Моделирование структуры и свойств легкой штукатурной системы с применением вулканического туфа

Демиссе Бекеле Арега
магистр строительства, аспирант, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); ассистент кафедры архитектуры и реставрации, Российский университет дружбы народов (РУДН), aregabekalu@gmail.com,

Язьев Сердар Батырович
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологий строительства и конструкционных материалов, Российский университет дружбы народов, russiangel@mail.ru,

Жуков Алексей Дмитриевич
доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики, Российская академия архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), lj211@yandex.ru,

Медведев Андрей Александрович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Национального исследовательского, Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); доцент кафедры геофизики, Российский геологоразведочный университет (РГГРУ-МГРИ), medvedev747@yandex.ru

Преимуществом штукатурных смесей на основе туфа-скории является возможность получения материала со средней плотностью до 700 кг/м3, теплопроводностью до 0,18 Вт/(м·°С) и прочностью при сжатии до 7,4 МПа. Это позволяет рассматривать такое штукатурное покрытие как теплоизоляционно-конструкционное и применять его как в новом строительстве, так и при реконструкции.
Целью исследований, изложенных в статье, являлось изучение структуры штукатурного покрытия, построение на основе структурной модели алгебраических моделей свойств этого покрытия и проверка полученных результатов в контрольных сериях эксперимента.
Основой для построения структурной модели являлись априорная информация и фотоматериалы, полученные на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 TESCAN. В результате анализа модели получены аналитические зависимости, связывающие со структурными характеристиками прочность при сжатии материала и его теплопроводность. Осуществлена проверка аналитических результатов в контрольных сериях эксперимента.
Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями составило 3–6% для прочности при сжатии и 5–10% для теплопроводности, что соответствует уровням точности при решении технологических задач, связанных с легкими бетонами.
Ключевые слова: вулканический туф, структурная модель, аналитические зависимости, сходимость результатов, активный эксперимент, прочность, теплопроводность.

БЛАГОДАРНОСТИ (Acknowledgments)
Исследования проводились в рамках реализации научно – исследовательской работы по теме ФНИ РААСН №3.1.2.1 «Развитие теоретических основ получения особолёгких неорганических строительных материалов и исследование влияния пористой структуры на их теплофизические и акустические характеристики», выполняемой по заданию Минстрой России.
Исследования проводились на экспериментальной базе Jimma University School of Civil and Environmental Engineering Construction (Эфиопия), BESIME SILEHONA LLC (Эфиопия). Часть исследований выполнены в лабораториях РУДН, НИИСФ РААСН и НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли — новые технологии, новые материалы, новые методы».

Введение

Одним из основных факторов, определяющих свойства строительных материалов и особенно легких минеральных композиционных, является их структура. В зависимости от технологии, снижение средней плотности подобных материалов может осуществляться смешением со стабилизированными пенами, вспучиванием в результате газообразования, или за счет введения легких или особолегких заполнителей. Подобные приемы используют как в технологии легкой и теплоизоляционной керамики, так и при получении гипсосодержащих изделий, а также легких бетонов и их аналогов [1-3].

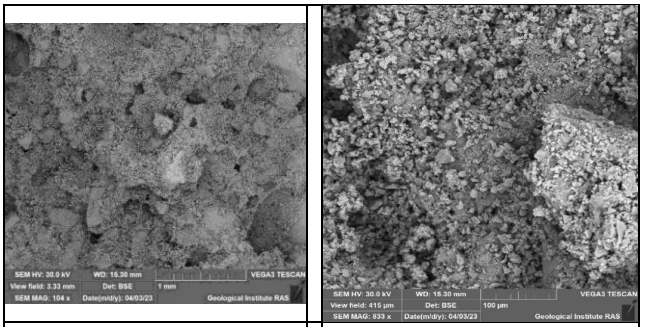
Легкие штукатурные смеси на основе гидравлического вяжущего (портландцемента с активными модифицирующими добавками) можно отнести по свойствам и особенностям технологии к легким бетонам на особолегких заполнителях. Существуют рецептурные решения, согласно которым в качестве таких заполнителей может использоваться вспененный отсев полистирола, вспученный перлит или измельченное пеностекло. Ограничительными причинами для подобных материалов являются невысокая адгезионная прочность между гранулами пенополистирола и минеральной матрицей, высокое водопоглощение перлита. Изучение возможности применения измельченного пеностекольного щебня находится на уровне лабораторных исследований [4-6]. Возможность применения легких природных компонентов (пемзы, вулканических шлаков и туфов) также находится на стадии изучения. В пользу применения этих материалов свидетельствует их природный характер. Например, чтобы вспучить перлитовую породу ее надо размолоть и обжечь, пеностекло также является обжиговым материалом, в то время как излившиеся вулканические породы вспучиваются при пиропластическом состоянии вулканической лавы и фиксируют структуру в процессе остывания. Очевидно, что энергозатраты значительно снижаются. Этот фактор предопределяет повышение энергетической эффективности строительных конструкций на основе природных материалов [7-9]. К этой группе относится вулканический туф-скория, месторождения которого находятся в Центральной и Южной Африке, Латинской Америке и на островах Океании. В Европейской части наиболее близким по свойствам являются армянские туфы месторождения Ани и месторождениям Южного Урала, некоторые виды туфов обладают также свойствами, характерными для цеолитов.

В рассматриваемых материалах вулканический туф проявляется на двух уровнях: как мелкий заполнитель, обладающий смешанной (в основном закрытой) пористостью, и как активный минеральный компонент. Свойства материала зависят как от свойств туфа, так и от характера его распределения в материале и взаимодействия с другими составляющими смеси и изделия. Поэтому для оценки свойств материала целесообразно применять методы физического и аналитического моделирования.

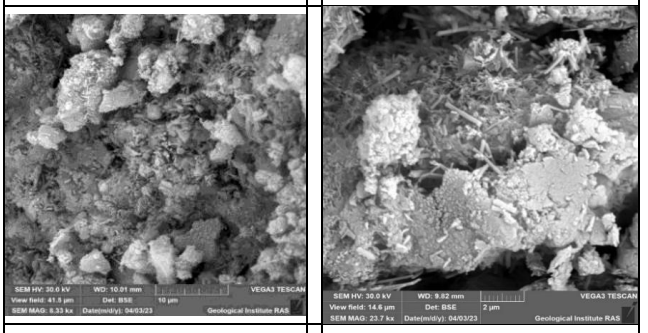
Целью исследований, изложенных в статье, являлось изучение структуры штукатурного покрытия, построение на основе структурной модели алгебраических моделей свойств этого покрытия и проверка полученных результатов в контрольных сериях эксперимента.

Изучение структуры легкого штукатурного покрытия

Моделирование свойств любого многокомпонентного материала начинается с формирования структурной модели, учитывающей виды компонентов и возможный характер взаимодействия между ними. В данном случае компонентами штукатурного покрытия (рис. 1) являются фракционированные частицы вулканического туфа, минеральная матрица, состоящая из отвержденного модифицированного гидравлического вяжущего (портландцемент, синтетический модификатор и тонкомолотый вулканический туф в качестве активной минеральной добавки) и армирующий компонент. Установлено, что для получения материала средняя плотностью 700 кг/м³ расход измельченного туфа-скории должен составлять 370 кг/м³, расход модифицированного гидравлического вяжущего (содержание тонкомолотого туфа 24-26%) — 250 кг/м³, а расход армирующего компонента (минерального волокна) — 3,8 кг/м³ [10-12]. Структура отвержденной штукатурной смеси представлена на фотографиях, полученных на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 TESCAN.



Sem mag100 | Sem mag 800



Sem mag k8,33 | Sem mag k28,7

Рис. 1 – Структурные элементы штукатурной системы: в возрасте 28 суток: при увеличении: а – Sem mag 100; б – Sem mag 800; в – Sem mag 8,33 kx; 3 – Sem mag 28,7 kx.

Структура материала достаточно сложна, и ее детальная формализация затруднена. Однако априорная информация и результаты анализа фотоматериалов позволили сформировать модель структуры затвердевшей легкой штукатурной смеси, являющейся по своей сути мелкозернистым легким бетоном на легком заполнителе, армированным минеральным волокном. Отличие геометрической модели от реальной структуры в первую очередь обусловлено формой реальных частиц, а также наличием зон поверхностного водопоглощения частиц туфа как мелкого заполнителя (рис. 2). Нюансы геометрии частиц учитываются коэффициентом относительного эксцентриситета, а поверхностное водопоглощение — переходной зоной (зоной проникновения вяжущего и воды в частицы туфа-скории).

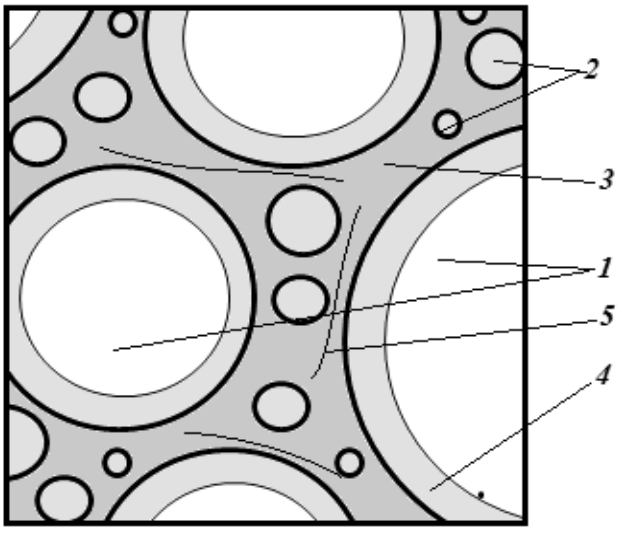


Рис. 2. Структурная модель штукатурного покрытия: 1 – частицы туфа-скория фракции 1,2–2,4; 2 – частицы туфа-скория фракции 0,2–0,4; 3 – минеральная матица (модифицированное гидравлическое вяжущее; 4 – переходная зона; 5 – минеральное волокно

Структурная модель является основой для получения аналитических уравнений, устанавливающих зависимость прочности при сжатии и теплопроводности от свойств материалов, формирующих структуру штукатурного покрытия.

Прочность на сжатие ($R_{сж}$) является, в первую очередь, функцией прочностей матрицы ($R_м$) и заполнителя — вулканического туфа ($R_т$), а также долей их присутствия в горизонтальном срезе по поверхности материала:

$$R_{сж} = \frac{R_B \times R_T}{R_B \times (1 - K_1) + R_T K_1} \qquad (1)$$

Теплопроводность материала является функцией общего потока тепла (q), равного сумме потоков тепла, проходящего через матрицу (qм) и через частицы вулканического туфа, распределенного в этой матрице (qт). Эти потоки пропорциональны теплопроводности каждого из элементов: теплопроводности туфа-скории (λт) и теплопроводности матрицы (λм):

$$\lambda = \lambda_т \times (1 - K_1) + \lambda_м \times K_1 \qquad (2)$$

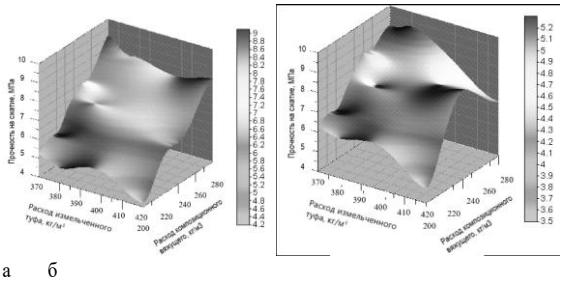
В формулах (1 и 2) K_1 – коэффициент, учитывающий отношение площади, занимаемой наиболее прочным компонентом (минеральной матрицей, $F_в$) к общей площади сечения (F). Прочность туфа и прочность матрицы, а также их теплопроводности являются известными факторами, а отношение площадей определяют исходя из расходов туфа и вяжущего.

Проверка расчетных формул в контрольных сериях эксперимента

Проверка расчетных формул осуществлялась в контрольных сериях активного (натурного) эксперимента. Расходы компонентов (кг/м3) представлены в столбцах 2-4 табл. 1. Расчетные значения определялись по формулам (1 и 2) и заносились в столбцы 5 и 7 табл. 1. Всего проведено 18 натурных опытов и в каждой серии опыт повторялся 5 раз. Определялось среднее значение результата и дисперсия параллельных опытов. Средние значения результатов заносились в столбцы 6 и 8 табл. 1.

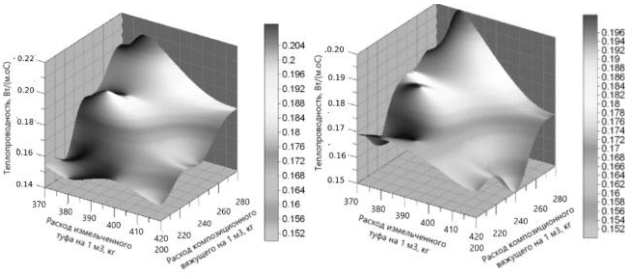
Таблица 1
Свойства штукатурного покрытия. Расчётные и экспериментальные значения

№ опыта	Расходы компонентов, кг/м^3			Прочность при сжатии, МПа		Теплопроводность, Вт/(м· °С)	
	Измельченного туфа	Композиционного вяжущего	Армирующего компонента	Расчётная	Эксперимент	Расчётная	Эксперимент
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1	420	280	4	8,4	8,1	0,18	0,17
2	420	280	2,5	7,2	7,0	0,17	0,16
3	420	240	4	6,2	6,5	0,16	0,15
4	420	240	2,5	5,8	5,6	0,15	0,15
5	420	200	4	4,2	4,2	0,15	0,16
6	420	200	2,5	4,0	4,1	0,14	0,13
7	380	280	4	8,4	7,9	0,21	0,20
8	380	280	2,5	7,4	7,1	0,20	0,19
9	380	240	4	7,0	7,2	0,19	0,18
10	380	240	2,5	6,3	6,5	0,18	0,18
11	380	200	4	4,8	4,9	0,15	0,17
12	380	200	2,5	4,4	4,0	0,14	0,16
13	370	280	4	9,1	8,9	0,20	0,18
14	370	280	2,5	8,3	8,0	0,19	0,17
15	370	250	4	7,5	7,4	0,18	0,18
16	370	250	2,5	6,8	7,0	0,17	0,19
17	370	220	4	5,7	5,5	0,15	0,16
18	370	220	2,5	5,2	5,0	0,14	0,16



а б

Рис. 3. Прочностные характеристики штукатурного материала при расходе армирующего компонента 4 кг/м^3: а – расчетная прочность на сжатие б – экспериментальная прочность на сжатие. Обработка результатов в Excel, программа Golden Software Grapher



Графическая интерпретация уравнений (1 и 2), а также результатов контрольных экспериментов по определению прочности при сжатии штукатурного покрытия, получена в результате обработки данных в программе Golden Software Grapher. Графики зависимости теплопроводности от расхода измельченного туфа и расхода модифицированного гидравлического вяжущего при таком же расходе армирующего компонента приведены на рис. 3 и 4.

а б

Рис. 4. Теплопроводность штукатурного покрытия в сухом состоянии при расходе армирующего компонента 4 кг/м³: а – расчетные значения; б – экспериментальные значения. Обработка результатов в Excel, программа Golden Software Grapher

Расхождение по прочности на сжатие значений между расчётными и экспериментальными значениями составило 3-6%; по теплопроводности — 5-10%. Эти результаты вполне соответствуют уровням точности при решении технологических задач, связанных с подбором состава мелкозернистых легких бетонов.

Разработанные модели позволяют представить более полно вклад каждого структурного элемента штукатурного покрытия в формирование свойств материала, а также наравне с результатами оптимизации статистических модей, прогнозировать свойства штукатурного покрытия.

Заключение

Вулканический туф скория распространен в центральной Африке и Латинской Америке, а в Европе месторождение его ближайших аналогов можно встретить в Армении, Бурятии и на Южном Урале. По сравнению с другими видами легких минеральных наполнителей туф-скория является природным материалом, и его подготовка не связана с энергоемкими процессами, такими как высокотемпературное вспучивание. Преимуществами штукатурных смесей на основе туфа-скория является возможность получения материала средней плотность до 700 кг/м³ и теплопроводностью до 0,18 Вт/(м·°С) при прочности при сжатии до 7,4 МПа.

Проведенное моделирование структуры и основных свойств легкого штукатурного покрытия позволило оценить их аналитическую взаимосвязь, проверенную в результате реализации активного эксперимента. Расхождение по прочности на сжатие значений между расчётными и экспериментальными значениями составило 3…6%; по теплопроводности 5-10%. Применение легкого штукатурного покрытия на основе туфа-скория допустимо как при новом строительстве, так и при реконструкции.

Литература

1. Гагарин, В.Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий. // Строительные материалы. 2010. №3. С. 8–16.
2. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медникова Е.А. Энергетическая эффективность строи тельных систем: ООО «Научно-издательский центр Инфра-М», 2022;329. (Научная мысль). ISBN 978-5-16 017479-2. https://doi.org/10.12737/1856852 – EDN: OUWLAU.
3. Korneyev A., Egorova E. Highly Efficient Glass Ceramic Ther mal Insulation / E3S Web of Conferences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126301017
4. Кудрявцев П.Г. Состав и структура пористых термостойких неорганических композиционных материалов // Нанотехнологии в строительстве. – 2018. – Том 10, № 4. – С. 75–100. – DOI: 10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100.
5. Математическое моделирование физико-химических про цессов в пористых средах при решении задач создания нано композиционных материалов и влагонаполнения / В. В. Ку зина, С. В. Самченко, И. В. Козлова, А. Н. Кошев // Нанотех нологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 298-309. – https://doi.org/10.15828/2075 8545-2023-15-5-298-309. – EDN NIOSQQ.
6. Efimov B., Isachenko S., Kodzoev M.B. [et al.] Dispersed reinforcement in concrete technology. E3S Web of Conferences: 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018, St. Petersburg, 10–12 декабря 2018 года. Vol. 110. – St. Petersburg: EDP Sciences. 2019:01032. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001032 – EDN: HGSKBP.
7. Хеирбеков, Р. А. Некоторые физико-химические аспекты формирования структуры композиционного шлакосиликат ного поризованного арболитового материала / Р. А. Хеирбе ков, С. В. Самченко // Техника и технология силикатов. – 2022. – Т. 29, № 4. – С. 379-390. – EDN JKBDQD.
8. Samchenko, S. V. Formation of Cellular Concrete Struc tures Based on Waste Glass and Liquid Glass / S. V. Sam chenko, A. V. Korshunov // Buildings. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – P. 17. – https://doi.org/10.3390/buildings14010017. – EDN WLXSWL.
9. Оптимизация составов фасадных штукатурок на основе модифицированного вяжущего / А.Д. Жуков, И.И. Попов, Б.А. Ефимов, Б.А. Демиссе, В.В. Белканов. — DOI: 10.32683/0536-1952-761-5-57-66 // Известия вузов. Строительство. — 2022. — № 5. — С. 57–66.
10. Фасадные штукатурные системы с применением модифицированного вяжущего / А.Д. Жуков, И.В. Бессонов, А.В. Кулапин, А.А. Медведев, Б.А. Демиссе, Р.С. Поудел. — DOI: 10.31659/0585-430X-2022-808-11-37-41 // Строительные материалы. — 2022. — № 11. — С. 37–41.
11. Патент № 2814955 Российская Федерация, МПК E04F 13/02 (2006.01), E04B (2006.01). Способ формирования фасадной легкой штукатурной системы : № 2023111021 : заявл. 28.04.2023 : опубл. 07.03.2024 / Жуков А.Д., Демиссе Бекеле Арега, Поудел Рави Сагар, Бессонов И.В. — 7 с.
12. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медведев А.А., Демиссе Б.А. Применение статистических методов для решения задач строительного материаловедения // «Нано технологии в строительстве: научный интернет-журнал». – 2020. – Том 12, № 6. – С. 313–319. – https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319 .

Modeling the Structure and Properties of a Lightweight Plaster System Using Volcanic Tuff

Demisse B.A., Yazyev S.B., Zhukov A.D., Medvedev A.A.

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN), Russian State Geological Prospecting University (MGRI)

Tuff-scoria-based plaster mixtures can produce a material with an average density of up to 700 kg/m3, thermal conductivity of up to 0.18 W/(m·°C), and compressive strength of up to 7.4 MPa. These characteristics allow the plaster coating to be considered a thermal-insulating structural material suitable for both new construction and renovation. The study aimed to examine the structure of the plaster coating, develop algebraic models of its properties from a structural model, and verify the results in control experimental series. The structural model was based on prior information and micrographs obtained with a VEGA 3 TESCAN scanning electron microscope. The model analysis yielded analytical relationships connecting the material's compressive strength and thermal conductivity with its structural characteristics. The analytical results were verified experimentally. The difference between calculated and experimental values was 3-6% for compressive strength and 5-10% for thermal conductivity, which is consistent with the accuracy required for technological problems involving lightweight concrete.

Keywords: volcanic tuff, structural model, analytical relationships, convergence of results, active experiment, strength, thermal conductivity.

References

1. Gagarin V.G. Macroeconomic aspects of substantiating energy-saving measures when improving the thermal protection of building envelopes. Stroitel'nye materialy. 2010;(3):8-16. (In Russian).
2. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Mednikova E.A. Energy Efficiency of Building Systems. Moscow: INFRA-M; 2022. 329 p. ISBN 978-5-16-017479-2. https://doi.org/10.12737/1856852. EDN: OUWLAU. (In Russian).
3. Korneyev A., Egorova E. Highly efficient glass ceramic thermal insulation. E3S Web of Conferences. 2021;263:01017. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126301017.
4. Kudryavtsev P.G. Composition and structure of porous heat-resistant inorganic composite materials. Nanotechnologies in Construction. 2018;10(4):75-100. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100. (In Russian).
5. Kuzina V.V., Samchenko S.V., Kozlova I.V., Koshev A.N. Mathematical modeling of physicochemical processes in porous media in problems of creating nanocomposite materials and moisture filling. Nanotechnologies in Construction. 2023;15(4):298-309. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-298-309. EDN: NIOSQQ. (In Russian).
6. Efimov B., Isachenko S., Kodzoev M.B., et al. Dispersed reinforcement in concrete technology. E3S Web of Conferences. 2019;110:01032. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001032. EDN: HGSKBP.
7. Kheirbekov R.A., Samchenko S.V. Some physicochemical aspects of structure formation in a composite slag-silicate porous wood-concrete material. Tekhnika i tekhnologiya silikatov. 2022;29(4):379-390. EDN: JKBDQD. (In Russian).
8. Samchenko S.V., Korshunov A.V. Formation of cellular concrete structures based on waste glass and liquid glass. Buildings. 2024;14(1):17. https://doi.org/10.3390/buildings14010017. EDN: WLXSWL.
9. Zhukov A.D., Popov I.I., Efimov B.A., Demisse B.A., Belkanov V.V. Optimization of facade plaster compositions based on a modified binder. News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022;(5):57-66. https://doi.org/10.32683/0536-1952-761-5-57-66. (In Russian).
10. Zhukov A.D., Bessonov I.V., Kulapin A.V., Medvedev A.A., Demisse B.A., Poudel R.S. Facade plaster systems using a modified binder. Construction Materials. 2022;(11):37-41. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-37-41. (In Russian).