

УДК 666.9

Н. А. АЮБОВ<sup>1</sup>, канд. экон. наук, проф.; А. В. КЛЮЕВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.; С. В. КЛЮЕВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.

## РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ

<sup>1</sup>ФГБУ Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова Российской академии наук (КНИИ РАН)

Россия, 364051, г. Грозный, ул. Старопромысловское шоссе, д. 21 а; эл. почта: ytekly@mail.ru

<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; эл. почта: klyuev@yandex.ru

*Ключевые слова:* сухие смеси, композиционное вяжущее, микроструктура, фибра.

---

*Исследованы составы теплоизоляционных сухих строительных смесей с использованием композиционных вяжущих. Произведены экспериментальные исследования физико-механических характеристик разработанных составов, приведены исследования микроструктуры композиционного вяжущего с использованием комплексной добавки ТВМ.*

---

Рассматриваемые в исследованиях разновидности теплоизоляционных штукатурных растворов имеют определенные ограничения по толщине слоя около 5–60 мм. В связи с этим подобные изделия должны обладать следующими характеристиками:

- высокой адгезией к базовой поверхности;
- низким водопоглощением;
- способностью к самовысыханию после увлажнения;
- минимальной склонностью к образованию трещин;
- высокой паропроницаемостью (не менее чем у предыдущих слоев конструкции);
- высокой трещиностойкостью (низкой усадкой);
- морозостойкостью и др.

Для указанных изделий ограниченной толщины весьма значимым фактором является пластическая усадка мелкозернистого бетона, наблюдающаяся в процессе гидратации клинкерных минералов в первые часы твердения. Подобная усадка приводит к повышению трещинообразования в твердеющем материале, что значительно повышает его водопроницаемость, то есть ухудшает одно из наиболее важных показателей. В штукатурном слое помимо трещин, что также нежелательно, усадочные процессы снижают прочность сцепления штукатурного покрытия с материалом основания. Дефицит влаги создается за счет протекания во времени следующих процессов: испарения влаги с поверхности штукатурного покрытия; впитывания влаги основанием; гидратации минералов портландцементного клинкера в присутствии перлита. Прямым следствием этой диспропорции является физический процесс наращивания отрицательного

капиллярного давления в микропорах, что вызывает сжатие системы, которое, в свою очередь, может привести к образованию трещин [1–4].

Инновационные инженерные решения в улучшении деформационных и физико-механических свойств теплоизоляционных бетонов включают комплексные подходы, например, за счет применения микроармирования. На рис. 1 показана микроструктура теплоизоляционного бетона с применением пористого заполнителя и фибры.

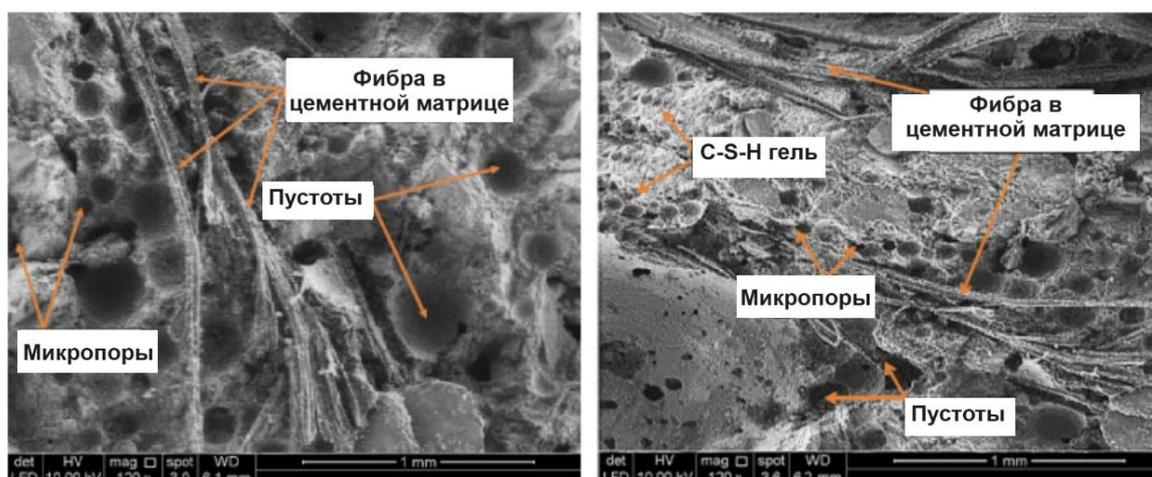


Рис. 1. Микроструктура бетона с пористым заполнителем и фиброй [5]

Волокна обеспечивают устойчивость структуры, снижают вероятность распространения трещин и армируют цементное вяжущее с пористыми частицами заполнителя, значительно улучшая прочность при растяжении.

Изложенные факторы положены в основу выбора сырьевых компонентов. В качестве вяжущего использовали разработанное композиционное вяжущее на основе перлитовой пыли КВ 80. В качестве мелкого заполнителя использовали отход производства вспученного перлита. Размер его гранул меньше 0,16 мм.

Проведенные нами ранее экспериментальные исследования по использованию отходов производства волокнистого базальтового утеплителя позволили установить его комплексное влияние на получаемую смесь. Использование ТВМ в композиционных смесях способствует активации процесса твердения смеси, снижению плотности, теплопроводности. В этой связи полученные положительные результаты по использованию ТВМ в композиционных смесях целесообразно использовать и в перлитсодержащих смесях [6–10].

Нами использована комбинированная добавка из базальтовых волокнистых отходов трех фракций при суммарном количестве 10–15 %. Предварительно осуществляли подготовку фракционного состава ТВМ способом их измельчения:

- в планетарной мельнице в течение 1 мин до  $S_{уд} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$ ;
- в разработанном нами вибрационно-центробежном агрегате в течение 10 мин до  $S_{уд} = 280 \text{ м}^2/\text{кг}$ ;
- волокна дробленые с помощью устройства для вибрационно-центробежной классификации техногенных волокнистых материалов в течение 5 мин и отсеянные на сите с размером ячеек 4 мм.

Комплексное действие фракций ТВМ заключается в направленном формировании структуры на микро- и макроуровне. Фракция  $S_{уд} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$  необходима для активации процессов гидратации, повышения водоудерживающей способности раствора и повышения прочности готового композита. Фракция с  $S_{уд} = 280 \text{ м}^2/\text{кг}$  необходима для микроармирования структуры сырьевой смеси. Волокна, просеянные через сито 4 мм, обеспечивают улучшенные теплофизические свойства изделия и усиление матрицы бетона при пластических усадках, что необходимо для снижения образования трещин.

Таблица 1

**Состав компонентов на 1 т сухой смеси**

Номер компонента	Наименование компонентов		Состав 1 композиционной смеси	Состав 2 композиционной смеси	Состав 3 композиционной смеси
1	Цемент	КВ- 80	440	440	400
2	Перлитовая пыль		110	110	100
3	Реопласт		5,5	5,5	5
4	Эфир целлюлозы		1,1	1,1	1
5	ТВМ $S_{уд}=400 \text{ м}^2/\text{кг}$		38,5	20	20
6	ТВМ $S_{уд}=280 \text{ м}^2/\text{кг}$		11	20	15
7	ТВМ грануллированный		5,5	15	15
8	Перлитовая пыль		388,4	388,4	444

При проведении экспериментальных исследований не использовалась добавка-порообразователь, поскольку более длинные волокна ТВМ способствовали дополнительному воздухововлечению в смеси при перемешивании.

В составах 1 и 2 (табл. 1) соотношение компонентов по объему – вяжущее : перлит = 1:8, в составе 3 – 1:11.

При смешивании с водой композиционные смеси 1 и 2 имели пластичную текстуру, В/Ц составляло 0,9; для смеси 3 – 1,2.

Состав 3 отличался наиболее шероховатой поверхностью за счет присутствия большего количества более грубодисперсных волокон. Составы 1 и 2 более пластичны и однородны по текстуре (рис. 2). Все составы равномерно распределялись по поверхности бетонных образцов.



Состав 1

Состав 2

Состав 3

Рис. 2. Разработанные составы растворов на бетонных образцах (номер составов в соответствии с табл. 1)



Назначение нормативных показателей качества и исследования проводились по ГОСТ 28013-98, ГОСТ 5802-86, ГОСТ 31356-2007 промышленным стандартам Германии для отделочных растворов (DIN 18555, DIN 52615, DIN 52617 и др.) и европейскому стандарту EN 998. Все показатели основных свойств определялись по результатам испытаний трех образцов.

Водоудерживающую способность растворной смеси определяли путем испытания слоя растворной смеси толщиной 12 мм, уложенного на фильтрующую бумагу. Указанная характеристика определялась в процентах содержанием воды в пробе до и после эксперимента ГОСТ 5802-86. Прочность сцепления (адгезию) определяли по силе отрыва образца затвердевшего раствора (бетона) от основания – бетонной плитки, приложенной к образцу через металлический диск с анкером, приклеенным к поверхности образца ГОСТ 31356-2007. Водопоглощение при капиллярном подсосе определяли по объему воды, поглощенной образцом, высушенным до постоянной массы. Для испытания изготавливали образцы-балочки размером 40×40×160 мм и погружали их торцами в воду ГОСТ 31356-2007. Прочность раствора на сжатие определяли на образцах-кубах размерами 70,7×70,7×70,7 мм, согласно ГОСТ 5802-86.

Результаты испытаний и нормативные значения показателей для штукатурных смесей приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Результаты испытаний разработанных сухих смесей

Наименование показателя	Полученные показатели		
	Состав 1	Состав 2	Состав 3
Глубина погружения конуса, см	6	5	5
Водоудерживающая способность, %	90,2	91,5	95,3
Прочность сцепления с поверхностью основанием, МПа	0,42	0,34	0,28
Водопоглощение при капиллярном подсосе, кг/м <sup>2</sup>	1,62	2,27	3,32
Водопоглощение затвердевших растворов, % по массе	22,8	29,9	67,4
Прочность при сжатии, МПа	13,4	9,1	2,5
Средняя плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>	950	880	490
Коэффициент теплопроводности, Вт/(мК)	0,29	0,21	0,097

Проведенные испытания и установленные основные физико-механические характеристики разработанных составов показали, что показатели композиционных смесей состава 1 и 2 не уступают нормируемым показателям сухих штукатурных смесей для внутренней отделки помещений. Композиционные смеси состава 3 рекомендуются для утепления, например, чердачных помещений и др. Использование же композиционного вяжущего на основе перлитового порошка и отходов минерального утеплителя позволяют снизить использование наиболее энергоемкой клинкерной составляющей, обеспечить огнестойкость смесей, а также получить экономический и экологический эффекты.

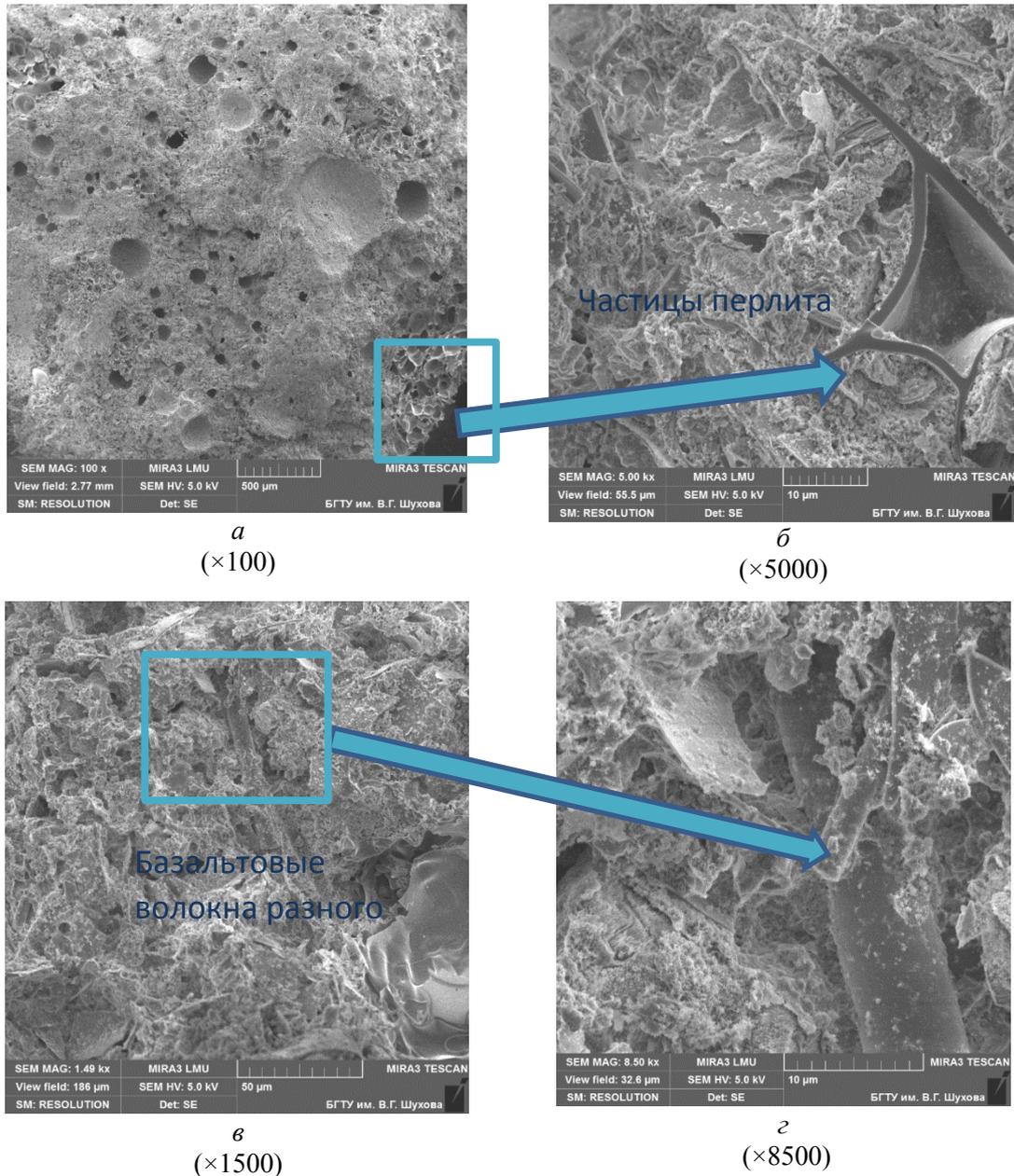


Рис. 3. Микроструктура растворной смеси на основе перлита и композиционного вяжущего с использованием комплексной добавки ТВМ через 28 суток твердения: *а, б* – частицы перлита в цементной структуре; *в, г* – волокна ТВМ различного размера покрыты гидросиликатными новообразованиями

Исследование микроструктуры проводили по сколу образцов, на поверхность которых был нанесен раствор. Образцы испытывали через 28 суток твердения. Установлено, что образцы состава 2 (рис. 3) имеют достаточно однородную структуру, заметны пузырьки вовлеченного при перемешивании смеси воздуха, сохранение которого обеспечивает достаточную вязкость системы. При небольшом увеличении отчетливо заметны частички перлита в общей массе раствора (рис. 3*а*). При гидратации вяжущей системы частицы перлита выступают центрами кристаллизации, а также способствуют пуццолановым реакциям с образованием большого количества низкоосновных гидросиликатов кальция. На



микрофотографии (рис. 3а, б) отчетливо видно сохранение ячеистой структуры частицы перлита. На границе раздела фаз «поверхность перлита – цементная матрица» отмечается высокая степень адгезии.

Введение в систему частиц ТВМ с  $S_{уд} = 280 \text{ м}^2/\text{кг}$  способствует микроармированию, причем мельчайшие волокна этой добавки впоследствии могут растворяться в щелочной среде, способствуя уплотнению системы (рис. 3в, г). Пластическая усадка на ранних стадиях твердения смесей на основе портландцемента обусловлена возникновением отрицательного капиллярного давления в микропорах, которое, в свою очередь, определяется состоянием капилляров и степенью их оводнения. Формирующееся напряженное состояние ввиду отрицательно знака внутреннего давления вызывает объемное сжатие, которое приводит к усадке бетонной смеси и сопутствует трещинообразованию в начале затвердевания бетона.

Измельченные отходы ТВМ отмечаются в виде волокон (рис. 3в, г). На поверхности волокон образуется большее количество гидросиликатных новообразований. Введение дробленых отходов ТВМ позволяет снизить плотность штукатурного раствора.

Механизм действия разработанного состава штукатурного раствора, включающего перлит и эфир целлюлозы, происходит следующим образом. При затворении водой сырьевой смеси иммобилизуется часть воды за счет капиллярных и осмотических сил. В процессе гидратации вяжущего его влагосодержание снижается как за счет внешних сил (атмосферного воздействия, капиллярного подсоса со стороны подложки), так и за счет процессов гидратации гидравлического вяжущего: доля воды снижается, а доля минерального компонента растет. На данном этапе в условиях дефицита влаги начинается увеличение значений отрицательного капиллярного давления. Далее, за счет градиентов отрицательного капиллярного давления и разницы концентраций начинают формироваться потоки влаги из частиц тонкодисперсного перлита и эфира целлюлозы. Таким образом, в гидратируемой системе увеличивается содержание влаги с компенсацией ее потерь. Формирование данного процесса позволяет последовательно осуществлять процессы гидратации, предопределяет уменьшение отрицательно капиллярного давления, снижение усадочных деформаций и предотвращение трещинообразования на ранних стадиях твердения вяжущей системы. Равновесное влагосодержание системы обуславливается типом пористости (содержанием открытых пор и капилляров, полузамкнутых и замкнутых пор), а также формой контакта между материалом и водой. В общей массе продуктов гидратации отмечается минимальное содержание пор и микротрещин, что обусловлено активным гидратообразованием за счет «использования» запасенной в микропорах воды.

В рамках реализации проекта были разработаны составы смесей для производства стеновых камней из предварительно приготовленной сухой смеси (табл. 3).

В составе сырьевой смеси В/Ц составляло 0,3. Были заформованы образцы-кубики размером 7×7×7 см. Образцы уплотняли вибрированием в течение 1 мин и дальнейшем прессовании в течение 30 с под давлением 5 МПа. Результаты физико-механических испытаний приведены в табл. 4.



Таблица 3

**Составы для производства конструкционно-теплоизоляционных стеновых камней**

Номер компонента	Наименование компонентов	Расход, кг/т	
		Состав 1	Состав 2
1	КВ-80	326	326
2	Кварцевый песок фр <1,2 мм	634	624
3	Тонкоизмельченный базальтовый волокнистый наполнитель, $S_{вд}=400 \text{ м}^2/\text{кг}$	13	13
4	Измельченный базальтовый волокнистый наполнитель, $S_{вд}=280 \text{ м}^2/\text{кг}$	12	12
5	Базальтовый фиброапполнитель ( $d < 4\text{мм}$ )	10	10
6	Перлитовая пыль	5	15

Таблица 4

**Физико-механические характеристики образцов**

Наименование показателей	Значение	
	Состав 1	Состав 2
Средняя плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	1800	1600
Прочность при сжатии, МПа	39	30
Морозостойкость, кол-во циклов	100	100
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{мК})$	0,68	0,59

Составы характеризуются высокой прочностью (В25–В30), более высокими по сравнению с обычным бетоном теплоизоляционными свойствами. Состав 2 может быть отнесен к условно-эффективным стеновым камням плотностью от 1401 до 1650  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

**Заключение**

Таким образом, разработанные нами составы композиционных смесей могут быть использованы как штукатурные, кладочные, теплоизоляционные растворы. Они соответствуют нормативным требованиям, имеют хорошую пластичность, удобоукладываемость, при затвердевании достигают высоких эксплуатационных характеристик. Также возможно получение стеновых камней на основе композиционного вяжущего с использованием перлитовых отходов и комплексной добавки ТВМ со сниженной плотностью, что необходимо для снижения нагрузки на фундамент строительных конструкций.

*Работа подготовлена при финансовой поддержке в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» новой лаборатории «Ресурсо-энергосберегающие технологии, оборудование и комплексы» (FZWN-2024-0002) с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.*



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alkali-activated binders based on technogenic fibrous waste / A. Klyuev, N. Kashapov, S. Klyuev [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 18. – P. e02202. – DOI 10.1016/j.cscm.2023.e02202.
2. Wastes from the production of heat-insulating basalt wool as an additive in cement-based materials / A. Klyuev, S. Klyuev, E. Fomina [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 19. – P. e02347. – DOI 10.1016/j.cscm.2023.e02347.
3. Phase formation of mortar using technogenic fibrous materials / S. Klyuev, R. Fediuk, M. Ageeva [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2022. – Vol. 16. – P. e01099. – DOI 10.1016/j.cscm.2022.e01099.
4. Improvement of technical means for recycling of technogenic waste to construction fiber / S. Klyuev, V. Sevostyanov, M. Sevostyanov [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. – 2022. – Vol. 16. – P. 01071. – DOI 10.1016/j.cscm.2022.e01071.
5. Recycling of Tire-Derived Fiber: The Contribution of Steel Cord on the Properties of Lightweight Concrete Based on Perlite Aggregate / M. Kadela, M. Malek, M. Jackowski [et al.] // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – P. 2124. – DOI 10.3390/ma16052124.
6. Махортов, Д. С. Вяжущие композиции на основе портландцемента и вулканического пепла / Д. С. Махортов, Л. Х. Загороднюк, Д. А. Сумской // *Строительные материалы и изделия*. – 2022. – Том 5, № 4. – С. 30–38. – DOI 10.58224/2618-7183-2022-5-4-30-38.
7. Punenkov, S. E. Composites materials based on natural chrysotile fibers / S. E. Punenkov // *Chemical Bulletin*. – 2024. – № 7 (1). – P. 4–21. – DOI 10.58224/2619-0575-2024-7-1-4-21.
8. Big data in predicting the climatic resistance of building materials. I. Air temperature and humidity / T. A. Nizina, D. R. Nizin, V. P. Selyaev [et al.] // *Construction Materials and Products*. – 2023. – № 6 (3). – P. 18–30. – DOI 10.58224/2618-7183-2023-6-3-18-30.
9. Injection mortars based on composite cements for soil fixation / I. I. Panarin, R. S. Fediuk, I. A. Vykhotsev [et al.] // *Construction materials and products*. – 2023. – № 6 (4). – P. 15–29. – DOI 10.58224/2618-7183-2023-6-4-15-29.
10. Study of the characteristics of pavement elements made of rein-forced soil with the use of secondary resources / D. A. Sinitsin, A.E.M.M. Elrefaei, A. O. Glazachev [et al.] // *Construction Materials and Products*. – 2023. – № 6 (6). – DOI 10.58224/2618-7183-2023-6-6-2.

**AYUBOV Narman Ayubovich<sup>1</sup>, candidate of economic sciences, professor;**  
**KLYUEV Aleksander Vasilyevich<sup>2</sup>, candidate of technical sciences, associate professor;**  
**KLYUEV Sergey Vasilyevich<sup>2</sup>, doctor of technical sciences, professor**

#### DEVELOPMENT OF COMPOSITIONS OF THERMAL INSULATION DRY BUILDING MIXES USING COMPOSITE BINDERS

<sup>1</sup> Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences (CIRAS)  
21a, Staropromyslovskoe sh., Grozny, 364051, Russia;  
e-mail: yrekly@mail.ru

<sup>2</sup> Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov  
46, Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia;  
e-mail: klyuyev@yandex.ru

*Key words:* dry mixes, composite binder, microstructure, fiber.



*The article investigates compositions of thermal insulation dry building mixes using composite binders. Experimental studies of the physical and mechanical characteristics of the developed compositions have been conducted, and research on the microstructure of the composite binder with the use of the TVM complex additive is presented.*

## REFERENCES

1. Klyuev A., Kashapov N., Klyuev S., Ageeva M., Fomina E., Sabitov L., Nedoseko I., Vatin N. I., Kozlov P., Vavrenyuk S. Alkali-activated binders based on technogenic fibrous waste. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. 18. P. e02202.
2. Klyuev A., Klyuev S., Fomina E., Shorstova E., Ageeva M., Nedoseko I., Sabitov L., Shamanov V., Shayakhmetov R., Liseitsev Yu. Wastes from the production of heat-insulating basalt wool as an additive in cement-based materials. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. 19. P. e02347.
3. Klyuev S., Fediuk R., Ageeva M., Fomina E., Klyuev A., Shorstova E., Zolotareva S., Shchekina N., Shapovalova A., Sabitov L. Phase formation of mortar using tech-nogenic fibrous materials. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. T. 16. P. e01099.
4. Klyuev S., Sevostyanov V., Sevostyanov M., Ageeva M., Fomina E., Klyuev A., Protsenko A., Goryagin P., Babukov V., Shamgulov R., Fediuk R., Sabitov L. Improvement of technical means for recycling of technogenic waste to construction fiber. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. T. 16. P. e01071.
5. Kadela M., Malek M., Jackowski M., Kunikowski M., Klimek A., Dudek D., Roškowicz M. Recycling of Tire-Derived Fiber: The Contribution of Steel Cord on the Properties of Lightweight Concrete Based on Perlite Aggregate. *Materials*. 2023. 16. 2124. 10.3390/ma16052124.
6. Makhortov D. S., Zagorodnyuk L. H., Sumskey D. A. Vyazhushchie kompozitsii na osnove portlandtsementa i vulkanicheskogo pepla [Binder compositions based on Portland cement and volcanic ash]. *Stroitelnye materialy i izdeliya [Construction Materials and Products]*. 2022. №5 (4). P. 30–38.
7. Punenkov S. E. Composites materials based on natural chrysotile fibers. *Chemical Bulletin*. 2024. 7 (1). P. 4 – 21. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-1-4-21.
8. Nizina T. A., Nizin D. R., Selyaev V. P., Spirin I. P., Stankevich A. S. Big data in predicting the climatic resistance of building materials. I. Air temperature and humidity. *Construction Materials and Products*. 2023. 6. (3). P. 18–30. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-3-18-30>.
9. Panarin I. I., Fediuk R. S., Vykholdtsev I. A., Vavrenyuk S. V., Klyuev A. V. Injection mortars based on composite cements for soil fixation. *Construction materials and products*. 2023. 6 (4.) P. 15–29. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-4-15-29>.
10. Sinitsin D. A., Elrefaei A.E.M.M., Glazachev A. O., Kuznetsov D. V., Parfenova A. A., Volokitina I. E., Kayumova E. I., Nedoseko I. V. Study of the characteristics of pavement elements made of rein-forced soil with the use of secondary resources. *Construction Materials and Products*. 2023. 6 (6). 2. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-6-2.

© Н. А. Аюбов, А. В. Ключев, С. В. Ключев, 2024

Получено: 10.08.2024 г.