

УДК 691.4:66.022

А. С. Ковчур¹, А. Т. Волочко², А. В. Гречаников¹, П. И. Манак³¹Витебский государственный технологический университет²Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси³УККП «Витебское городское жилищно-коммунальное хозяйство»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОБАВКИ БОЯ СТЕКЛА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КЛИНКЕРНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В работе представлены результаты исследований эффективности использования добавки на основе боя стекла при изготовлении клинкерных керамических материалов. Рассмотрены направления применения отходов стекла, проведено исследование физико-механических свойств клинкерных керамических материалов с использованием добавки на основе боя стекла. Установлено, что полученные образцы керамических изделий с добавкой боя стекла полностью соответствуют требованиям СТБ 1787-2007. Рекомендуемое количество боя стекла, применяемого в качестве добавки для улучшения физико-химических свойств изделий строительной керамики (кирпича клинкерного для кладки наружных и внутренних стен зданий и сооружений), находится в интервале от 2 до 3% в основном составе смеси. Полученные результаты предоставляют возможность использовать бой стекла в качестве высокотемпературных добавок (плавней) при производстве изделий клинкерной керамики, соответствующих требованиям технических нормативных правовых актов, расширять ассортимент строительной керамики и улучшать экологическую ситуацию.

Практическая значимость исследований заключается в разработке ресурсосберегающей технологии клинкерных материалов и расширении сырьевой базы строительной индустрии за счет вовлечения в оборот промышленных отходов.

Ключевые слова: строительная керамика, клинкер, кирпич клинкерный, бой стекла, стеклянный порошок, отходы стекольной промышленности.

Для цитирования: Ковчур А. С., Волочко А. Т., Гречаников А. В., Манак П. И. Исследование эффективности использования добавки боя стекла при изготовлении клинкерных керамических материалов // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, полимерное материаловедение. 2026. № 2 (307). С. 19–31.

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-307-2.

A. S. Kauchur¹, A. T. Volochko², A. V. Hrachanikau¹, P. I. Manak³¹Vitebsk State Technological University²Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus³UKPP “Vitebsk Housing and Communal Services”

STUDY OF EFFICIENCY OF USING BROKEN GLASS ADDITIVE IN MAKING CLINKER CERAMIC MATERIALS

The paper presents the results of studies of the effectiveness of using an additive based on broken glass in the manufacture of clinker ceramic materials. The paper examines the use of glass waste, studies the physical and mechanical properties of clinker ceramic materials using an additive based on broken glass. It was found that the obtained samples of ceramic products with the addition of broken glass meet the requirements of STB 1787-2007, the recommended amount of broken glass used as an additive to improve the physicochemical properties of construction ceramics (clinker bricks for masonry of external and internal walls of buildings and structures) is in the range from 2 to 3% in the basic composition of the mixture. The obtained results make it possible to use broken glass as high-temperature additives in the production of clinker ceramics that meet the requirements of technical regulatory legal acts, expand the range of construction ceramics and improve the environmental situation.

The practical significance of the research lies in the development of a resource-efficient technology for clinker materials and the expansion of the construction industry's raw material base through the utilization of industrial waste.

Keywords: building ceramics, clinker, clinker bricks, broken glass, glass powder, waste glass industry.

For citation: Kauchur A. S., Volochko A. T., Hrachnikau A. V., Manak P. I. Study of efficiency of using broken glass additive in making clinker ceramic materials. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Polymer Materials Science*, 2026, no. 2 (307), pp. 19–31 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-2669-2026-307-2.

Введение. Современные тенденции развития Республики Беларусь в области строительства предъявляют все более высокие требования к характеристикам строительных материалов и изделий, что, в свою очередь, в большинстве случаев ведет к их удорожанию.

При высоких требованиях к качеству и разнообразию ассортимента в условиях острой конкурентной борьбы за покупателя решающее значение имеет цена. Поэтому расширение ассортимента продукции является одним из залогов успешной деятельности предприятия. В результате мониторинга рынка керамических материалов и изделий отдела по коммерческой работе (маркетинга) ОАО «Обольский керамический завод» значимый интерес для запуска производства на предприятии представляют клинкерные керамические материалы – кирпич и тротуарная плитка [1].

В то же время решение актуальной народнохозяйственной проблемы по рациональному применению природных ресурсов предполагает использование отходов как техногенного сырья при получении керамических материалов и изделий строительного назначения, что приводит к минимизации экологического ущерба [1].

Основная часть. Одним из направлений использования различных видов техногенных продуктов является производство эффективных композиционных материалов в разных отраслях народного хозяйства, характеризующихся высокими физико-механическими свойствами, долговечностью, эксплуатационными и эстетическими показателями, низкой стоимостью [2].

В ряде случаев применение отходов промышленного производства позволяет заменить природные ресурсы. Наряду с этим использование техногенного сырья решает важную экологическую проблему загрязнения окружающей среды, позволяет уменьшить затраты на производство строительных материалов по сравнению с производством из природного сырья [3]. Известны также результаты зарубежных исследований [4, 5], которые свидетельствуют о мировых тенденциях в индустрии отделочно-строительных материалов, рассматривающих перспективность применения техногенных продуктов при изготовлении керамических клинкерных материалов.

Как известно, клинкерный кирпич – керамический материал, обожженный до полного спекания черепка без признаков пережога и деформаций, отличающийся высокой механической прочностью, плотностью и морозостойкостью [6]. Различают клинкер дорожный (клинкерная брусчатка), строительный и облицовочный, применяемые в гражданском строительстве, клинкер для гидротехнических сооружений и кислотоупорный клинкер. Поверхность облицовочного клинкерного кирпича может быть неглазурованной и глазурованной, блестящей или матовой [7, 8].

От обычных изделий грубой строительной керамики клинкерные керамические материалы отличаются более высокой механической прочностью (на сжатие, истирание и изгиб), меньшим водопоглощением (0–6% по массе). Применяются для отделки фасадов, покрытия мостовых, изготовления ступеней и др. [9].

К основным материалам, которые являются сырьем для производства клинкерных керамических изделий, относятся глины, каолины. Для придания необходимых свойств при изготовлении клинкерных керамических материалов используются пигменты, а также различные добавки, например, для связывания водорастворимых солей – BaC_2 , плавни, отошающие, порообразующие, пластифицирующие [9]. В качестве компонентов, входящих в состав таких добавок, могут применять разные техногенные продукты, в том числе стеклобой.

В настоящее время на территории Витебской области предприятиями по сбору вторичных ресурсов собирается большое количество боя стекла, часть из которого возвращается на стекольные заводы для переработки, но объемы его сбора превышают потребности стекольных заводов [10].

Стеклобой представляет собой трудноутилизируемый отход, неподлежащий воздействию воды, атмосферных явлений (осадки, солнечная радиация, температурные перепады) и не разрушающийся под влиянием органических, минеральных и биологически активных организмов [2].

Согласно классификатору отходов Республики Беларусь, отходы стекла представлены следующими видами: 3140801 – стеклобой бесцветный тарный; 3140803 – стеклобой полубелый тарный; 3140804 – стеклобой полубелый листовой; 3140805 – стеклобой зеленый тарный; 3140806 – стеклобой коричневый тарный; 3140816 – стеклобой загрязненный; 31440827–314408378 – стеклобой при затаривании различных видов алкогольных и безалкогольных напитков; 31444840–31444843 – стеклобой при использовании стекла в строительстве; 3140899 – стеклобой прочий. Перечисленные виды относятся к категории неопасных отходов [11].

В работе [12] были проанализированы возможные пути утилизации стеклобоя и направления использования отходов стекла (рис. 1).

Промышленное и гражданское строительство требует постоянного увеличения производства различных строительных материалов. В настоящее время актуально применение недефицитного сырья и отходов для их производства [13]. В работе [14] представлены результаты разработки состава шихты на основе малопластичной глины, включающего отходы непластифицированного поливинилхлорида в качестве выгорающей добавки, бой листового оконного стекла в качестве флюсующей упрочняющей добавки и дополнительно содержащего борную кислоту в качестве плавня с целью получения керамических облицовочных материалов высокого качества.



Рис. 1. Схема направлений использования боя стекла

Измельченный стеклобой может быть использован при производстве цветной декоративной облицовочной плитки, декоративном оформлении жилых и промышленных зданий и сооружений, для внутренней отделки помещений, создания декоративных панно и фасадной облицовочной и теплоизоляционной керамики (плитки, плит, блоков и кирпича). Кроме того, он может применяться как компонент глазури для покрытия плитки [15].

Исследование, описанное в работе [16], показывает возможности использования наночастиц отходов стекла с исходной керамической смесью для производства настенной и напольной плитки. Результаты его подтвердили, что стекло способствует улучшению

теплофизических и механических свойств, а также микроструктуры подготовленных образцов, содержащих до 25 мас. % стекла, обожженного при 1150°C. Добавление большого количества стекла (>25 мас. %) в керамическую массу нежелательно ввиду его негативного влияния на физико-механические и эксплуатационные свойства обожженных изделий.

Авторы работы [17] рассматривают возможность применения крупнотоннажных отходов стеклоизделий особой экономической зоны Татарстана «Алабуга» – боя автомобильного стекла и отходов стекловолна – для получения лицевого керамики и клинкера на основе местных кирпичных глин.

В статье [18] приведены результаты исследований по использованию отработанного стекла (стеклобоя) в качестве спекающей добавки при производстве керамической плитки. Квадратные плитки со стандартным поперечным сечением (2,5×2,5 см), содержащие 0, 5, 10 и 12% порошка стеклобоя соответственно, обжигали при пяти различных температурах (800, 900, 1000, 1100 и 1200°C соответственно) и времени выдержки 1 ч при 10°C/min. На полученных квадратных плитках проводили испытания на прочность при холодном разрушении (CCS), водопоглощение, линейную усадку при обжиге, плотность и кажущуюся пористость. Результаты испытаний показывают, что усадка повышается с увеличением содержания стекла при 800°C и все другие свойства, упомянутые выше, улучшаются. Эти изменения чаще проявлялись при температурах выше 900°C, особенно в случае 10- и 12%-ного стеклянного порошка. Композиция стеклобоя 10%-ная, которая обжигалась при 1045°C, имела значение CCS 11 МПа и не было зарегистрировано точечных отверстий или трещин, что более подходит для используемого соотношения смеси.

В статье [19] показана возможность производства элементов мощения из отходов стекла и кварцевой пыли, по эксплуатационным свойствам не уступающих клинкерным элементам мощения и значительно превосходящих элементы мощения на основе мелкозернистого бетона.

В западных странах также создаются новые материалы на основе стеклобоя. В Америке изобретены белые и цветные кирпичи, сделанные из стеклобоя и макулатуры, а также материал тиксит, получаемый из дробленого стеклобоя, строительного бутового камня и глины. В Великобритании известно применение стеклобоя в качестве материала или основы для дренажа для многослойных конструкций в пределах проезжей части автомобильной дороги [20].

Для повышения качества керамических изделий, снижения их себестоимости постоянно ведется исследовательская работа по поиску добавок, которые могут быть использованы в производстве. В частности, результаты исследований по применению добавок в керамическую массу позволяют получать информацию об их влиянии на физико-механические свойства керамики, а также проводить оптимизацию составов керамических масс для получения продукции с высокими потребительскими характеристиками [10]. В работе [21] рассмотрено использование плавней при производстве керамических материалов.

В Витебской области отходы стекла – бутылки, банки, битая тара – идут как возвратный отход для стеклозаводов в Гродно, Гомеле, поселке Елизово. Также стеклобой в Беларуси применяется при изготовлении строительных материалов, керамической плитки, в производстве краски для дорожной разметки.

В рамках проекта «Разработка рекомендаций по использованию добавки на основе боя стекла, стеклянного порошка при изготовлении керамических материалов», выполняемого по заданию ОАО «Обольский керамический завод», проведены исследования по применению добавки на основе боя стекла при производстве клинкерной керамики на сырье и технологическом оборудовании ОАО «Обольский керамический завод», что, в свою очередь, позволит расширить ассортимент выпускаемой продукции, возможности переработки боя стекла в Витебской области, улучшить экологическую ситуацию и снизить энергозатраты на предприятии.

Цель работы – оценка эффективности использования добавки на основе боя стекла для получения клинкерной керамики, изготавливаемой из местного глинистого сырья.

Для проведения исследований клинкерной керамики с добавкой боя стекла в качестве основного глинистого сырья выбиралась глина месторождения «Заполье» [10]. Указанная глина имеет следующие характеристики: светло-коричневый цвет, крупнодисперсная структура, беспорядочная (комковатая) текстура; легко поддается дроблению, хорошо размокает в воде, бурно вскипает при обработке 10%-ным раствором HCl. По числу пластичности глина относится к группе умеренно пластичного сырья (число пластичности 5–7); по чувствительности к сушке (по Чижевскому) – высокочувствительная; по показателям огнеупорности сырья она легкоплавкая (1139°C). По степени спекания глинистое сырье относится к группе неспекающихся. Содержит до 15% Al_2O_3 и до 55% SiO_2 , при этом количество свободного SiO_2 может достигать 25% [22, 23].

В качестве отощающих материалов были выбраны отсев из материалов дробления горных пород (далее отсев), речной песок, бой стекла и теннисит. Гранулометрический состав используемых отощителей приведен в табл. 1.

Таблица 1. Гранулометрический состав отощителей

Фракция, мм	Содержание фракции, мас. %			
	отсев	речной песок	бой стекла	теннисит
>2,5	29,50	3,57	1,11	11,56
1,6–2,5	13,25	3,85	22,70	13,9
1–1,6	11,50	7,70	28,16	14,68
0,315–1	19,50	53,55	36,21	28,2
<0,315	26,25	31,33	11,82	31,66

Теннисит – технологические отходы производства кирпича. Насыпная плотность его составляет 1100 кг/м³. Величина зерен теннисита не более 5 мм. Стекланный бой незагрязненный (исключая бой стекла электронно-лучевых трубок и люминесцентных ламп) состоит из следующих компонентов (в процентах): SiO_2 – 72,5; Al_2O_3 – 2,5; MgO – 2,5; CaO – 7; Na_2O – 15,5. Для проведения исследований физико-механических свойств керамических материалов с использованием добавки на основе боя стекла были подготовлены экспериментальные составы керамических масс (табл. 2).

Таблица 2. Экспериментальные составы (массовое содержание компонентов)

Компонент / состав	Номера образцов			
	1	2	3	4
Глина месторождения «Заполье»	78	78	78	78
Песок речной	15	14	12	10
Отсев	3,5	3,5	3,5	3,5
Теннисит	3,5	3,5	3,5	3,5
Добавка боя стекла	0	1	3	5

Состав № 1 – базовый, без добавки боя стекла. Относительно свойств образцов, изготовленных из этого состава, делалось сравнение по введению добавок стеклобоя на свойства клинкерных керамических материалов (составы № 2–4 соответственно).

Подготовка экспериментальных образцов осуществлялась следующим образом. Пластическую керамическую массу изготавливали путем смешивания предварительно взвешенных компонентов с последующим добавлением воды до влажности массы 17–19%.

Затем масса вылеживалась не менее 24 ч. Для изготовления образцов использовался метод пластического формования. Образцы изготавливали в виде кирпичей размером $65 \times 30 \times 15$ мм, а также цилиндров диаметром 30 мм и высотой 30–40 мм методом ручной набивки пластической массы в металлические формы. После изготовления образцы подвяливались не менее 24 ч на воздухе, затем высушивались в сушильном шкафу при температуре $100 \pm 10^\circ\text{C}$. Высушенные образцы подвергались термической обработке в лабораторной электропечи: базовый состав (без добавки боя стекла) – при температуре 1075°C ; образцы клинкерной керамики – при температурах 1075 – 1100 – 1125°C с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

Для оценки эффективности применения добавки на основе боя стекла экспериментальные образцы клинкерной керамики исследовались по следующим физико-химическим характеристикам: водопоглощение, кажущаяся плотность, открытая пористость, прочность при сжатии и изгибе. Полученные результаты определения основных физико-химических свойств образцов клинкерной керамики приведены в табл. 3.

Таблица 3. Физико-химические свойства образцов

Свойства	Температура обжига, $^\circ\text{C}$									
	1	2			3			4		
	1075	1075	1100	1125	1075	1100	1125	1075	1100	1125
Водопоглощение, %	15,67	12,94	5,96	1,50	12,14	5,94	1,23	12,80	6,91	1,13
Кажущаяся плотность, кг/м^3	1836,44	1910,28	2114,57	2274,38	1917,29	2116,58	2214,91	1893,10	2056,53	2198,09
Открытая пористость, %	28,77	24,71	12,59	3,42	23,27	12,57	2,72	24,24	14,22	2,48
Прочность при сжатии, МПа	28,00	34,00	33,04	39,32	38,70	41,60	54,04	41,00	43,88	42,61
Прочность при изгибе, МПа	12,18	13,88	18,26	19,64	17,09	18,19	19,35	17,72	21,67	18,96

Закономерности физико-химических свойств клинкерной керамики от введения добавки и температуры спекания приведены на рис. 2–6.

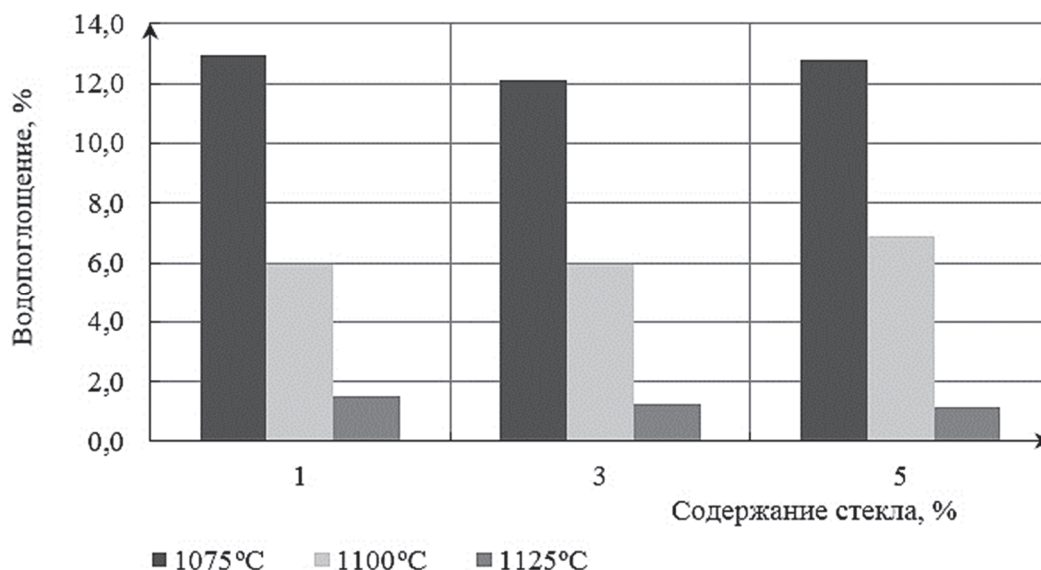


Рис. 2. Водопоглощение образцов клинкерной керамики

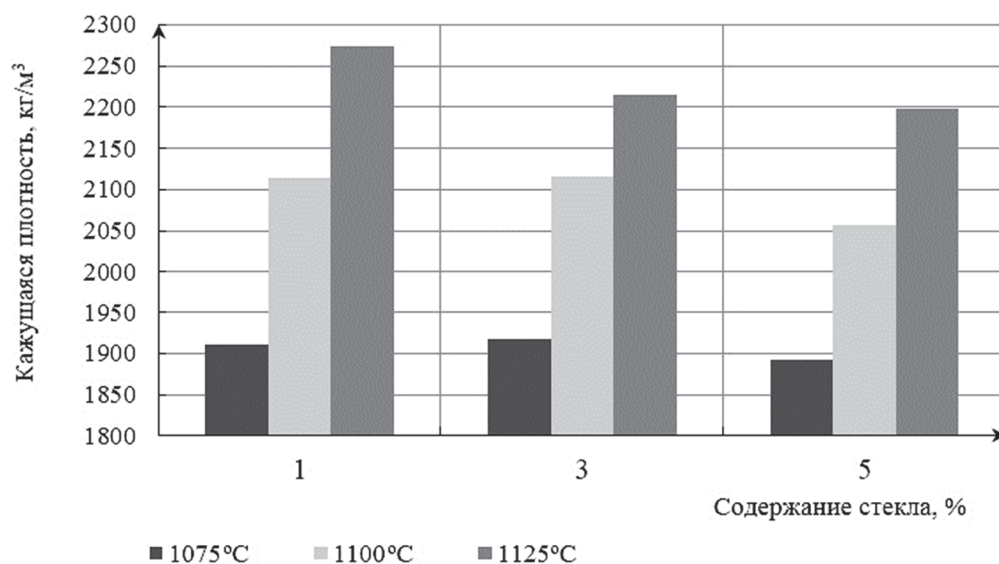


Рис. 3. Кажущаяся плотность образцов клинкерной керамики

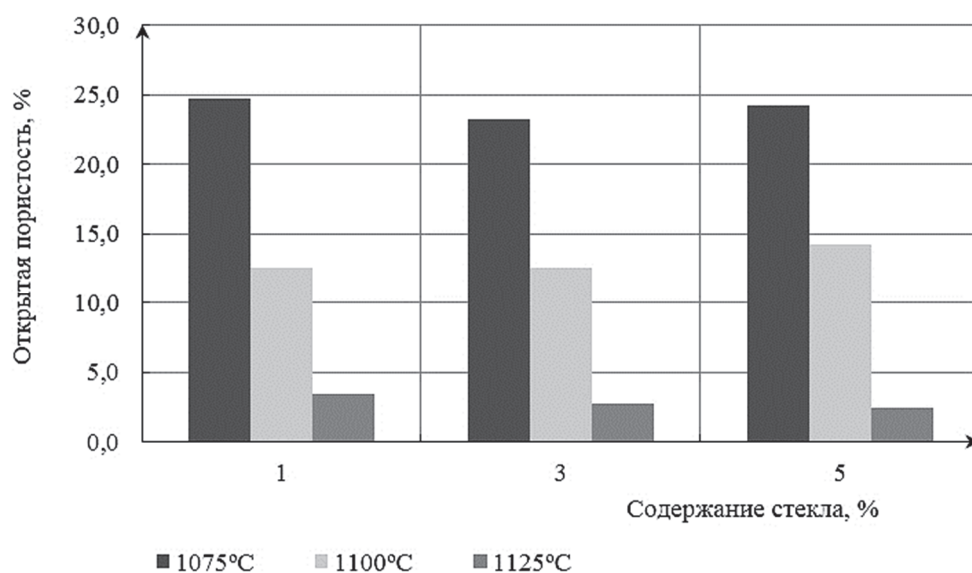


Рис. 4. Открытая пористость образцов клинкерной керамики

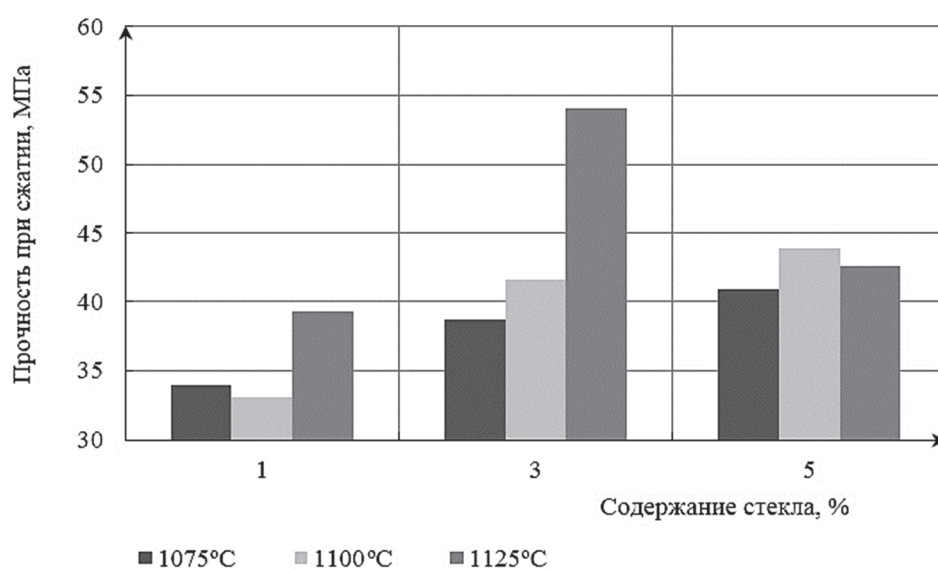


Рис. 5. Прочность при сжатии образцов клинкерной керамики

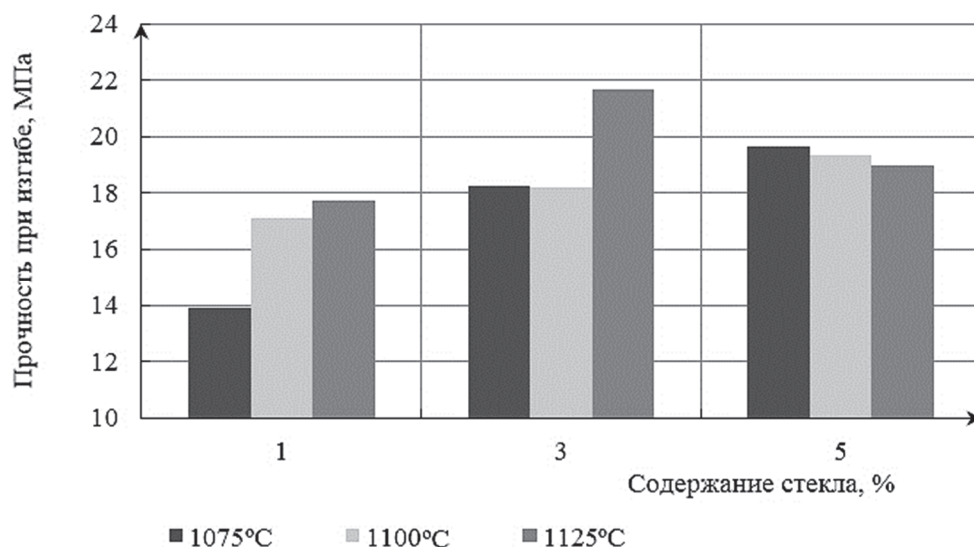


Рис. 6. Прочность при изгибе образцов клинкерной керамики

Анализируя физико-химические свойства образцов составов № 2–4, можно отметить следующее.

Водопоглощение образцов (образец № 4) изменяется от 1,13% до 12,94% в указанном диапазоне температур спекания. Минимальное значение водопоглощения 1,13% наблюдается у образцов состава № 4, обожженных при температуре 1125°C. Максимальное значение водопоглощения 12,94% отмечено у образцов состава № 2, обожженных при температуре 1075°C. В свою очередь значения открытой пористости изменяются в пределах от 2,48% (образец № 4) до 24,71% (образец № 4) в указанном диапазоне температур спекания. Минимальное значение открытой пористости 2,48% присутствует в образцах состава № 4, обожженных при температуре 1125°C. Максимальное значение открытой пористости 27,71% наблюдается у образцов состава № 2, обожженных при температуре 1075°C. Проанализировав изменения показателей (рис. 2, 4), можно сделать вывод, что с увеличением температуры обжига происходит снижение водопоглощения и открытой пористости образцов. Это объясняется тем фактом, что увеличение количества стекла до 3% приводит сначала к незначительному снижению водопоглощения и открытой пористости в интервале температур 1075–1100°C, а увеличение количества стекла до 5% вызывает незначительный их рост в этом же температурном интервале. Увеличение количества стекла в составах, обожженных при температуре 1125°C, приводит к снижению водопоглощения и открытой пористости. Такое изменение свойств в интервале температур 1075–1100°C можно объяснить тем, что стекло является плавнем и улучшает спекание глины, но увеличение его количества приводит к образованию выплавок на поверхности образцов, что и вызывает незначительный рост водопоглощения и открытой пористости. При температуре обжига в 1125°C глинистый материал полностью спекается, а образовавшиеся на поверхности образцов выплавки целиком расплавляются, сплавляются с глиной и закрывают открытую пористость.

Показатели кажущейся плотности образцов составов № 2–4 в указанных температурах обжига изменяются от 1893,10 кг/м³ (образец № 4) до 2274,91 кг/м³ (образец № 2). Максимальное значение кажущейся плотности 2274,91 кг/м³ имеют образцы состава № 2, обожженные при температуре 1125°C. Минимальное значение 1893,10 кг/м³ наблюдается у образцов состава № 4, обожженных при температуре 1075°C. Проанализировав показатели (рис. 3), сделаем заключение, что с ростом температуры обжига кажущаяся плотность уменьшается из-за протекания процессов спекания. У образцов, полученных при температуре обжига в 1125°C, кажущаяся плотность практически не меняется с увеличением количества стекла в составе. У образцов, обожженных при температуре 1075–1100°C, с увеличением количества стекла в составе шихты происходит снижение кажущейся плотности из-за роста открытой пористости.

Анализируя полученные закономерности прочности при сжатии и изгибе клинкерной керамики от введения добавки, отмечаем, что прочность при сжатии образцов составов № 2–4 находится в интервале от 33,04 МПа (образец № 2) до 54,04 МПа (образец № 3). Максимальная прочность при сжатии 54,04 МПа присутствует у образцов состава № 3, полученных при температуре обжига в 1125°C. Минимальная прочность 33,04 МПа наблюдается у образцов состава № 2, полученных при температуре обжига в 1100°C. Показатели прочности при изгибе образцов указанных составов изменяются в интервале от 13,88 МПа (образец № 2) до 21,67 МПа (образец № 4). Значение максимальной прочности при изгибе 21,67 МПа присуще образцам состава № 4, обожженным при температуре 1100°C, а показатель минимальной прочности при изгибе 13,88 МПа установлен у образцов состава № 2, обожженных при температуре 1075°C. Рассмотрев полученные зависимости (рис. 5, 6), можно сделать выводы о том, что прочность при сжатии и изгибе образцов, обожженных при температурах 1075 и 1100°C, растет с увеличением количества стекла в составе шихты. У образцов, обожженных при температуре 1125°C, с ростом количества стекла прочность при сжатии и изгибе сначала увеличивается, а затем начинает уменьшаться. С увеличением количества стекла в составе шихты улучшается спекание глины, что и приводит к росту прочностных характеристик. Это также может быть объяснено взаимодействием расплава стекла с глинистым веществом, когда небольшое его количество впитывается в основную массу, оставляя поры, а при увеличении играет роль плавня, спекая глину в однородную массу. Но при температуре обжига в 1125°C увеличение количества стеклофазы приводит к снижению прочности образцов, так как стекло делает их хрупкими.

Полученные данные согласуются с ранее известными результатами исследований в этой области [24, 25].

Заключение. Изделия клинкерной керамики (кирпич клинкерный керамический) должны отвечать следующим основным требованиям по СТБ 1787–2007 (класс А) [26]: предел прочности при сжатии – не менее 25 МПа; предел прочности при изгибе – не менее 1,7 МПа; водопоглощение – не более 4%; кажущаяся плотность – не менее 2000 кг/м³.

В результате проведенных исследований установлено:

1) полученные образцы клинкерного керамического кирпича с добавкой боя стекла соответствуют требованиям по показателям прочности при сжатии и изгибе СТБ 1787–2007 (класс А) во всем диапазоне температур спекания;

2) по показателям кажущейся плотности образцы соответствуют требованиям СТБ 1787–2007 (класс А) в диапазоне температур спекания от 1110 до 1125°C.

3) оптимальное количество боя стекла, используемого в качестве добавки при производстве клинкерной керамики кирпича керамического для кладки наружных и внутренних стен зданий и сооружений, находится в интервале от 2 до 3% при температуре обжига в интервале 1100–1125°C;

4) добавление боя стекла в количестве от 2 до 3% при производстве клинкерного кирпича из глинистого сырья месторождения «Заполье» способствует появлению расплава, что приводит к процессам кристаллизации твердых минералов из расплава и увеличению количества стеклофазы, определяющей прочностные свойства керамических изделий;

5) введение в состав шихт боя стекла в качестве отощителя взамен части песка при температурах спекания кирпича в интервале 1100–1125°C в соответствии с технологическим процессом производства на ОАО «Обольский керамический завод» позволяет получить изделия, соответствующие требованиям СТБ, и расширить возможности переработки боя стекла.

Список литературы

1. Исследование влияния содержания в исходном сырье осадков химической водоподготовки на физико-механические свойства тротуарной плитки / А. В. Гречаников [и др.] // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2021. № 1(40). С. 115–123. DOI: 10.24412/2079-7958-2021-1-115-123.

2. Минько Н. И., Калатоzi В. В. Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения // Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова. 2018. № 1. С. 82–88. DOI: 10.12737/article_5a5dbf09319de9.71561256.
3. Лазарева Т. Л., Куликова Е. С. Исследование влияния отходов промышленности на свойства стеновой керамики // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по материалам LV Междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 2016. Т. 50, № 2. С. 135–140.
4. Перспективы использования промышленных отходов для получения керамических строительных материалов / Д. В. Макаров [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 5. С. 254–281.
5. Quality Improvement of Ceramic Bricks by Incorporation of Sludge from Water Treatment Units / D. C. Cruz [et al.] // Journal of Chemical Engineering and Chemistry. 2016. Vol. 2, no. 2. P. 42–56. DOI: 10.18540/2446941602022016042.
6. Получение клинкерного кирпича на основе минерального сырья Республики Беларусь / И. В. Пищ [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. 2017. № 4. С. 90–98.
7. Кройчук Л. А. Новый европейский стандарт на клинкерный дорожный кирпич // Строительные материалы. 2003. № 9. С. 42–43.
8. Гаврилов А. В., Гринфельд Г. И. Краткий обзор истории, состояния и перспектив рынка клинкерного кирпича в России // Строительные материалы. 2013. № 4. С. 20–22.
9. Исследование структуры и свойств керамических клинкерных материалов с добавками осадков химической водоподготовки / А. В. Гречаников [и др.] // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2021. № 2(41). С. 104–114. DOI: 10.24412/2079-7958-2021-1-104-114.
10. Использование промышленных отходов в производстве изделий строительной керамики / А. Т. Волочко [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. трудов. Кн. 1. Материаловедение. 2023. С. 187–197.
11. Общегосударственный классификатор Республики Беларусь. Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь: ОКРБ 021-2019. Введ. 2019.12.09. Мн.: РУП «Бел НИЦ «Экология», 2019. 194 с.
12. Applications of Recycled and Crushed Glass (RCG) as a Substitute for Natural Materials in Various Fields / C. Epure [et al.] // A Review. Materials. 16(17), 5957. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16175957>.
13. Чупрова Л. В. Отходы производства и потребления стекла как сырье для получения качественной продукции // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12-4. С. 640–644. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=10898> (дата обращения: 15.11.2024).
14. Применение полимерных и стекольных отходов для получения самоглазующейся облицовочной керамики / И. Викалова [и др.] // Экология и промышленность России. 2019. 23 (11). С. 38–42. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-11-38-42>.
15. Зеленев Е. А., Белов В. В. Использование стеклобоя как вторичного заполнителя в составе цементного бетона // Вестник Тверского государственного технического университета. Сер.: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2022. № 4 (16). С. 12–20.
16. Darweesh H. H. M. Recycling of glass waste in ceramics—part I: physical, mechanical and thermal properties // SN Applied Sciences. 2019. 1:1274. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1304-8>.
17. Женжурис И. А., Хозин В. Г., Низамов Р. К. Использование промышленных отходов стеклоизделий в технологии строительной керамики // Строительные материалы. 2019. № 12. С. 34–36. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-34-36>.
18. Ogunro Recycling of Waste Glass as Aggregate for Clay Used in Ceramic Tile Production // American Journal of Engineering Research (AJER). 2018. Vol. 7, no. 08. P. 272278.

19. Воронин К. М., Некрасова С. А., Зубулина Н. И. Элементы мощения из отходов стекла и кварцевой пыли // *Стекло и керамика*. 2014. Т. 87, № 3. С. 11–12.
20. Meland I., Dahl P. A. Recycling glass cullet as concrete aggregates, applicability and durability // *Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium*. Dundee UK. 2001. P. 167–177.
21. Шишакина О. А., Паламарчук А. А. Применение плавней в производстве керамических материалов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019. № 11. С. 105–109.
22. Волочко А. Т., Подболотов К. Б., Дятлова Е. М. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы. Мн.: Бел. навука, 2013. 385 с.
23. Левицкий И. А., Пищ И. В. Основы производства керамических плиток. Мн.: БГТУ, 2002. 127 с.
24. Левицкий И. А., Хоружик О. Н. Исследование процессов спекания полиминеральных глин с целью получения клинкерного кирпича // *Наука и технологии строительных материалов: состояние и перспективы развития: материалы докладов Междунар. науч.-техн. конф. / Бел. гос. технол. ун-т*. Мн., 2017. С. 93–96.
25. Левицкий И. А., Климов Ю. А. Структурообразование плотнспекшейся керамики бытового назначения // *Стекло и керамика*. 2005. № 6. С. 32–36.
26. Кирпич керамический клинкерный. Технические условия: СТБ 1787-2007. Введ. 28.09.2007. Мн.: Госстандарт Респ. Беларусь, 2007. 7 с.

References

1. Hrachanikau, A., Kovchur A., Patotski V., Tsimanov I., Liatas A. Investigation of Influence of Chemical Water Treatment Sediments Content in Initial Raw Material on Physical and Mechanical Properties of Paving Tiles. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik of Vitebsk state technological university], 2021, no. 1(40), pp. 115–123. DOI: 10.24412/2079-7958-2021-1-115-123 (In Russian).
2. Minko N. I., Kalatosi V. V. Use of scrap glass in construction materials technology. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta imeni V. G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov], 2018, no. 1, pp. 82–88. DOI: 10.12737/article_5a5dbf09319de9.71561256 (In Russian).
3. Lazareva T. L., Kulikova E. S. Study of the influence of industrial waste on the properties of wall ceramics. *Tekhnicheskiye nauki – ot teorii k praktike: sbornik statey po materialam LV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technical sciences – from theory to practice: collection of articles based on the materials of the LV International scientific and practical conference]. Novosibirsk, 2016, vol. 50, no. 2, pp. 135–140 (In Russian).
4. Makarov D. V., Melkonyan R. G., Suvorova O. V., Kumárova V. A. Prospects for the use of industrial waste for the production of ceramic building materials. *Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2016, no. 5, pp. 254–281 (In Russian).
5. Cruz D. C., Oliveira J. S., Alvarenga M. C. S., Lavall R. L., de Oliveira C. R. Quality Improvement of Ceramic Bricks by Incorporation of Sludge from Water Treatment Units. *Journal of Chemical Engineering and Chemistry*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 42–56. DOI: 10.18540/2446941602022016042.
6. Pisch I. V., Biryuk V. A., Klimosh Y. A., Popov R. Y., Mikulich T. N. Production of clinker brick on the basis of mineral raw materials of the Republic of Belarus. *Vestsi Natsyyanal'nyay akademii navuk Belarusi* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus], series Chemical Sciences, 2017, no. 4, pp. 90–98 (In Russian).
7. Kroychuk L. A. New European standard for clinker road bricks. *Stroitel'nyye materialy* [Construction materials], 2003, no. 9, pp. 42–43 (In Russian).

8. Gavrilov A. V., Grinfeld G. I. A brief overview of the history, state and prospects of the clinker brick market in Russia. *Stroitel'nyye materialy* [Construction materials], 2013, no. 4, pp. 20–22 (In Russian).
9. Hrachanikau A., Kovchur A., Manak P., Sheleh V. Study of the Structure and Properties of Ceramic Clinker Materials with Additives of Chemical Water Treatment Sludge. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik of Vitebsk state technological university], 2021, no. 2 (41), pp. 104–114. DOI: 10.24412/2079-7958-2021-1-104-114 (In Russian).
10. Volochko A. T., Manak P. I., Podbolotov K. B., Hort N. A. Use of industrial waste in the production of building ceramics. *Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sbornik nauchnykh trudov. Kniga 1. Materialovedeniye* [Modern methods and technologies for creating and processing materials: collection of scientific works], book 1, Materials science, 2023, pp. 187–197 (In Russian).
11. NCRB 021-2019. National classifier of the Republic of Belarus. Classifier of waste generated in the Republic of Belarus. Ent. 2019.12.09. Minsk, RUP “Bel NITs Ecologiya” Publ., 2019. 194 p. (In Russian).
12. Epure C., Munteanu C., Istrate B., Harja M., Buium F. Applications of Recycled and Crushed Glass (RCG) as a Substitute for Natural Materials in Various Fields. *A Review. Materials*, 16 (17), 5957. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16175957>.
13. Chuprova L. V. Waste from the production and consumption of glass as a raw material for high-quality products. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Basic Research], 2016, no. 12-4, pp. 640–644. Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=10898> (accessed 15.09.2024) (In Russian).
14. Vitkalova I., Torlova A., Pikalov E., Selivanov O. Use of polymer and glass waste to produce self-coating facing ceramics. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2019, no. 23 (11), pp. 38–42. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-11-38-42> (In Russian).
15. Zelenev E. A., Belov V. V. Use of scrap glass as a secondary aggregate in cement concrete. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tver State Technical University], series Construction. Electrical and Chemical Engineering, 2022, no. 4 (16), pp. 12–20 (In Russian).
16. Darweesh H. H. M. Recycling of glass waste in ceramics—part I: physical, mechanical and thermal properties. *SN Applied Sciences*, 2019, no. 1:1274. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1304-8>.
17. Zhenzhurist I. A., Khozin V. G., Nizamov R. K. Use of industrial waste glass products in construction ceramics technology. *Stroitel'nyye materialy* [Construction materials], 2019, no. 12, pp. 34–36. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-34-36> (In Russian).
18. Ogunro Recycling of Waste Glass as Aggregate for Clay Used in Ceramic Tile Production. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 2018, vol. 7, no. 08. P. 272278.
19. Voronin K. M., Nekrasova S. A., Zubulina N. I. Paving elements made of waste glass and quartz dust. *Steklo i keramika* [Glass and ceramics], 2014, vol. 87, no. 3, pp. 11–12 (In Russian).
20. Meland I., Dahl P. A. Recycling glass cullet as concrete aggregates, applicability and durability. Recycling and Reuse of glass Cullet: Proceedings of International Symposium. Dundee UK, 2001, pp. 167–177.
21. Shishakina O. A., Palamarchuk A. A. Use of smelters in the production of ceramic materials. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Basic Research], 2019, no. 11, pp. 105–109 (In Russian).
22. Volochko A. T., Podbolotov K. B., Dyatlova E. M. *Ogneupornyye i tugoplavkiye keramicheskiye materialy* [Fire-resistant and refractory ceramic materials]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 385 p. (In Russian).
23. Levitsky I. A., Pich I. V. *Osnovy proizvodstva keramicheskikh plitok* [Basics of ceramic tile production]. Minsk, BGTU Publ., 2002. 127 p. (In Russian).

24. Levitsky I. A., Horuzhik O. N. Study of the processes of sintering of polymineral clays in order to obtain clinker bricks. *Nauka i tekhnologii stroitel'nykh materialov: sostoyaniye i perspektivy razvitiya: materialy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Science and technology of building materials: status and development prospects: proceedings of the International scientific and technical conference]. Minsk, 2017, pp. 93–96 (In Russian).

25. Levitsky I. A., Klimov Yu. A. Structure formation of dense sintered household ceramics. *Steklo i keramika* [Glass and ceramics], 2005, no. 6, pp. 32–36 (In Russian).

26. STB 1787-2007. Ceramic clinker brick. Specifications. Minsk, Gosstandard Respubliki Belarus' Publ., 1999. 7 p. (In Russian).

Информация об авторах

Ковчур Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства. Витебский государственный технологический университет (пр. Московский, 72, 210035, г. Витебск, Республика Беларусь). E-mail: kovchur.vstu@gmail.com. ORCID: 0000-0003-3354-6301.

Волочко Александр Тихонович – доктор технических наук, профессор, начальник отдела материаловедения и литейно-деформационных технологий. Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220084, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: volochko@phti.by. ORCID: 0000-0003-2098-8434.

Гречаников Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент, заместитель декана по учебной работе факультета информационных технологий и робототехники. Витебский государственный технологический университет (пр. Московский, 72, 210035, г. Витебск, Республика Беларусь). E-mail: grec_alex@rambler.ru. ORCID: 0000-0002-4925-8980.

Манак Павел Иванович – магистр, директор. УКПП «Витебское городское жилищно-коммунальное хозяйство» (ул. Замковая, 4, 210026, г. Витебск, Республика Беларусь). E-mail: manak8@yandex.ru.

Information about authors

Kauchur Andrey Sergeyevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Technology and Inventory of Machine-building Production. Vitebsk State Technological University (72 Moskovskiy Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: kovchur.vstu@gmail.com. ORCID: 0000-0003-3354-6301.

Volochko Aleksandr Tikhonovich – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Materials Science and Casting and Deformation Technology. Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10 Akademika Kuprevicha str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volochko@phti.by. ORCID: 0000-0003-2098-8434.

Hrachanikau Aleksandr Viktorovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Deputy Dean for Academic Affairs of the Faculty of Information Technology and Robotics. Vitebsk State Technological University (72 Moskovskiy Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: grec_alex@rambler.ru. ORCID: 0000-0002-4925-8980.

Manak Pavel Ivanovich – Master, Director. UKPP “Vitebsk Housing and Communal Services” (4 Zamkovaya str., 210026, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: manak8@yandex.ru.

Поступила 04.03.2026