Свойства 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,

Ефимов Борис Александрович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), boris.alexandr.efimov@gmail.com

В соответствии с требованиями энергетической эффективности, включающей оценку затрат не только при эксплуатации, но и при изготовлении и монтаже строительных конструкций, применение легких штукатурных смесей оправдано в регионах с умеренным, жарким или резко континентальным климатом.
Целью исследований, изложенных в статье, была оценка механических свойств штукатурного покрытия. Установлено, что легкое штукатурное покрытие на основе вулканического туфа имеет прочность на сжатие — 7,4 МПа; прочность при изгибе — 3,6 МПа; теплопроводность 0,14-0,16 Вт/(моС), водопоглощение по объему 3-5 %; водопоглощение при контакте с поверхностью воды до 12%; паропроницаемость в пределах 0,18 г/м·ч·Па и марку по морозостойкости F35-50.
Оптимальными материалами основания для легких штукатурных покрытий на основе вулканического туфа являются поверхности из ячеистобетонных блоков или кирпича. Эти покрытия могут использоваться как при новом строительстве, так и при реконструкции зданий различного назначения.
Ключевые слова: вулканический туф-скория, штукатурное покрытие, новое строительство, реконструкция зданий, энергетическая эффективность.

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 выполнена 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

Решение вопросов повышения энергетической эффективности строительных конструкций включает реализацию следующих направлений. Во-первых, это снижение затрат на производство материалов, логистические операции и монтаж материалов в конструкцию. Во-вторых, обеспечение комфортности в помещениях как по тепло-влажностному режиму, так и по пожарной и экологической безопасности. В-третьих, обеспечение высокой долговечности конструкций. В-четвертых, сокращение затрат на поддержание оптимального микроклимата: потерь тепла в холодный период и на кондиционирование в жаркий период [1-3].

С позиций энергетической эффективности выбор системы изоляции зданий зависит, в том числе, от региона строительства. Для Заполярья и других холодных регионов необходимо применение многослойной теплоизоляции на основе теплоэффективных материалов, таких как изделия из минеральной или каменной ваты, вспененных пластмасс (экструзионного пенополистирола, пенополиэтилена), пеностекла и пр. для регионов с умеренным климатом целесообразно применение «упрощенных» слоистых систем. В регионах с умеренным, жарким или резко континентальным климатом возможно применение покрытий, сочетающих как изоляционные, акустические и декоративные характеристики. Отметим, что легкие штукатурные смеси вполне соответствуют критериям по 1-3 группам. Остается важной четвертая группа критериев, ранее именовавшаяся «энергосбережением» [4-6].

Опыт эксплуатации зданий с фасадной теплоизоляцией показал, что наиболее уязвимым элементом данной системы является штукатурное покрытие. Его эксплуатационная надежность и долговечность определяются как свойствами самого покрытия, так и воздействием двух основных факторов. Во-первых, это стеснённые деформации штукатурного покрытия, возникающие в условиях его усадки и перепадов температур. Во-вторых, это изменение состояния легкого штукатурного покрытия за счет климатических факторов и изменения влагосодержания и температуры легкого штукатурного покрытия, предполагающих возникновение термомеханических напряжений [7-9].

Целью исследований, изложенных в статье, была оценка механических свойств штукатурного покрытия, а также влияние на его свойства различных климатических факторов.

Расчет несущей стены с легким штукатурным покрытием

Применение вулканического туфа как компонента вяжущего и в виде легкого заполнителя обусловливает незначительные значения внутреннего отрицательного давления, а усадочные деформации в процессе твердения минимизированы и не превышают 0,2 мм/м.

Температурные деформации легкого штукатурного покрытия связаны с различными значениями коэффициента линейного расширения (α = 0,8-1,0 ·10-5), который при сезонном изменении температуры окружающей среды на 50 °С может привести к деформации легкого штукатурного раствора до 0,4 мм/м, при этом в штукатурке развиваются температурные напряжения.

Климатический фактор для условий эксплуатации в умеренной климатической зоне предполагает возможное накопление влаги в процессе сезонных температурных колебаний и в переходные периоды «зима-весна» и «осень-зима» (за счет конденсации влаги в температурных интервалах, характерных для точки росы), а также за счет прямого попадания капельной жидкости на штукатурное покрытие. В засушливых или жарких регионах происходит обратный процесс — высушивание легкого штукатурного покрытия. Как уже отмечалось, ключевым фактором, определяющим долговечность штукатурного покрытия, является стойкость легкой штукатурки к растрескиванию под действием усадочных и термомеханических напряжений [10-12].

Штукатурное покрытие наносится на стену (основание) с определёнными конечными значениями толщины и жесткости. Практический интерес при этом представляет решение задачи о напряжённом состоянии штукатурного покрытия в составе однослойной стены при ветровых, усадочных и термомеханических воздействиях.

Рассмотрим случай однослойной штукатурки толщиной 10 мм, нанесенной на жёсткую основу кладки из ячеистобетонных блоков (рис. 1). Штукатурное покрытие работает совместно с основой за счет сцепления по границе

двух фаз. Конструкция является несущей стеной второго этажа двухэтажного здания коттеджного типа (с покрытием из легкой штукатурки), опирающейся на перекрытие, и воспринимающей нагрузку от конструкции перекрытия, крыши, а также от собственного веса и ветра в пределах одного этажа при высоте этажа не более 5,7 м.

Расчет производят по первой группе предельных состояний, при этом проверить следующие условия: прочность стены как внецентренно-сжатого элемента, устойчивость при сдвиге от ветровой нагрузки. Для расчета принят фрагмент легкого штукатурного покрытия, включающий стены со следующими геометрическими характеристиками (h×l×δo): 2,7×1×0,4 (м) и штукатурное покрытие. Класс конструкционно-теплоизоляционных блоков из ячеистого бетона по прочности В3,5; по плотности D500. Блоки укладывают на цементный клей, принимается средняя плотность кладки 510 кг/м3; плотность легкой штукатурки (толщиной δш) 300 кг/м3.

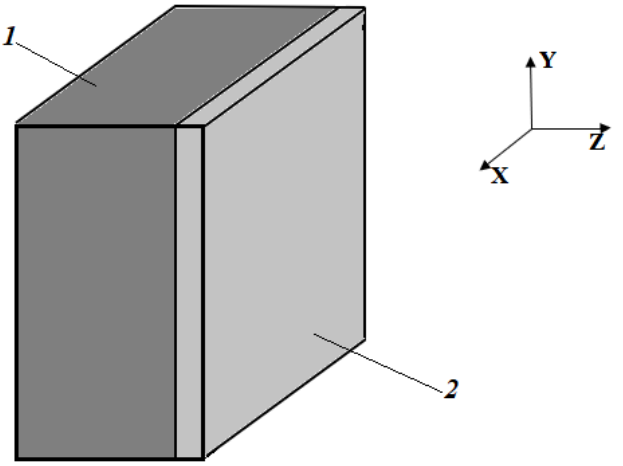


Рис. 1. Фрагмент конструкции в координатах XYZ: 1 – несущее основание; 2 – штукатурное покрытие

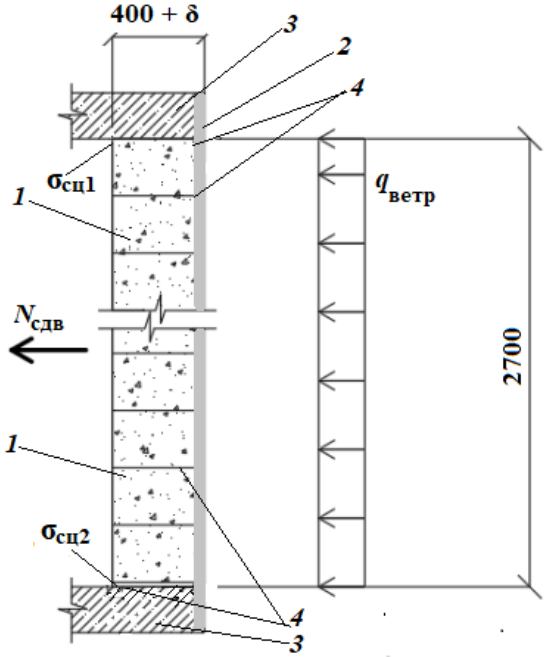


Рис. 2. Схема усилий в кладке фрагмента ограждающей конструкции в результате действия горизонтального усилия сдвига: 1 – самонесущая стена (кладка из ячеистобетонных блоков); 2 – слой из легкой штукатурки; 3 – монолитное перекрытие; 4 – растворный шов

Расчет производят, как для наружной оштукатуренной стены, находящейся на втором жилом этаже двухэтажного коттеджа. Расчетные нагрузки от ветрового давления принимаем максимальные, то есть для наветренной стороны здания: $w_н$ = 0,51 кПа. Внешний вид изолируемой стены приведен на рис. 2. Расчетная схема системы легкого штукатурного покрытия приведена на рис. 3.

Определяем расчетную нагрузку от собственного веса конструкции. Масса кладки: $N_{яб} = H \cdot \delta \cdot l \cdot \rho \cdot \gamma_f$. H – высота конструкции, 2,7 м; δ – толщина кладки из ячеистого бетона, 0,4 м; l – расчетная длина конструкции, 1 м; ρ – плотность кладки из ячеистобетонных блоков – ρ = 510 кг/м^3; γ_f – коэффициент надежности по нагрузке равен 1,2). $N_{яб}$ = 2,7·0,4·1·510·1,2 = 874,0 кг.



а б

Рис. 3. Расчетная схема ограждающей конструкции (а) и результаты статического расчета (б)

Аналогично определяем нагрузку от штукатурного слоя: $N_ш$ = 2,7 · 0,1 · 1 · 300 = 81,0 кг. Общая нагрузка от собственного веса 955,0 кг. С учетом вышерасположенных конструкций принимаем нагрузку 1082,0 кг или $N_{св1}$ = 10,82 кН. С учетом веса конструкции на этаже, принимаем нагрузку 1082,0+955,0 = 2037,0 кг или $N_{св2}$ = 20,37 кН.

Статический расчет наружной стены произведен в ПК ЛИРА-САПР. Устойчивость стены с покрытием против сдвига (от воздействия ветровой нагрузки) определяется согласно формуле: Nсдв ≤ (mудер/nудер)Nудер. Где nудер − коэффициент надежности при проверке устойчивости, равный 0,9 [124]; Nсдв − сдвигающие горизонтальные нагрузки; Nудер − удерживающие горизонтальные силы.

Схема усилий в кладке фрагмента ограждающей конструкции (стены со штукатурным покрытием) в результате действия горизонтального усилия сдвига представлена на рисунке 4.12. Сдвигающие горизонтальные нагрузки определяем по формуле $N_{сдв} = w_в \cdot H \cdot l$ = 0,52·2,7·1 = 1,40 кН. Удерживающие горизонтальные силы определяем по зависимости $N_{удер} = R_{sq} \cdot A$. С учетом того, что фрагмент кладки находится в обойме (сжатом состоянии между перекрытиями), удерживается слоями контактного раствора (напряжения $\sigma_{сц1}$ и $\sigma_{сц2}$), а также с учетом расчетного сопротивления кладки на срез по неперевязанному сечению (касательное сцепление) Rs_q, равному 0,16 МПа (160 кН/м^2): $N_{удер}$ = 160·0,4·1 = 64 кН

$N_{сдв}$ = 4,23 кН < $N_{удер}$ = 64 кН

Условие устойчивости простенка против сдвига выполняется.

Напряженное состояние в штукатурной системе

Учитывая, что толщина штукатурного покрытия (δ) намного меньше его линейных размеров в направлениях O_x, O_y (l_X , l_y), можно полагать, что штукатурный слой находится в условиях плоского напряженного состояния (рисунок 6). В этом случае связь между нормальными напряжениями и деформациями в направлении оси O_x, с учетом модуля упругости и коэффициента Пуассона покрытия (соответственно E и μ) описывается уравнением:

$$\varepsilon_X = \frac{\sigma_X}{E} - \mu\frac{\sigma_Y}{E} \qquad (1)$$

В зоне, достаточно удаленной от края штукатурного покрытия (на расстоянии более 4-5 толщин покрытия δ) нормальные напряжения по осям Ox и Oy можно считать равными. С учетом уравнения (1), показателя разницы свободных деформаций материала основания и покрытия (ΔεX), а также с учетом коэффициента упругопластических деформаций штукатурного покрытия при растяжении (vt < 1) получаем зависимость:

$$\sigma_X = \sigma_y = \frac{\Delta_{\varepsilon X} v_t E}{1-\mu} \qquad (2)$$

Для штукатурного слоя на основе бездобавочного цементно-песчаного раствора марки 50 (при E ~ 6·10^3 МПа, $\Delta_{\varepsilon X} = \varepsilon_{Sh,nm}$ ~ 40·10^{-5} (полная усадка штукатурного раствора), μ ~ 0,3, v_t ~ 0,5) величина растягивающих усадочных напряжений составляет $\sigma_x = \sigma_y$= 1,41 МПа. Для легкого штукатурного раствора с учетом эффектов влияния водоудерживающих компонентов и условий адгезии величина внутренних напряжений не превышает разрушающего напряжения 0,5 МПа, что соответствует требуемым нормативным показателям и условиям отсутствия трещин.

Анализ уравнения (2) показывает, что повышению трещиностойкости легких штукатурок на цементной основе по отношению к усадочным и термомеханическим напряжениям будет содействовать повышение упругопластических характеристик раствора и его предельной деформативности (снижение параметров vt и E), повышение прочности на растяжение и снижение усадки раствора.

Вышеперечисленные результаты, полученные с применением формул теории упругости, были подтверждены расчётами, выполненными на ЭВМ с использованием программы «COSMOSM 2.8» (256 Version).

Расчёты выполнялись на два вида основных воздействий, которым штукатурное покрытие подвергается в процессе эксплуатации. В качестве базы для сравнения использовалось штукатурное покрытие на основе портландцемента; полная усадка раствора, принимаемая равной 40·10-5. Легкое штукатурное покрытие на основе вулканического туфа характеризовалось полной усадкой 5·10-5. Температурная деформация при прямом ходе температуры из лета в зиму от +20 °С до минус 35 °С, принималась равной 55·10-5.

В качестве основания под штукатурное покрытие была принята кладка из блоков на основе ячеистого бетона, показавшая лучшие значения при исследовании адгезионных свойств. Толщина легкого штукатурного слоя принималась равной 10, 20 и 30 мм.

По результатам расчётов были построены графики распределения напряжений в штукатурном слое. Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы. Во-первых, при нанесении классического штука-

турного покрытия (на основе раствора М50) усадочные напряжения в нём составляют 1,2-1,5 МПа, что выше расчетного сопротивления на растяжение согласно нормативным показателям (Rbt,ser ~ 0,3-0,35 МПа) и разрушающего напряжения 0,5 МПа. Это приводит к температурно-усадочному растрескиванию штукатурных покрытий. Во-вторых, при использовании легкого штукатурного покрытия на основе вулканического туфа, усадочные напряжения в штукатурном слое не превышают 0,45 МПа. В-третьих, усадочные напряжения зависят от толщины штукатурного слоя (рис. 4), и при толщине до 20 мм полностью соответствуют нормативным требованиям. При большей толщине целесообразно применение штукатурной сетки.



Рис. 4. Напряжения в штукатурном покрытии при толщине штукатурного слоя: 1 – 30 мм; 2 – 20, мм; 1 – 10, мм

В местах концентрации напряжений (оконные и дверные проемы, углы конструкции) главные растягивающие напряжения в штукатурных покрытиях возрастают в 1,2... 1,8 раза. В связи с этим необходимо выполнять дополнительное армирование проблемных участков сетками на основе щелочестойкого стеклянного волокна.

Заключение

Применение легких штукатурных покрытий целесообразно в регионах с умеренным, жарким или резко континентальным климатом. Наиболее уязвимым элементом системы изоляции является штукатурное покрытие. Ключевым фактором, определяющим долговечность штукатурного покрытия, является стойкость фасадной штукатурки к растрескиванию под действием усадочных и термомеханических напряжений.

Исследовано напряжённое состояние штукатурных покрытий от действия усадки и перепадов температур на различных по жесткости вариантах основы, включая работу штукатурок в системе фасадной теплоизоляции. Установлено 5-10-кратное снижение напряжений в слое легкого штукатурного покрытия на основе вулканического туфа, что предопределяется значительным снижением степени стеснённости деформаций штукатурного слоя.

Оптимальными материалами основания для легких штукатурных покрытий на основе вулканического туфа являются поверхности из ячеистобетонных блоков или кирпича. Эти покрытия могут использоваться как при новом строительстве, так и при реконструкции зданий различного назначения.

Литература

1. Гагарин, В.Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий. // Строительные материалы. 2010. №3. С. 8–16.
2. Лесовик В.С. Строительные материалы и изделия: учеб. пособ. по направлению 270100 "Строительство" [Текст] / В. С. Лесовик, А. М. Гридчин, Н. И. Алфимова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – 222 с. ISBN: 978-5-361-00161-3
3. Zhukov A.D. Energy efficiency of building systems / A.D. Zhukov, E.Y. Bobrova, I.V. Bessonov, E.A. Mednikova. Monograph. SIC INFRA-M. 2022. p. 329. ISBN: 978-5-16-017479-2
4. Aleksey D Zhukov, Igor Bessonov, Boris Efimov, Andrey Medvedev and Alexey Poserenin. Foam fiber-reinforced concrete: technology and methodology of selection of the composition 012072 // (2020). MCPE-2020. August 2020 IOP Conference Series Materials Science and Engineering 896:012072. doi: 10.1088/1757-899X/896/1/012072
5. Рубцов О.И., Боброва Е.Ю., Жуков А.Д., Зиновьева Е.А. Керамический кирпич, камни и полнокирпичные стены // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 8–13. DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13
6. 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.
7. Байков И.Р., Смородова О.В., Трофимов А.Ю., Кузнецова Е.В. Экспериментальное исследование теплоизоляционных наноматериалов на основе аэрогелей // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Том 11, № 4. – С. 462–477. – doi: 10.15828/2075-8545 2019-11-4-462-477.
8. Văn Viết Thiên Ân, Bùi Danh Đại, Trần Đức Trung. The effect of fly ash and blast furnace slag on the durability of ultra-high-quality concrete in an aggressive environment // Journal of Construction Science and Technology. 2021. volume. 15. no. 6. pp. 49-57.).
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. Zhukov A., Shokod'ko E. (2020) Mathematical Methods for Optimizing the Technologies of Building Materials**.** VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1116. Pp. 413-421. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_40
12. Vu, K.D. Modeling the influence of input factors on foam concrete properties / K.D.Vu, S.I.Bazhenova // Magazine of Civil Engineering. 2021. vol. 103. no. 3. P. 10. doi: 10.34910/MCE.103.11.

Properties of a lightweight plaster system incorporating volcanic tuff

Demisse B.A., Yazyev S.B., Zhukov A.D., Efimov B.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)

In accordance with energy-efficiency requirements, which include an assessment of costs not only during building operation but also during the manufacture and installation of building structures, the use of lightweight plaster mixtures is justified in regions with temperate, hot, or sharply continental climates. The purpose of the study was to evaluate the mechanical and operational properties of a plaster coating based on volcanic tuff. It was established that the lightweight plaster coating has a compressive strength of 7.4 MPa, flexural strength of 3.6 MPa, thermal conductivity of 0.14–0.16 W/(m·°C), volumetric water absorption of 3–5%, water absorption during contact with a water surface of up to 12%, water-vapor permeability of approximately 0.18 g/(m·h·Pa), and frost resistance grade F35–F50. Cellular-concrete block and brick surfaces are identified as suitable substrates. The proposed coatings can be used both in new construction and in the reconstruction of buildings for various purposes.

Keywords: volcanic tuff-scoria, plaster coating, new construction, building reconstruction, energy efficiency.

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 Russ.).
2. Lesovik V.S., Gridchin A.M., Alfimova N.I. Building Materials and Products. Belgorod: BSTU Publishing House; 2011. 222 p. (In Russ.).
3. Zhukov A.D., Bobrova E.Y., Bessonov I.V., Mednikova E.A. Energy Efficiency of Building Systems. Moscow: INFRA-M; 2022. 329 p.
4. Zhukov A.D., Bessonov I., Efimov B., Medvedev A., Poserenin A. Foam fiber-reinforced concrete: technology and methodology of selection of the composition. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2020;896:012072. doi:10.1088/1757-899X/896/1/012072.
5. Rubtsov O.I., Bobrova E.Yu., Zhukov A.D., Zinovieva E.A. Ceramic brick, stones and solid-brick walls. Stroitel'nye materialy. 2019;(9):8–13. doi:10.31659/0585-430X-2019-774-9-8-13. (In Russ.).
6. Kudryavtsev P.G. Composition and structure of porous heat-resistant inorganic composite materials. Nanotechnologies in Construction. 2018;10(4):75–100. doi:10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100. (In Russ.).
7. Baikov I.R., Smorodova O.V., Trofimov A.Yu., Kuznetsova E.V. Experimental study of aerogel-based thermal insulation nanomaterials. Nanotechnologies in Construction. 2019;11(4):462–477. doi:10.15828/2075-8545-2019-11-4-462-477. (In Russ.).
8. Văn Viết Thiên Ân, Bùi Danh Đại, Trần Đức Trung. The effect of fly ash and blast furnace slag on the durability of ultra-high-quality concrete in an aggressive environment. Journal of Construction Science and Technology. 2021;15(6):49–57.
9. Zhukov A.D., Popov I.I., Efimov B.A., Demisse B.A., Belkanov V.V. Optimization of facade plaster compositions based on modified binder. Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. 2022;(5):57–66. doi:10.32683/0536-1952-761-5-57-66. (In Russ.).
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. Stroitel'nye materialy. 2022;(11):37–41. doi:10.31659/0585-430X-2022-808-11-37-41. (In Russ.).
11. Zhukov A., Shokod'ko E. Mathematical Methods for Optimizing the Technologies of Building Materials. In: VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020;1116:413–421. doi:10.1007/978-3-030-37919-3_40.
12. Vu K.D., Bazhenova S.I. Modeling the influence of input factors on foam concrete properties. Magazine of Civil Engineering. 2021;103(3):10. doi:10.34910/MCE.103.11.