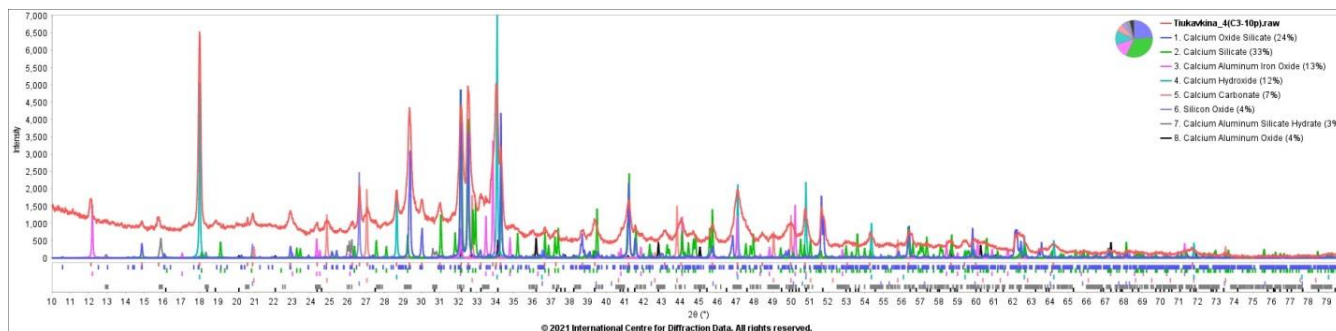


Рис. 6. Рентгенограмма цементного камня, модифицированного ВДДВ (10 %), стабилизированного С-3.  
Fig. 6. X-ray diffraction pattern of cement stone modified with VDDV (10%), stabilized with C-3U.

Рентгенограмма на рис. 6 характеризуется смесью из 24% алита  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , 33% белита  $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , 10% четырехкальциевого алюмоферрита  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  и 11% портландита  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Рефлекс интенсивностью 28% в области  $27,1^\circ$  указывает на присутствие до

7% ватерита  $\mu\text{-CaCO}_3$ , а в области  $26,6^\circ$  интенсивностью 28% до 4% кварца  $\text{SiO}_2$ . Отмечается наличие до 3% вайракита  $\text{Ca}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  со слабым рефлексом в области  $15,8^\circ$  и до 4% гибонита  $\text{CaAl}_2\text{O}_9$  на участке  $36,0^\circ$  (рис. 6).

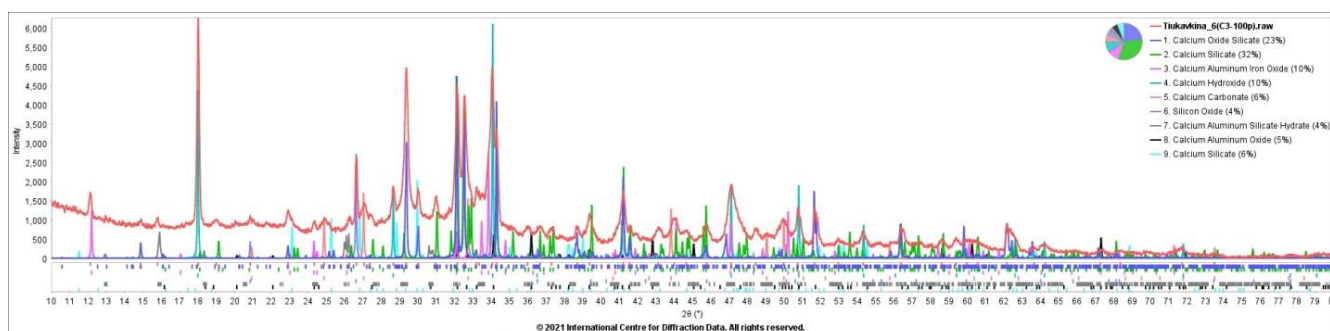


Рис. 7. Рентгенограмма цементного камня, модифицированного ВДДВ концентрацией 100 %, взамен воды затворения, стабилизированного ЭПК.  
Fig. 7. X-ray diffraction pattern of cement stone modified with 100% VDV concentration instead of mixing water, stabilized with EPC.

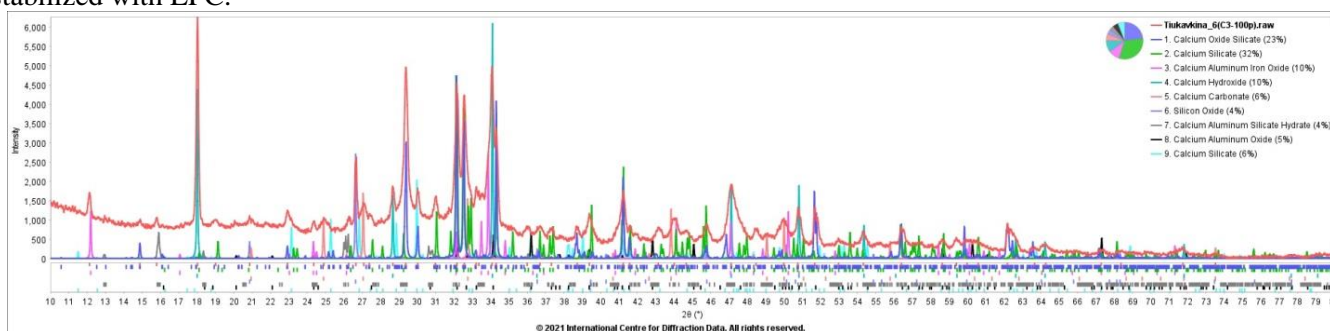


Рис. 8. Рентгенограмма цементного камня, модифицированного ВДДВ концентрацией 100 %, взамен воды затворения, стабилизированного С-3.  
Fig. 8. X-ray diffraction pattern of cement stone modified with VDDW at 100% concentration instead of mixing water, stabilized with C-3.

Отмечается общее снижение, относительно контрольного образца ЦК, содержания алита  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , белита  $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , четырехкальциевого алюмоферрита  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  и ватерита  $\mu\text{-CaCO}_3$  до 24, 33, 10 и 6% соответственно. При этом относительная концентрация гибонита

$\text{CaAl}_2\text{O}_9$  остается постоянной, а вайракит  $\text{Ca}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  уменьшается до 3% в образцах ЦК, модифицированного добавкой, стабилизированной С-3 (рис. 7). Вместе с тем установлено, что содержание  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ca}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  не изменяется при использовании стабилизатора MGL-430

(рис. 6). Полученные данные указывают на слабую эффективность разработанной добавки в условиях применения концентраций отличных от оптимальных, что согласуется с результатами ранее выполненной работы [19-21].

Необходимо отметить, что в образцах, модифицированных высокодисперсным волластонитом, стабилизированным С-3, зафиксирована повышенная, по сравнению с контрольным ЦК, относительная концентрация портландита  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в размере 11 % (рис. 8), в то время как волластонит, стабилизированный ЭПК, способствует уменьшению содержания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  до 9% (рис. 6), что обосновывается ранее проведенными исследованиями активности разработанной добавки.

Отмечено, что наибольшая относительная концентрация кристаллических фаз алита и белита наблюдается в образце ЦК, модифицированном ВДДВ с содержанием в составе ЦК 10 % от массы цемента, стабилизированного ЭПК. При этом концентрация указанных фаз в относительном выражении к предельному значению, в сравнении с контрольным составом, выше, соответственно, на 32,4 и 5,4%. Наблюдается эквивалентная концентрация четырехкальциевого алюмоферрита, в то время как в других пробах фиксируется его сокращение до 9%.

Выявлено заметное ослабление пиков портландита в ЦК, модифицированном ВДДВ с ЭПК, при этом относительная концентрация кристаллических фаз  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  выше на 18,2% у контрольного ЦК, чем у модифицированного, что обусловлено ПА разработанной высокодисперсной добавки волластонита. Вместе с тем в образце модифицированного ЦК отмечается повышенная концентрация кристаллических фаз ватерита и вайракита, которые, как известно, обеспечивают долговечность изделий на основе цементных композитов [24].

## Выводы

Разработана добавка высокодисперсного волластонита с средним размером частиц 0,405 мкм, получаемая методом ультразвукового диспергирования исходного сырья концентрацией 5,3 г/дм<sup>3</sup> (0,53 %) в водной среде стабилизатора ЭПК содержанием 2,1 см<sup>3</sup>/дм<sup>3</sup> (0,21 %), при частоте 35 кГц и времени УЗД 5 минут. Применение ВДДВ в количестве 10 % от массы цемента в составе мелкозернистого бетона позволяет изготавливать изделия с прочностью при изгибе 6,8 МПа, при сжатии – 58,5 МПа и маркой по морозостойкости F500.

Доказано, что ВДДВ характеризуется пуццоланической активностью 87,3 мг/г, сопоставимой с ПА неуплотненного микрокремнезема МК-65. Отмечается высокая степень устойчивости к попеременным циклам замораживания и оттаивания с остаточной прочностью при сжатии основных образцов МЗБ превышающей в 1,4 раза контрольные, не подвергавшиеся испытанию на морозостойкость, что обусловлено целостной однородной микроструктурой и снижением общей пористости цементного камня с 0,0043 до 0,0019 см<sup>3</sup>/г, т.е. в 2,4 раза, относительно контрольных образцов.

Установлено, что ЦК с ВДДВ отличается повышенным в относительном выражении содержанием кристаллических фаз алита и белита на 32,4 и 5,4 %, эквивалентной концентрацией четырехкальциевого алюмоферрита при его общем сокращении до 9 % в исследованных образцах других составов. Обнаружено заметное ослабление на 18,2 % пиков портландита, а также увеличение концентрации кристаллических фаз ватерита и вайракита.

Таким образом, доказана и научно обоснована возможность и эффективность применения разработанного высокодисперсного модификатора цементных композитов на основе природного волластонита.

## Список источников

1. Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Mailyan L.R., Beskopylny A.N., Smolyanichenko A.S., Chernil'nik A.A., Elshaeva D.M., Beskopylny N.A. Structure and properties of variatropic concrete combined modified with nano- and micro-silica. *Construction Materials and Products*. 2024. № 7 (2). P. 3. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-2-3>
2. Zemlyanskaya A.G., Lapunova K.A., Semenova M.Yu. Dry masonry mixtures based on siliceous opal-cristobalite rocks for clinker bricks. *Construction Materials and Products*. 2024. № 7 (2). P. 5. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-2-5>
3. Yakovlev G.I., Pudov I.A., Saidova Z.S., Ginchitskaya Yu.N., Elrefaei A.E.M.M. Functionalization of one-component cement silicate paint. *Construction Materials and Products*. 2024. № 7 (5). P. 5. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-5-5>
4. Klyuev S.V., Slobodchikova N.A., Saidumov M.S., Abumuslimov A.S., Mezhidov D.A., Khezhev T.A. Application of ash and slag waste from coal combustion in the construction of the earth bed of roads. *Construction Materials and Products*. 2024. № 7 (6). P. 3. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-6-3>

5. Гусев А.И. Проблемы волластонитового сырья в России // Успехи современного естествознания. 2014. № 2. С. 55 – 59.
6. Мананков А.В., Рахманова И.А., Владимиров В.М. Возможности применения композиционных материалов с участием наноармирующего и модифицирующего волластонита // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 146 – 159.
7. Григорян Г.О., Мурадян А.Б., Григорян К.Г. Волластонит. Получение и применение // Армянский химический журнал. 1990. № 5. С. 296 – 315.
8. Божко Ю.А., Овдун Д.А., Партышев М.Ю. Синтетический волластонит – перспективная добавка при производстве лицевого керамического кирпича светлых оттенков // Строительные материалы. 2023. № 5. С. 25 – 29.
9. Данилова С.Н., Тарасова П.Н., Ярусова С.Б., Капитонова Ю.В., Осипова В.Н., Охлопкова А.А., Гордиенко П.С. Оценка влияния волластонита из техногенного отхода на свойства полимерного композита на основе политетрафторэтилена // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2024. Т. 67. № 12. С. 102 – 112.
10. Данилова С.Н., Ямалеева Е.С., Готлиб Е.М., Ярусова С.Б., Гордиенко П.С., Охлопкова А.А., Иванова Л.Н. Наполнение сверхвысокомолекулярного полиэтилена синтетическим волластонитом, полученным на основе разных видов побочных продуктов // Ползуновский вестник. 2025. № 2. С. 168 – 175.
11. Григорян К.Г., Хачатрян А.А., Багинова Л.Г., Айрапетян С.М., Эдилян К.Н., Яйлоян С.М. Твердофазный синтез керамических пигментов со структурой волластонита // Химическая технология. 2025. Т. 26. № 6. С. 211 – 214.
12. Жумажанов А.Н., Азимбекова К.М., Мансуров З.А., Хамитова К.К., Казакбаев С.Т., Нуртазин С.Т., Досжанов Е.О. Альтернативные источники целлюлозы: перспективы использования кукурузных отходов и волластонита в производстве картона // Механика и технологии. 2025. № 1 (87). С. 312 – 324.
13. Самсонова А.С., Попов Р.Ю., Дятлова Е.М. Керамические материалы из природного и синтетического волластонита для литейных установок алюминиевой промышленности // Тезисы докладов 56-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2023. С. 242 – 243.
14. Пасечник А.А., Апанасевич В.И., Папынов Е.К., Шичалин О.О., Аргишев О.А., Стегний К.В., Невожай В.И., Костив Е.П., Темченко В.В., Борисенко А.В., Панкратов И.В. Спектр вторичного излучения маркера предлучевой разметки волластонита/гидроксипатита // Тихоокеанский медицинский журнал. 2024. № 4 (98). С. 48 – 52.
15. Афонин И.С., Апанасевич В.И., Зиновьев С.В., Папынов Е.К., Евдокимов И.О., Шичалин О.О., Усов В.В., Костив Е.П., Плехова Н.Г. Морфологическая картина костной ткани при имплантации дисперсного биокомпозита на основе волластонита // Ульяновский медико-биологический журнал. 2023. № 4. С. 144 – 152.
16. Тимашев В.В., Сычёва Л.И., Антоничева Н.Б. Композиционные вяжущие материалы, армированные волокнистыми кристаллами и стекловолокнами / Синтез и исследование материалов на основе силикатов и других тугоплавких соединений. М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1982. 123 с.
17. Козин А.В., Федюк Р.С., Ильинский Ю.Ю., Ярусова С.Б., Гордиенко П.С., Мохаммад А.М. Влияние волластонита на механические свойства бетона // Строительные материалы и изделия. 2020. Т.3. №5. С. 34 – 42.
18. Липин В.А., Софронова Е.Д. Волластонит и его использование в цементном производстве // Цемент и его применение. 2024. № 2. С. 60 – 64.
19. Karpikov E.G., Lukutsova N.P., Blagoder T.P., Bondarenko E.A. Effective Fine Concrete Modified with a Highly Dispersed Wollastonite-Based Additive // FarEastCon – Materials and Construction III: Materials International Scientific Conference «FarEastCon». 2020. Vol. 887. P. 422 – 427.
20. Karpikov E.G., Lukutsova N.P., Blagoder T.P., Bondarenko E.A. Effective fine concrete modified with a highly dispersed wollastonite-based additive // Key Engineering Materials. 2021. Vol. 887 KEM. P. 422 – 427.
21. Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г., Горностаева Е.Ю., Соболева Г.Н. Оптимизация состава добавки стабилизированного высокодисперсного волластонита с использованием компьютерного алгоритма поиска экстремумов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №5. С. 9 – 18.
22. Карпиков Е.Г., Янченко В.С., Лукутцова Н.П., Головин С.Н. Программа моделирования экспериментальных данных Extr.sce: Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2018616850 Рос. Федерация. № 2018614205 / заявл. 25.04 2018; опублик. 07.06.2018. 1 с.

23. Карпиков Е.Г., Янченко В.С., Лукутцова Н.П., Пехенько Д.А. Программа моделирования экспериментальных данных Interp.sce: Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2018616851 Рос. Федерация. № 2018614206 / заявл. 25.04 2018; опубли. 07.06.2018. 1 с.

24. Жерновский И.В., Нелюбова В.В., Строкова В.В., Осадчий Е.Г. Фазообразование вяжущих в системе известь – гранитное НВ в условиях автоклавного твердения // Строительные материалы. 2015. № 10. С. 49-53.

### References

1. Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Mailyan L.R., Beskopylny A.N., Smolyanichenko A.S., Chernil'nik A.A., Elshaeva D.M., Beskopylny N.A. Structure and properties of variatropic concrete combined modified with nano- and micro-silica. *Construction Materials and Products*. 2024. No. 7 (2). P. 3. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-2-3>

2. Zemlyanskaya A.G., Lapunova K.A., Semenova M.Yu. Dry masonry mixtures based on siliceous opal-cristobalite rocks for clinker bricks. *Construction Materials and Products*. 2024. No. 7 (2). P. 5. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-2-5>

3. Yakovlev G.I., Pudov I.A., Saidova Z.S., Ginchitskaya Yu.N., Elrefaei A.E.M.M. Functionalization of one-component cement silicate paint. *Construction Materials and Products*. 2024. No. 7 (5). P. 5. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-5-5>

4. Klyuev S.V., Slobodchikova N.A., Saidumov M.S., Abumuslimov A.S., Mezhidov D.A., Khezhev T.A. Application of ash and slag waste from coal combustion in the construction of the earth bed of roads. *Construction Materials and Products*. 2024. No. 7 (6). P. 3. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-6-3>

5. Gusev A.I. Problems of wollastonite raw materials in Russia. *Advances in modern natural science*. 2014. No. 2. P. 55 – 59.

6. Manankov A.V., Rakhmanova I.A., Vladimirov V.M. Possibilities of using composite materials with nanoreinforcing and modifying wollastonite. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2024. Vol. 26. No. 6. P. 146 – 159.

7. Grigoryan G.O., Muradyan A.B., Grigoryan K.G. Wollastonite. Production and Application. *Armenian Chemical Journal*. 1990. No. 5. P. 296 – 315.

8. Bozhko Yu.A., Ovdun D.A., Partyshev M.Yu. Synthetic Wollastonite – a Promising Additive in the Production of Light-Colored Facing Ceramic Bricks. *Construction Materials*. 2023. No. 5. P. 25 – 29.

9. Danilova S.N., Tarasova P.N., Yarusova S.B., Kapitonova Yu.V., Osipova V.N., Okhlopkova A.A., Gordienko P.S. Assessment of the influence of wollastonite from technogenic waste on the properties of a polymer composite based on polytetrafluoroethylene. *News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology*. 2024. T. 67. No. 12. P. 102 – 112.

10. Danilova S.N., Yamaleeva E.S., Gottlieb E.M., Yarusova S.B., Gordienko P.S., Okhlopkova A.A., Ivanova L.N. Filling of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene with Synthetic Wollastonite Obtained from Different Types of By-Products. *Polzunovskiy Vestnik*. 2025. No. 2. P. 168 – 175.

11. Grigoryan K.G., Khachatryan A.A., Baginova L.G., Ayrapetyan S.M., Edilyan K.N., Yailoyan S.M. Solid-Phase Synthesis of Ceramic Pigments with Wollastonite Structure. *Chemical Technology*. 2025. Vol. 26. No. 6. P. 211 – 214.

12. Zhumazhanov A.N., Azimbekova K.M., Mansurov Z.A., Khamitova K.K., Kazakbaev S.T., Nurtazin S.T., Doszhanov E.O. Alternative sources of cellulose: prospects for using corn waste and wollastonite in cardboard production. *Mechanics and Technology*. 2025. No. 1 (87). P. 312 – 324.

13. Samsonova A.S., Popov R.Yu., Dyatlova E.M. Ceramic materials from natural and synthetic wollastonite for foundries in the aluminum industry. *Abstracts of the 56th International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students*. Vitebsk: Vitebsk State Technological University, 2023. P. 242 – 243.

14. Pasechnik A.A., Apanasevich V.I., Papynov E.K., Shichalin O.O., Argishev O.A., Stegnyy K.V., Nevozhay V.I., Kostiv E.P., Temchenko V.V., Borisenko A.V., Pankratov I.V. Secondary emission spectrum of the wollastonite/hydroxyapatite pre-radiation marking marker. *Pacific Medical Journal*. 2024. No. 4 (98). P. 48 – 52.

15. Afonin I.S., Apanasevich V.I., Zinoviev S.V., Papynov E.K., Evdokimov I.O., Shichalin O.O., Usov V.V., Kostiv E.P., Plekhova N.G. Morphological picture of bone tissue after implantation of a dispersed biocomposite based on wollastonite. *Ulyanovsk Medical and Biological Journal*. 2023. No. 4. P. 144 – 152.

16. Timashev V.V., Sycheva L.I., Antonicheva N.B. Composite binders reinforced with fibrous crystals and glass fibers. Synthesis and study of materials based on silicates and other refractory compounds. Moscow: MKhTI im. D.I. Mendeleev, 1982. 123 p.

17. Kozin A.V., Fedyuk R.S., Ilyinsky Yu.Yu., Yarusova S.B., Gordienko P.S., Mohammad A.M. The Effect of Wollastonite on the Mechanical Properties of Concrete. *Construction Materials and Products*. 2020. Vol. 3. No. 5. P. 34 – 42.
18. Lipin V.A., Sofronova E.D. Wollastonite and its Use in Cement Production. *Cement and Its Application*. 2024. No. 2. P. 60 – 64.
19. Karpikov E.G., Lukutsova N.P., Blagoder T.P., Bondarenko E.A. Effective Fine Concrete Modified with a Highly Dispersed Wollastonite-Based Additive. *FarEastCon – Materials and Construction III: Materials International Scientific Conference “FarEastCon”*. 2020. Vol. 887. P. 422 – 427.
20. Karpikov E.G., Lukutsova N.P., Blagoder T.P., Bondarenko E.A. Effective fine concrete modified with a highly dispersed wollastonite-based additive. *Key Engineering Materials*. 2021. Vol. 887 KEM. P. 422 – 427.
21. Lukutsova N.P., Karpikov E.G., Gornostaeva E.Yu., Soboleva G.N. Optimization of the composition of the stabilized highly dispersed wollastonite additive using a computer algorithm for searching for extrema. *Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 5. P. 9 – 18.
22. Karpikov E.G., Yanchenko V.S., Lukutsova N.P., Golovin S.N. Experimental data modeling program Extr.sce: State registration certificate. Computer Program Registration Certificate 2018616850 Russian Federation. No. 2018614205. declared 25.04 2018; published 07.06.2018. 1 p.
23. Karpikov E.G., Yanchenko V.S., Lukutsova N.P., Pekhenko D.A. Interp.sce Experimental Data Modeling Program: Computer Program Registration Certificate 2018616851 Russian Federation. No. 2018614206. declared 25.04 2018; published 07.06.2018. 1 p.
24. Zhernovskiy I.V., Nelyubova V.V., Strokova V.V., Osadchiy E.G. Phase formation of binders in the lime – granite HB system under autoclave curing conditions. *Construction Materials*. 2015. No. 10. P. 49 – 53.

#### ***Информация об авторах***

Лукутцова Н.П., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Производство строительных конструкций», ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8913-1570>, Брянский государственный инженерно-технологический университет, 241037, г. Брянск, пр-т Станке Димитрова, д. 3, [natluk58@mail.ru](mailto:natluk58@mail.ru)

Карпиков Е.Г., старший преподаватель, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-4092-3000>, Брянский государственный инженерно-технологический университет, 241037, г. Брянск, пр-т Станке Димитрова, д. 3, [johnjk@mail.ru](mailto:johnjk@mail.ru)

Ковтков И.В., аспирант, Брянский государственный инженерно-технологический университет, 241037, г. Брянск, пр-кт Станке Димитрова, д. 3, [ivan.kovtckov@yandex.ru](mailto:ivan.kovtckov@yandex.ru)

Протасов А.В., аспирант, Брянский государственный инженерно-технологический университет, 241037, г. Брянск, проспект Станке Димитрова, д. 3, [protasov.alexander.32@gmail.com](mailto:protasov.alexander.32@gmail.com)

© Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г., Ковтков И.В., Протасов А.В., 2025

#### ***Information about the authors***

Lukutsova N.P., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Building Structures Production, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8913-1570>, Bryansk State University of Engineering and Technology, 3 Stanke Dimitrova Ave., Bryansk, 241037, Russia, [natluk58@mail.ru](mailto:natluk58@mail.ru)

Karpikov E.G., Senior Lecturer, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-4092-3000>, Bryansk State University of Engineering and Technology, 3 Stanke Dimitrova Ave., Bryansk, 241037, Russia, [johnjk@mail.ru](mailto:johnjk@mail.ru)

Kovtkov I.V., Postgraduate Student, Bryansk State University of Engineering and Technology, 3 Stanke Dimitrova Ave., Bryansk, 241037, Russia, Bryansk, Stanke Dimitrov Avenue, Building 3, [ivan.kovtckov@yandex.ru](mailto:ivan.kovtckov@yandex.ru)

Protasov A.V., Graduate Student, Bryansk State University of Engineering and Technology, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrov Avenue, Building 3, [protasov.alexander.32@gmail.com](mailto:protasov.alexander.32@gmail.com)

© Lukutsova N.P., Karpikov E.G., Kovtkov I.V., Protasov A.V., 2025