*УДК 666.972.16* *DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_7_59*

**В. А. Харламов**

# УКРЕПЛЯЮЩАЯ ДОБАВКА ДЛЯ БЕТОНА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ФОСФОЛИПИДОВ

*Ключевые слова: цемент, добавки, лецитин, цементный камень, водопоглощение, прочность, динамика набора прочности, рентгенофазовый анализ.*

*В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния органической добавки на основе модифицированных технических фосфолипидов лецитина на физико-механические свойства цементного камня, полученного на основе цемента ЦЕМ I 42,5. Проведён анализ прочности на сжатие, динамики её изменения во времени, водопоглощения, а также фазового состава с применением метода рентгенофазового анализа (РФА). Установлено, что при дозировке 0,1 % модифицированного лецитина прочность возрастает на 35 % по сравнению с контрольным образцом. Исследование динамики набора прочности показало, что уже на седьмые сутки образцы с добавкой демонстрируют значения, сопоставимые с контрольными, а к 28 дню прочность превышает 59 МПа. Рентгенофазовый анализ зафиксировал увеличение интенсивности пиков гидратных фаз, включая эттрингит и портландит, что свидетельствует об ускорении процессов гидратации. Отмечается также экологическая значимость работы: использование отходов экстракции лецитина позволяет не только утилизировать побочные продукты масложировой промышленности, но и повысить эффективность производства строительных материалов. Полученные результаты подтверждают перспективность применения модифицированных органических добавок на основе отходов в технологии бетонных и цементных композиций с улучшенными характеристиками.*

**V. A. Kharlamov**

# CONCRETE REINFORCING ADDITIVE BASED ON MODIFIED TECHNICAL PHOSPHOLIPIDS

*Key words: cement, additives, lecithin, waste, cement stone, water absorption, compressive strength, strength development, X-ray diffraction analysis, sustainability.*

*This article presents the results of an experimental study on the effect of an organic additive based on modified technical phospholipids of lecithin on the physical and mechanical properties of cement stone produced using CEM I 42.5 cement. The investigation included compressive strength testing, strength gain dynamics, water absorption, and phase composition analysis using X-ray diffraction (XRD). It was found that at a dosage of 0.1%, the modified lecithin significantly increased compressive strength by 35% compared to the control sample. Strength development analysis showed that the modified samples reached values comparable to the control by day 7, with compressive strength exceeding 59 MPa by day 28. XRD results revealed increased intensity of peaks corresponding to hydrated phases such as ettringite and portlandite, indicating enhanced cement hydration. The study also emphasizes the environmental significance of the work: utilizing lecithin extraction by-products not only addresses waste management challenges in the oil and fat processing industry but also contributes to improving the performance of construction materials. The obtained results confirm the potential of using modified organic waste-based additives in the production of cementitious composites with enhanced performance characteristics.*

## Введение

Цементный камень и бетон на его основе остаются ключевыми строительными материалами благодаря их прочности, доступности и универсальности. Однако пористо-капиллярная структура цементного камня делает его уязвимым к воздействию влаги, что снижает долговечность конструкций, особенно в условиях повышенной влажности (например, в фундаментах, подвалах). Поэтому снижение водопоглощения, повышение прочности и улучшение микроструктуры материала являются приоритетными задачами.

Одним из перспективных направлений является использование добавок на основе промышленных отходов, что позволяет одновременно улучшить свойства цементного камня и решить экологические проблемы, связанные с утилизацией отходов [1-13]. Ранее проведённые исследования показали, что добавки на основе отходов экстракции лецитина эффективно снижают водопоглощение цементного камня, а также способны увеличивать его прочность [14]. В данной работе предложен новый подход — использование модифицированных технических фосфолипидов лецитина, что позволяет улучшить как гидрофобные, так и прочностные характеристики цементного камня.

Целью исследования является изучение влияния модифицированных добавок на основе отходов экстракции лецитина на водопоглощение, прочность, динамику набора прочности и фазовый состав цементного камня, изготовленного на основе цемента ЦЕМ I 42,5 [15]. Особое внимание уделено экологической значимости утилизации отходов, а также анализу микроструктуры материала с помощью рентгенофазового анализа (РФА).

## Материалы и методы

Для исследования использовался цемент марки ЦЕМ I 42,5. Образцы цементного камня в форме кубов размером 20x20x20 мм изготавливались с водоцементным соотношением В/Ц = 0,33. Состав смеси включал цемент, воду и добавку на основе модифицированных отходов экстракции лецитина. Условия твердения:

температура (20±2) °С, относительная влажность воздуха 50–70%, выдержка до 28 суток.

Добавки на основе модифицированных отходов экстракции лецитина предварительно смешивались с водой, нагревались до 40°С для получения стабильной эмульсии, а затем охлаждались до комнатной температуры. Массовые доли добавок составляли 0,1%, 0,3% и 0,5%. Для сравнения были изготовлены контрольные образцы без добавок.

Водопоглощение определялось по методике ГОСТ 12730.3-2020 путём погружения образцов в воду с последующим измерением массы насыщенного водой образца в течение недели. Прочностные характеристики оценивались на электронном прессе «РЭМ-100-А-1-1» (Россия) через 28 суток твердения. Динамика набора прочности определялась на тех же образцах с измерением прочности на сжатие через 7, 14, 21, 28 суток для образца с 0,1% добавки. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился для изучения изменений в кристаллической структуре цементного камня, дифрактометр ДРОН-3 (Россия).

## Основная часть

В ходе исследования были изучены водопоглощение, прочностные характеристики, динамика набора прочности и фазовый состав цементного камня на основе ЦЕМ I 42,5 с добавлением модифицированных отходов экстракции лецитина. Результаты измерений водопоглощения представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Водопоглощение цементного камня с добавками на основе модифицированных отходов экстракции лецитина**

**Table 1 – Water absorption of cement stone with additives based on modified lecithin extraction waste**

| Концентрация добавки | Тип добавки | Водопоглощение, % |
|---|---|---|
| 0% (контроль) | Без добавки | 6,2 |
| 0,1% | Модифицированный лецитин | 6,2 |
| 0,3% | Модифицированный лецитин | 7,9 |
| 0,5% | Модифицированный лецитин | 23,7 |

Добавка на основе модифицированных технических фосфолипидов лецитина в концентрации при более низких концентрациях практически не изменяет водопоглощение, однако при увеличении концентрации добавки водопоглощение растёт.

Повышение водопоглощения может быть связано с особенностями её молекулярной структуры и поверхностной активности. В отличие от технического или соевого лецитина, модифицированный лецитин содержит полярные гидроксильные группы, полученные в результате химической модификации с использованием кислоты и перекиси водорода. Эти функциональные группы могут обладать выраженной гидрофильностью, то есть способностью притягивать и удерживать воду. При добавлении такого компонента в цементную систему возможно увеличение количества связанных и капиллярных пор, кроме того, добавка может не только не снижать, но и усиливать водоудерживающую способность пористой структуры, нарушая эффект гидрофобизации, что приводит к росту общей водопоглощающей способности композиции. В отличие от добавок, способствующих формированию плотной структуры цементного камня, данная добавка может ингибировать процесс уплотнения и увеличивать пористость на стадии твердения. Это особенно актуально при превышении оптимальной концентрации (например, при 0,5%), когда избыток поверхностно-активных веществ может дестабилизировать структуру цементного теста, способствуя расслоению или задержке гидратации.

Прочность цементного камня на сжатие определялась через 28 суток твердения. Результаты представлены в таблице 2.

**Таблица 2 – Прочность цементного камня с добавками на основе модифицированных отходов экстракции лецитина**

**Table 2 – Strength of cement stone with additives based on modified lecithin extraction waste**

| **Концентрация добавки** | **Тип добавки** | **Прочность на сжатие, МПа (28 суток)** | **Изменение прочности, %** |
|---|---|---|---|
| 0% (контроль) | Без добавки | 41,8 | - |
| 0,1% | Модифицированный лецитин | 59,4 | + 42 |
| 0,3% | Модифицированный лецитин | 38,7 | - 7,5 |
| 0,5% | Модифицированный лецитин | 37,2 | - 11 |

Добавление модифицированных технических фосфолипидов лецитина в состав цементного бетона существенно влияет на прочность при сжатии. При массовой доли добавки в количестве 0,1 % наблюдается наибольшая прочность — 59,4 МПа, что значительно превышает прочность контрольного состава (41,8 МПа). Однако с увеличением концентрации добавки до 0,3 % и 0,5 % прочность резко снижается до 38,7 МПа и 37,2 МПа соответственно, то есть становится даже ниже, чем у контрольного образца.

Такое поведение может быть связано с тем, что при низкой концентрации добавка проявляет себя как эффективный пластификатор и поверхностно-активное вещество, способствующее лучшему распределению частиц цемента и снижению водоцементного

отношения, что повышает прочность. Однако при увеличении концентрации добавка может перенасыщать систему, нарушая процессы гидратации цемента, либо вызывать избыточное вовлечение воздуха или ухудшение структуры цементного камня. Также возможно образование поверхностной пленки, препятствующей полноценному твердению. Это говорит о необходимости оптимизации дозировки, поскольку превышение определённого порога вызывает снижение прочности и увеличение водопоглощения.

Динамика набора прочности цементного камня изучалась через 7, 14, 21 и 28 суток твердения. Результаты представлены на рисунке 1.

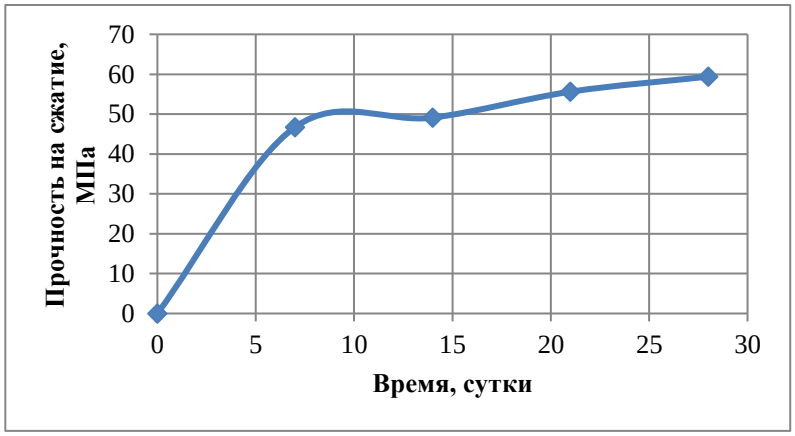


**Рис. 1 – Динамика набора прочности цементного камня с добавками на основе модифицированных отходов экстракции лецитина**

**Fig. 1 – Dynamics of strength gain of cement stone with additives based on modified lecithin extraction waste**

Анализ динамики прочности бетона, модифицированного органической добавкой на основе отходов экстракции лецитина, продемонстрировал характерную зависимость прочности на сжатие от возраста образцов. Уже на 7-е сутки прочность составила около 47,5 МПа, что превышает стандартное значение (41,8 МПа), указывая на ускоренное развитие прочностных характеристик в раннем возрасте. Максимальный прирост прочности наблюдался на 7 сутки, что, вероятно, обусловлено активацией процессов гидратации цемента под действием компонентов добавки.

После 7 суток прирост прочности продолжался, но с меньшей интенсивностью. На 14-е сутки прочность составила порядка 50 МПа, затем наблюдалось незначительное снижение, которое может быть связано с перераспределением микроструктурных напряжений или локальными особенностями структуры цементного камня. К 28 суткам прочность достигла 60 МПа, что свидетельствует о высоком упрочняющем эффекте добавки на основе модифицированных технических фосфолипидов лецитина. Полученные данные подтверждают эффективность применения органических модификаторов для повышения прочности бетона как в ранние, так и в более поздние сроки твердения.

Для изучения изменений в кристаллической структуре цементного камня был проведён рентгенофазовый анализ по сравнению со стандартом. Результаты представлены на рисунках 2,3.

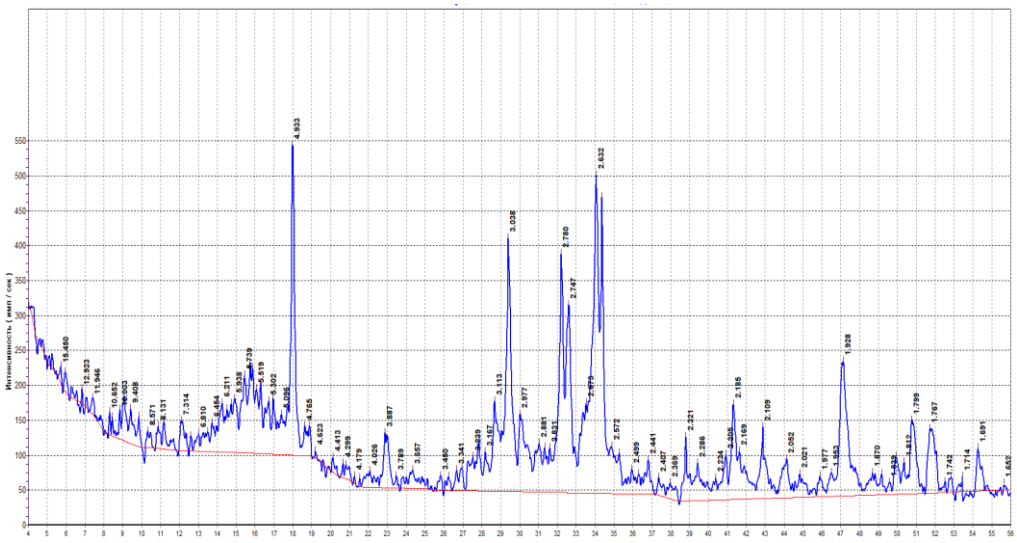

**Рис. 2 – Рентгеновская порошковая дифрактограмма стандартного образца цементного камня**

**Fig. 2 – X-ray. powder diffraction pattern of a standard sample of cement stone**

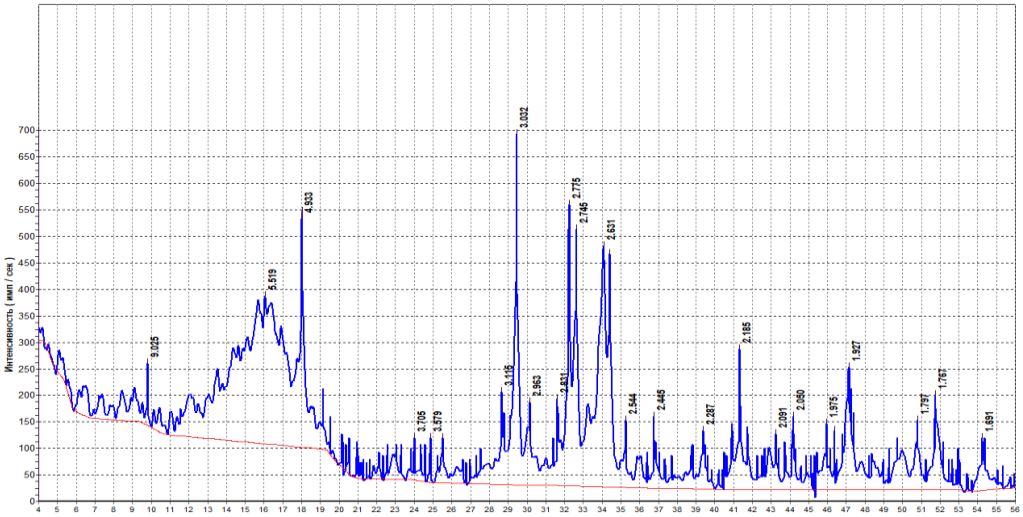


**Рис. 3 – Рентгеновская порошковая дифрактограммы цементного камня с добавками на основе модифицированных фосфолипидов**

**Fig. 3 – X-ray powder diffraction patterns of cement stone with additives based on modified phospholipids**

Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов бетона выявил значительные различия между стандартным составом (без добавок) и бетоном с добавкой 0,1% модифицированных технических фосфолипидов лецитина. В образце с добавкой наблюдалось увеличение интенсивности пиков эттрингита (3105 у.е. против 3000 у.е. в стандартном образце при $2\theta \approx 9°$) и портландита (4935 у.е. против 4800 у.е. при $2\theta \approx 18°$), а также снижение интенсивности пиков негидратированных алита и белита. Эти данные свидетельствуют об ускорении гидратационных процессов в присутствии добавки, которая, действуя как поверхностно-активное вещество, улучшает диспергирование цементных частиц и увеличивает степень гидратации $C_3S$ и $C_2S$, что приводит к более быстрому образованию гидратных фаз, таких как CSH-гель и эттрингит.

Полученные результаты РФА коррелируют с механическими характеристиками бетона: через 7 суток прочность на сжатие достигает 46,7 МПа, а через 28 суток возрастает до 59,3 МПа, что в 1,4 раза выше по сравнению с контрольным образцом. Ускоренный набор прочности обусловлен более интенсивной гидратацией, а увеличение конечной прочности связано с большим количеством CSH-геля и улучшением микроструктуры бетона за счёт равномерного распределения гидратных продуктов. Таким образом, добавка на основе модифицированных технических фосфолипидов лецитина способствует как ускорению гидратации, так и повышению долговечности бетона, что делает его перспективной добавкой для строительных смесей.

## Выводы

Добавки на основе модифицированных технических фосфолипидов лецитина, обладают значительным потенциалом в улучшении физико-механических характеристик цементного камня. Наиболее эффективной оказалась концентрация 0,1 %, обеспечившая прирост прочности на сжатие до 59,3 МПа, что составляет увеличение на 35 % по сравнению с контрольным образцом.

Динамика набора прочности показала, что добавка способствует ускоренной гидратации: уже на 7 сутки прочность материала превышала прочность стандартного состава. Это позволяет использовать подобные модификаторы для конструкций с требованиями к быстрой распалубке и вводу в эксплуатацию.

Рентгенофазовый анализ подтвердил, что добавка 0,1 % гидроксилированного лецитина способствует интенсификации гидратации клинкерных минералов (алит и белит) с образованием гидратных фаз, таких как эттрингит и CSH-гель, что объясняет повышение прочности.

При увеличении концентрации добавки до 0,3–0,5 % наблюдается снижение прочности и рост водопоглощения, что может быть связано с деструктивным воздействием избыточного количества поверхностно-активных веществ на микроструктуру цементного камня. Это подчёркивает важность подбора оптимальной дозировки модификатора.

Экологическая значимость применения органических модификаторов из промышленных отходов заключается в рациональном использовании побочных продуктов агропромышленного комплекса, что позволяет сократить вредные выбросы и повысить экологичность строительных материалов.

*Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В Г. Шухова.*

*This work was realized in the framework of the program «Priority 2030» on base of the Belgorod State Techological University named after V. G. Shukhov. The work was realized using equipment of High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov.*

## Литература

1. Р.Д. Абдрахманова, Е.С. Орынбеков, И.Ю. Мотовилов, В сб. «Scientific Goals and Purposes in XXI Century»: Труды 7-й Междунар. науч.-практ. конф. (Сиэтл, США, 19–20 октября 2024 г.), 2024. С. 429–430. DOI: 10.51582/interconf.19-20.10.2024.042.

2. Е.П. Викторова, Е.В. Лисовая, А.В. Свердличенко, М.Р. Жане, Новые Технологии, 19, 3, 48–57 (2023).
3. В.Я. Гегерь, Н.П. Лукутцова, Е.Г. Карпиков, Р.О. Петров, Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова, 3, 15–18 (2013).
4. А.И. Кудяков, А.С. Симакова, В.А. Кондратенко, А.Б. Стешенко, А.Д. Латыпов, Вестн. Том. гос. архит.-строит. ун-та, 20, 6, 138–147 (2018). DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-6-138-147.
5. Е.В. Лисовая, Е.П. Викторова, А.В. Свердличенко, М.Р. Жане, Вестн. Красноярск. гос. аграр. ун-та, 5(194), 225–233 (2023). DOI: 10.36718/1819-4036-2023-5-225-233.
6. А.А. Мечай, Е.И. Барановская, А.Н. Гончар, В сб. «Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения»: Материалы 10-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск: Изд. А.Н. Вараскин, 2018. С. 74–77.
7. И.К. Михалко, В сб. «Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России»: Сб. статей XVII Междунар. науч.-практ. конф. (Пенза, 24–25 янв. 2019 г.), Пенза: Пензен. гос. аграр. ун-т, 2019. С. 123–129.
8. И.В. Полуянов, А.В. Киселёв, Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова, 3, 45–50 (2019).
9. И.В. Поляков, М.В. Баранников, Е.А. Степанова, Вестн. Иванов. гос. хим.-технол. ун-та, 26, 4, 100–107 (2021). DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6330.
10. В.А. Седнев, Н.А. Сергеенкова, Техносфер. Безопасн., 4, 194–206 (2016).
11. Н. Суан Хунг, В.Л. Танг, Б.И. Булгаков, О.В. Александрова, О.А. Ларсен, Строит. Наука и Образование, 10, 1, Статья 5 (2020). DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.5.
12. А.М. Хорохордин, Я.О. Рудаков, В.Т. Перцев, Р.Г. Черепахина, О.Б. Рудаков, Химия, Физика и Механика Материалов, 2(29), 90–97 (2021).
13. А. Шарифов, А.А. Акрамов, Я.Г. Назиров, А.К. Муминов, Докл. Акад. наук РТ, 5–6 (2016).
14. В.А. Харламов, А.Н. Лопанов, К.В. Дементьев, П.И. Сысоев, Вестн. Белгор. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова, 1, 138–146 (2025). DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-1-138-146.
15. О.В. Александрова, Д.В.К. Нгуен, Б.И. Булгаков, В.Б. Петропавловская, Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер. Матер. Констр. Технол., 3, 7–15 (2020). DOI: 10.25686/2542-114X.2020.3.7.

## References

1. R.D. Abdrakhmanova, E.S. Orynbekov, I.Yu. Motovilov, in Proc. 7th Int. Sci. Pract. Conf. "Scientific Goals and Purposes in XXI Century" (Seattle, USA, October 19–20, 2024), pp. 429–430. DOI: 10.51582/interconf.19-20.10.2024.042.
2. E.P. Viktorova, E.V. Lisovaya, A.V. Sverdlitchenko, M.R. Zhane, Nov. Tekhnol., 19(3), 48–57 (2023).
3. V.Ya. Geger, N.P. Lukutsova, E.G. Karpikov, R.O. Petrov, Vestn. BSTU im. V.G. Shukhova, 3, 15–18 (2013).pmi.spmi.ru.
4. A.I. Kudyakov, A.S. Simakova, V.A. Kondratenko, A.B. Steshenko, A.D. Latypov, Vestn. Tomsk. Gos. Arkhit.-Stroit. Univ., 20(6), 138–147 (2018). DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-6-138-147.
5. E.V. Lisovaya, E.P. Viktorova, A.V. Sverdlitchenko, M.R. Zhane, Vestn. Krasnoyarsk. Gos. Agrar. Univ., 5(194), 225–233 (2023). DOI: 10.36718/1819-4036-2023-5-225-233.
6. A.A. Mechai, E.I. Baranovskaya, A.N. Gonchar, in Proc. 10th Int. Sci. Pract. Conf. "Experience in the Production and Application of Autoclaved Aerated Concrete" (Minsk, 2018), pp. 74–77.
7. I.K. Mikhal'ko, in Proc. 17th Int. Sci. Pract. Conf. "Natural Resource Potential, Ecology and Sustainable Development of Russian Regions" (Penza, January 24–25, 2019), pp. 123–129.
8. I.V. Poluyanov, A.V. Kiselev, Vestn. BSTU im. V.G. Shukhova, 3, 45–50 (2019).
9. I.V. Polyakov, M.V. Barannikov, E.A. Stepanova, Vestn. Ivanov. Gos. Khim.-Tekhnol. Univ., 26(4), 100–107 (2021). DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6330
10. V.A. Sednev, N.A. Sergeenkova, Tekhnosfer. Bezopasnost', 4, 194–206 (2016).
11. N. Suan Hung, V.L. Tang, B.I. Bulgakov, O.V. Aleksandrova, O.A. Larsen, Stroit. Nauka i Obrazovanie, 10(1), Article 5 (2020). DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.5
12. A.M. Khorokhordin, Ya.O. Rudakov, V.T. Pertsev, R.G. Cherepakhina, O.B. Rudakov, Khim. Fiz. Mekh. Mater., 2(29), 90–97 (2021).
13. Sharifov, A.A. Akramov, Ya.G. Nazirov, A.K. Muminov, Dokl. Akad. Nauk RT, 5–6 (2016).
14. V.A. Kharlamov, A.N. Lopanov, K.V. Dement'ev, P.I. Sysoev, Vestn. Belgorod. Gos. Tekhnol. Univ. im. V.G. Shukhova, 1, 138–146 (2025). DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-1-138-146
15. O.V. Aleksandrova, D.V.K. Nguyen, B.I. Bulgakov, V.B. Petropavlovskaya, Vestn. Volzhsk. Gos. Tekhnol. Univ. Ser. Mater. Konstr. Tekhnol., 3, 7–15 (2020). DOI: 10.25686/2542-114X.2020.3.7

**© В. А. Харламов** – аспирант кафедры Безопасности жизнедеятельности, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, wladimir.harlamov@mail.ru.

**© V. A. Kharlamov** – PhD-student of the Department of Life Safety, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, wladimir.harlamov@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 21.05.25.
Дата принятия рукописи в печать – 15.06.25.