

Научная статья

УДК 691.545: 666.972.163:691.327.32

doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.035

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ДОБАВОК НА УДЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ЛЕГКОГО БЕТОНА НА ПОРИСТОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ

Светлана Валентиновна Бастрыгина

*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия, s.bastrygina@ksc.ru,
<http://orcid.org/0000-0003-3279-8419>*

Аннотация

В работе приводятся результаты исследований по повышению удельной прочности легкого бетона на мелкодисперсном пористом заполнителе путем использования алюмосиликатных микросфер и комплексных техногенных добавок. Удельная прочность разработанных составов составляет 40 МПа, бездобавочного состава — 30 МПа. Введение в состав легкого бетона техногенных отходов позволит заменить до 50 % цемента без потери прочностных свойств, снизив при этом плотность бетона и повысив удельную прочность.

Ключевые слова:

алюмосиликатные микросферы, комплексные техногенные добавки, легкий бетон, удельная прочность

Для цитирования:

Бастрыгина С. В. Влияние комплексных техногенных добавок на удельную прочность легкого бетона на пористом заполнителе // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 205–210. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.035.

Original article

THE EFFECT OF COMPLEX MAN-MADE ADDITIVES ON THE SPECIFIC STRENGTH OF LIGHTWEIGHT CONCRETE ON POROUS AGGREGATE

Svetlana V. Bastrygina

Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia, s.bastrygina@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3279-8419>

Abstract

The paper presents the results of research on increasing the specific strength of lightweight concrete on a finely dispersed porous aggregate by using aluminosilicate microspheres and complex technogenic additives. The specific strength of the developed compounds is 40 MPa, and for the additive free compounds is 30 MPa. The introduction of man-made waste into lightweight concrete will make it possible to replace up to 50 % of cement without loss of strength properties, while reducing the density of concrete and increasing specific strength.

Keywords:

aluminosilicate microspheres, complex technogenic additives, lightweight concrete, specific strength

For citation:

Bastrygina S. V. The effect of complex man-made additives on the specific strength of lightweight concrete on porous aggregate // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 205–210. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.035.

Введение

Применение легких бетонов из-за невысокой прочности ограничивается строительством слабонесущих и ограждающих конструкций. Однако сочетание низкой плотности, характерной для легких бетонов, и высокой прочности, присущей высокопрочным бетонам, позволяет значительно расширить область применения легких бетонов. Использование такого материала обеспечивает здания и сооружения, с одной стороны, требуемыми прочностными свойствами, а с другой — позволяет существенно экономить на общем весе [1]. Для оценки технической

эффективности применения бетонов используется показатель удельной прочности, характеризующий величину предела прочности при сжатии на единицу относительной плотности. Для высокопрочных бетонов удельная прочность $R_{уд} \geq 25$ МПа.

Задача исследований заключалась в повышении удельной прочности легкого бетона как за счет снижения плотности, так и за счет повышения прочности при сжатии.

Понизить плотность бетона планировалось введением в состав бетонной смеси алюмосиликатных микросфер (АСМ), имеющих низкую насыпную плотность и проявляющих пуццоланическую активность, повысить прочность — за счет модифицирования цементного вяжущего природными и техногенными добавками.

Результаты

Одним из видов техногенных отходов, которые получили широкое применение благодаря сочетанию своих свойств, обеспечивающих требуемые показатели по физико-механическим, теплофизическим и эксплуатационным характеристикам [2–4], являются микросферы — легкая фракция золы уноса, представляющая собой мелкодисперсный, сыпучий порошок, состоящий из полых тонкостенных частиц сферической формы алюмосиликатного состава диаметром в несколько десятков или сотен микрон. Сферы находятся в тесном взаимодействии с продуктами гидролиза и гидратации цемента и выполняют роль структурирующего элемента, проявляющего пуццоланическую активность [5; 6].

Задача исследований заключалась в изучении влияния АСМ на физико-механические свойства (плотность и прочность) легкого бетона с заполнителем на основе вспучивающихся сланцев.

В работе использовали АСМ производства ООО «Экосфера» (г. Новосибирск), отобранные с водной поверхности золоотвала Новосибирской ТЭЦ-5, работающей на кузнецких углях марок Г и Д. Химический состав микросфер, мас. %: SiO_2 — 62,72; Al_2O_3 — 19,65; Fe_2O_3 — 2,96; CaO — 1,82; MgO — 1,62; TiO_2 — 0,91; Na_2O — 1,29; K_2O — 3,02; С — 0,20; п. п. — 0,43. Насыпная плотность 420 кг/м³, истинная — 2,31 г/см³, удельная поверхность, определенная на приборе ПСХ-8, составляет 406 м²/кг. Гранулометрический состав АСМ: более 0,4 мм — 0,30 %; 0,4–0,315 мм — 0,98%; 0,315–0,16 мм — 42,48 %; 0,16–0,125 мм — 24,54 %; 0,125–0,08 мм — 24,22 %; 0,08–0,063 мм — 3,68 %; менее 0,063 мм — 3,80 %. Эффективная удельная активность естественных радионуклидов 194 ± 14 Бк/кг.

Было установлено, что замена от 20 до 30 % цемента микросферами понижает плотность бетона на 2,8–11,2 % по сравнению с бездобавочным составом. Прочностные свойства при этом повышаются на 10–30 %. Повышение прочности происходит за счет упрочнения контактной зоны между цементным камнем и АСМ вследствие физико-химического взаимодействия продуктов гидратации цемента с микросферами. Введение микросфер также приводит к увеличению удельной прочности. Наибольшую удельную прочность имеет бетон, содержащий в своем составе 20 % микросфер. Учитывая, что наибольшее снижение плотности без потери прочностных свойств обеспечивает состав с 30 %-й заменой цемента микросферами, он был взят для дальнейших исследований.

В качестве модифицирующих добавок использовали: микрокремнезем (МК), улавливаемый в результате очистки отходящих газов, образующихся при выплавке высокопроцентного ферросилиция в открытых печах (АО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк), шунгзитовую пыль (ШП), улавливаемую на складе готовой продукции при производстве шунгзита, термообработанную при 500 °С глину ермаковского месторождения (ЕГ), а также золошлаковую смесь Апатитской ТЭЦ (ЗШС), направляемую системой гидроудаления в отвал. Более подробная информация о физико-химических и структурных характеристиках добавок, а также их влиянии на физико-механические свойства бетона приведена в [7; 8]. Также было установлено, что внесение каждого вида добавки, вне зависимости от подбора состава, приводит к повышению прочности бетона. Химический состав добавок приведен в табл. 1, поверхностные характеристики — в табл. 2.

Таблица 1

Химический состав модифицирующих добавок

Вид	Химический состав, мас. %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	п. п. п.
МК	94,20	0,47	0,60	3,31	0,36	0,30	—	0,73	0,69	—	3,43
ШП	53,10	19,05	16,25	1,15	2,25	3,03	2,42	0,30	0,40	0,28	0,87
ЕГ	59,37	15,29	4,25	1,59	2,62	2,77	0,96	2,98	2,17	0,04	5,32
ЗШС	52,48	17,57	13,74	1,03	2,43	2,32	1,23	1,31	1,30	0,41	2,94

Таблица 2

Поверхностные характеристики добавок

Добавка	Насыпная плотность, кг/м ³	Удельная поверхность
МК	355	19,43 м ² /г (FlowSorbII 2300)
ШП	855	488 м ² /кг (ПСХ-8А)
ЕГ	700	400 м ² /кг (ПСХ-8А)
ЗШС	950	260 м ² /кг (ПСХ-8А)

Как видно из табл. 1, основными оксидами ШП, ЕГ и ЗШС являются SiO₂, Al₂O₃, CaO и Fe₂O₃. Микрокремнезем содержит в своем составе до 94,2 % SiO₂.

Поверхностные характеристики, приведенные в табл. 2, показали, что шунгизитовая пыль и термообработанная глина имеют примерно одинаковую насыпную плотность и удельную поверхность. Золошлаковая смесь отличается от них меньшей удельной поверхностью. Самую низкую насыпную плотность имеет микрокремнезем.

Согласно критериям качества добавок (модулю основности, силикатному модулю и коэффициенту качества — не приведены), можно предположить, что большую гидравлическую активность, кроме микрокремнезема, будут иметь ШП и ЗШС по сравнению с ЕГ. Повышенный силикатный модуль термообработанной глины будет способствовать увеличению прочности в более позднем возрасте.

Цель исследования заключалась в разработке комплексных добавок для модификации цементного камня и изучении их влияния на физико-механические свойства легкого бетона на пористом заполнителе.

Были использованы следующие материалы: а) вяжущее: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (г. Стерлитамак); б) пористый заполнитель: обработанные угольной пылью и вспученные при 1 150 °С глинистые сланцы фракций 0–3 и 3–5 мм насыпной плотностью 640 и 670 кг/м³ в соотношении 0,4:0,6. Количество заполнителя во всех составах было одинаковым и составляло в расчете на 1 м³: фр. 3–5 см — 326 кг/510 л, фр. менее 3 мм — 276 кг/410 л; в) алюмосиликатные микросферы (30 % от массы цемента); г) компоненты добавок: микрокремнезем, шунгизитовая пыль, термообработанная ермаковская глина, золошлаковая смесь. Содержание добавок в составе вяжущего приведено в табл. 3; д) вода затворения.

Для снижения водопотребности и увеличения подвижности в состав бетонной смеси вводили пластифицирующую добавку Glenium® 51 в количестве 0,5–0,6 % от массы цемента.

Таблица 3

Содержание добавок в составе вяжущего

Состав	Содержание добавок в составе вяжущего, мас. %					
	Цемент	АСМ	МК	ШП	ЕГ	ЗШС
1	100	—	—	—	—	—
2	50	30	10	—	—	10
3	50	30	—	10	—	10
4	50	30	—	—	10	10
5	50	30	—	—	—	20

При приготовлении бетонных смесей цемент, микросферы и добавки предварительно смешивались в стеклянных банках с резиновыми пробками в течение 60 мин, затем смесь переносилась в смеситель, куда добавлялась часть воды, и перемешивалась 60 сек. Затем вносился Glenium (60 сек) и пористый заполнитель с остатками воды (60 сек).

Исследование влияния добавок на физико-механические (предел прочности при сжатии, среднюю плотность), теплофизические свойства и структуру бетона проводилось на образцах $5 \times 5 \times 5$ см, изготовленных из равноподвижных смесей. Условия твердения бетона: тепловлажностная обработка (ТВО) по режиму: 2 + 3 + 6 + 2 ч при температуре изотермического прогрева 85 °С. Испытания бетонных образцов проводились после режимов твердения и сушки, на марочную прочность — через 28 сут.

Результаты влияния добавок на физико-механические свойства бетона приведены на рис. 1.

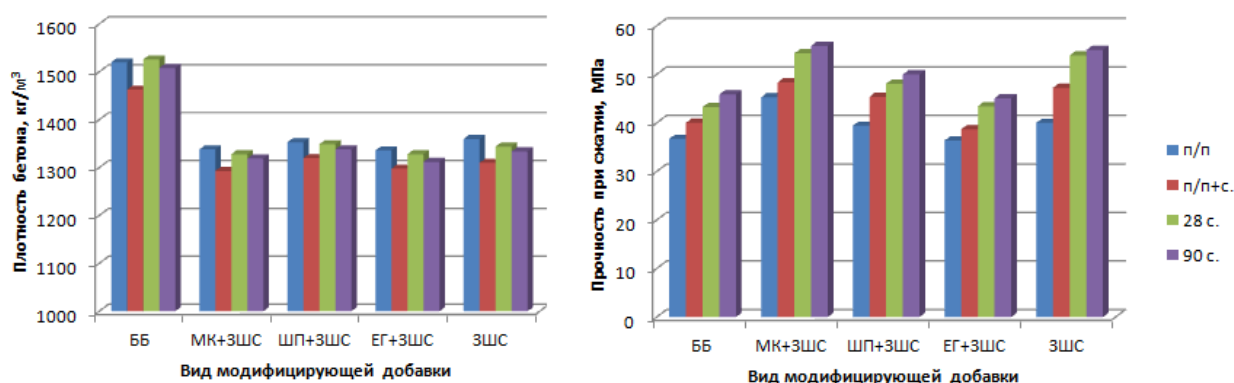


Рис. 1. Зависимости плотности и прочности бетона от вида модифицирующих добавок

Установлено, что совместное введение микросфер и модифицирующих добавок в состав бетона (см. рис. 1) приводит к снижению плотности в проектном возрасте в среднем на 185 кг/м³, или на 12 %, что согласуется с результатами, приведенными выше. Плотность бетона с комплексными добавками имеет практически одинаковые значения и находится в пределах 1328–1350 кг/м³ против 1526 кг/м³ у контрольного состава.

Различия в прочностных свойствах бетона зависят как от химического состава и поверхностных характеристик добавок (насыпной плотности и удельной поверхности), так и от водоцементного отношения.

Наибольшая прочность при сжатии во все сроки твердения наблюдается у состава 2 с комплексной добавкой МК + ЗШС, что обусловлено высокой пуццолановой активностью микрокремнезема и золы. Прирост прочности составляет 23, 26 и 22 % после пропарки на 28 и 90 сут твердения соответственно. При использовании в качестве добавки ЗШС прочность бетона сопоставима с прочностью состава 2. Введение ШП и ЕГ совместно с ЗШС в состав бетона приводит к меньшим значениям прочности по сравнению с микрокремнеземом и золошлаковой смесью, что, скорее всего, связано с более высоким водоцементным отношением этих составов.

Результаты теплофизических исследований показали, что контрольный состав бетона имеет самое высокое значение теплопроводности — 0,444 Вт/(м·°С), составы с добавками — 0,430; 0,436; 0,430; 0,437 Вт/(м·°С) соответственно для 2, 3, 4 и 5-го составов, что обусловлено более низкой плотностью этих бетонов за счет введения АСМ.

Зависимость удельной прочности от вида добавок (рис. 2) показывает, что наиболее высокие показатели обеспечивает введение в состав бетона смеси МК + ЗШС и ЗШС. Удельная прочность бетона с этими добавками составляет в среднем 42 МПа, бездобавочного состава — 30 МПа.

Для изучения фазовых превращений и оценки потери химически связанной воды проводился дериватографический анализ (ДТА) бетона. Было установлено, что наименьшие потери отмечаются в составах с добавками МК + ЗШС и ЗШС, наибольшие — с термообработанной глиной, что подтверждает результаты по прочности, приведенные выше.

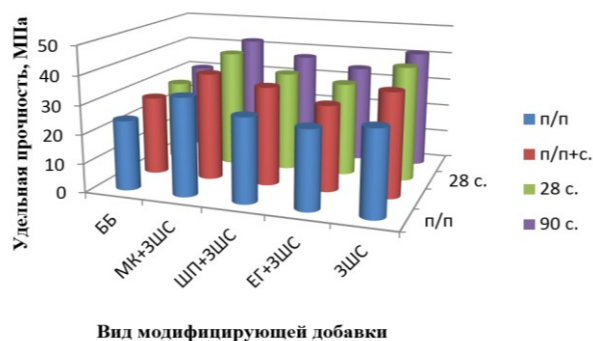


Рис. 2. Зависимость удельной прочности бетона от вида модифицирующих добавок

По результатам РФА установлено, что при введении добавок ускоряется гидратация клинкерных минералов, что связано со взаимодействием более активных микрокремнезема и глинозема с клинкерными минералами. На рентгенограммах бетона, модифицированного добавками, наблюдается снижение интенсивности отражения портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что может говорить о связывании его в гидросиликаты кальция, и уменьшение рефлексов клинкерных минералов по сравнению с контрольным составом.

Для подтверждения полученных результатов по формированию структуры бетона с комплексными добавками проводили микроскопические исследования с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO 420 (рис. 3).

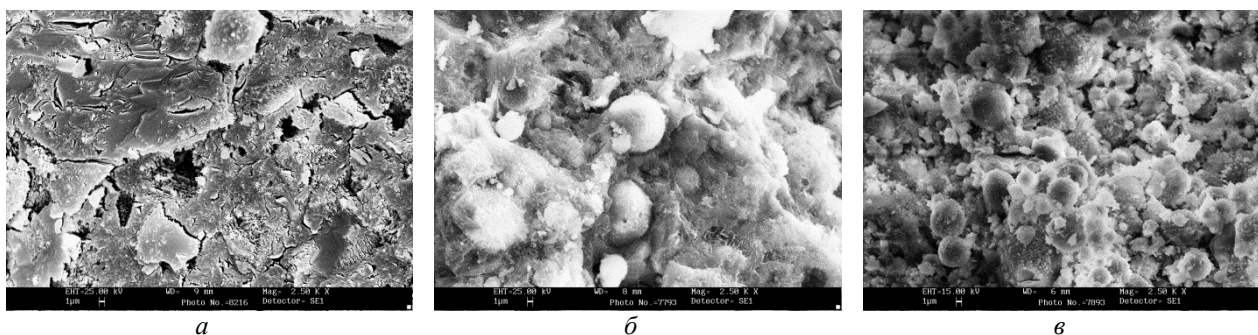


Рис. 3. Микроструктура образцов бетона:
а — контрольный состав; *б* — состав с МК + ЗШС; *в* — состав с ЗШС

Установлено, что структура бетонов с добавками (для примера взяты составы 2 и 5) отличается от контрольного (бездобавочного) наличием в трещинах и порах дополнительного количества новообразований в виде плотных скоплений волокнистых кристаллов, морфология которых идентична гидросиликатам кальция типа CSH (I), тогда как контрольный образец характеризуется достаточно неоднородной и дефектной структурой с менее закристаллизованным поровым пространством.

Выводы

Проведенными исследованиями показана эффективность модифицирования бетона комплексными добавками на основе МК, ШП, ЕГ и ЗШС. Введение в состав легкого бетона техногенных отходов, таких как алюмосиликатные микросферы, микрокремнезем, шунгизитовая пыль и золошлаковая смесь, позволяет заменить до 50 % цемента без потери прочностных свойств, снизив при этом плотность бетона и повысив удельную прочность. Увеличить прочность при сжатии и, соответственно, удельную прочность можно использованием в качестве вяжущего высокомарочных цемента.

Список источников

1. Иноземцев А. С., Королев Е. В. Динамика развития высокопрочных лёгких бетонов. Анализ мировых достижений // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 12–1 (19). С. 87–94.

2. Данилин Д. Д. Полые микросферы из зол-уноса — многофункциональный наполнитель композиционных материалов // Цемент и его применение. 2012. № 4. С. 100–105.
3. Исследование алюмосиликатных микросфер из золы-уноса электростанций, использующих угли Кузбасса / З. Р. Исмагилов, Н. В. Шикина, Н. В. Журавлева и др. // Химия твердого топлива. 2015. № 4. С. 49–57.
4. Саградян А. А., Зимакова Г. А. Исследование пуццоланической активности зольных микросфер // Известия вузов. Строительство. 2012. № 2. С. 43–47.
5. Орешкин Д. В., Беляев К. В., Семенов В. С. Полые стеклянные микросферы и прочность цементного камня // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2010. № 11. С. 45–47.
6. Иноземцев А. С., Королев Е. В. Полые микросферы — эффективный наполнитель для высокопрочных легких бетонов // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 10. С. 80–83.
7. Бастрыгина С. В., Конохов Р. В. Влияние кремнеземсодержащих добавок на прочностные свойства легкого бетона на пористом заполнителе // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2022. Т. 1, № 2. С. 58–66. (входит в РИНЦ).
8. Бастрыгина С. В. Влияние добавок термоактивированных глин на прочность и структурообразование цементного камня // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 4. С. 145–150. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.025.

References

1. Inozemcev A. S., Korolev E. V. Dinamika razvitiya vysokoprochnykh lyogkikh betonov. Analiz mirovykh dostizhenij [Dynamics of development of high-strength lightweight concretes. Analysis of global achievements]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International research journal], 2013, No 12–1 (19), pp. 87–94. (In Russ.).
2. Danilin D. D. Polye mikrosfery iz zol-unosa — mnogofunkcional'nyy napolnitel' kompozitsionnykh materialov [Hollow fly ash microspheres—multifunctional filler of composite materials]. *Cement i ego primenenie* [Cement and its application], 2012, No 4, pp. 100–105. (In Russ.).
3. Ismagilov Z. R., Shikina N. V., Zhuravleva N. V., Potokina R. R., Rudina N. A., Ushakov V. A., Teryaeva T. N. Issledovanie alyumosilikatnykh mikrosfer iz zoly-unosa elektrostancij, ispol'zuyushchih ugli Kuzbassa [Investigation of aluminosilicate microspheres from fly ash of power plants using coal from Kuzbass]. *Himiya tverdogo topliva* [Chemistry of solid fuels], 2015, No 4, pp. 49–57. (In Russ.).
4. Sagradyan A. A., Zimakova G. A. Issledovanie puccolanicheskoy aktivnosti zol'nykh mikrosfer [Investigation of the pozzolanic activity of ash microspheres]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of universities. Construction], 2012, No 2, pp. 43–47. (In Russ.).
5. Oreshkin D. V., Belyaev K. V., Semenov V. S. Polye steklyannye mikrosfery i prochnost' cementnogo kamnya [Hollow glass microspheres and the strength of cement stone]. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more* [Construction of oil and gas wells on land and at sea], 2010, No 11, pp. 45–47. (In Russ.).
6. Inozemcev A. S., Korolev E. V. Polye mikrosfery — effektivnyy zapolnitel' dlya vysokoprochnykh legkikh betonov [Hollow microspheres—an effective filler for high-strength lightweight concrete]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering], 2013, No 10, pp. 80–83. (In Russ.).
7. Bastrygina S. V., Konohov R. V. Vliyanie kremnezemsoderzhashchih dobavok na prochnostnye svoystva legkogo betona na poristom zapolnitele [The effect of silica-containing additives on the strength properties of lightweight concrete } on porous aggregate]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Estestvennye i gumanitarnye nauki* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Natural Sciences and Humanities], 2022, vol. 1, No 2, pp. 58–66. (In Russ.).
8. Bastrygina S. V. Vliyanie dobavok termoaktivirovannykh glin na prochnost' i strukturoobrazovanie cementnogo kamnya [The effect of additives of thermally activated clays on the strength and structure formation of cement stone]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences], 2023, vol. 14, No 4, pp. 145–150. (In Russ.). doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.025.

Информация об авторе

С. В. Бастрыгина — кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Information about the author

S. V. Bastrygina — PhD (Engineering), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 23.05.2025; одобрена после рецензирования 13.06.2025; принята к публикации 27.06.2025.
The article was submitted 23.05.2025; approved after reviewing 13.06.2025; accepted for publication 27.06.2025.