

# Проект технологической линии для избирательного дробления и гидрофобизации дорожно-строительного щебня из доменного шлака

<sup>1</sup>\*КУНАЕВ Вячеслав Александрович, PhD, постдокторант, доцент, kunaev91@list.ru,

<sup>2</sup>ТИМУХИНА Елена Николаевна, д.т.н., зав. кафедрой, ETimuhina@usurt.ru,

<sup>1</sup>НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан, Темуртау, пр. Республики, 30,

<sup>2</sup>Уральский государственный университет путей сообщения, Россия, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66,

\*автор-корреспондент.

**Аннотация.** Статья посвящена вопросу повышения физико-механических характеристик дорожно-строительного щебня из доменного шлака. Цель исследования – обоснование и моделирование в лабораторных условиях технологической линии для избирательного дробления и гидрофобизации данного материала. Для достижения цели использованы экспериментальные методы, такие как избирательное дробление, гидрофобизация, испытания щебня на морозостойкость, водопоглощение, дробимость. Представлен проект технологической линии для избирательного дробления и гидрофобизации шлакового щебня, описан принцип ее работы. Представлены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния избирательного дробления в шаровой мельнице и гидрофобизации шлакового щебня, его, физико-механические характеристики. Выполнена оценка эффективности предлагаемого технологического процесса.

**Ключевые слова:** обогащение, избирательное дробление, гидрофобизация, прочность, водопоглощение, морозостойкость, шлаковый щебень, дорожное строительство, доменный шлак.

**Введение.** Надежность и долговечность автодорог зависят от ряда факторов, среди которых одним из самых важных является устойчивость к воздействию внешней среды, долговечность и прочность материалов, использованных при их строительстве [1]. Широкое применение в дорожном строительстве находят материалы, получаемые из техногенных отходов, в том числе из отходов черной металлургии, таких, например, как отвальный доменный шлак, который может применяться в качестве заполнителя подстилающих слоев дорожной одежды. Однако широкое применение отвального доменного шлака в дорожном строительстве ограничено его разнородным (по основным физико-механическим характеристикам) составом. Отдельные зерна шлакового щебня сильно отличаются друг от друга по прочности, водопоглощению, морозостойкости, плотности. В каждой пробе встречаются как прочные зерна, пригодные для использования в строительстве, так и хрупкие, не пригодные для этих целей. Прочность, плотность, водопоглощение, морозостойкость шлакового щебня напрямую зависят от его пористости, на которую, в свою очередь, влияют такие факторы, как химический

состав доменного шлака (сильно варьируемый в зависимости от исходного сырья, используемого при выплавке чугуна), условия застывания и др. В этой связи важной и актуальной задачей является повышение физико-механических характеристик шлакового щебня перед его использованием в дорожном строительстве.

В работе [2], являющейся предпосылкой к настоящему исследованию для повышения плотности, прочности и водопоглощения шлакового щебня предлагается метод обработки данного материала, включающий следующие этапы:

- 1) смешивание предварительно увлажненного щебня с жидкой смесью, содержащей цемент, микрокремнезем и измельченный доменный шлак;
- 2) заполнение пор полученного материала порошкообразным заполнителем аналогичного состава;
- 3) удаление излишков порошкообразного заполнителя с поверхности зерен щебня;
- 4) увлажнение шлакового щебня для схватывания смеси в порах.
- 5) просушка шлакового щебня с заполненными порами;
- 6) пропитка полученного материала водоот-

талкивающим составом (гидрофобизация) [2].

В результате такой обработки поры зерен шлакового щебня оказываются заполнены порошкообразным составом, а поверхностная пленка, обладающая водоотталкивающими свойствами, препятствует проникновению влаги внутрь материала. Практическая реализация данного метода позволяет добиться значительного снижения водопоглощения шлакового щебня (с 5-6% до 1-1,5%), повысить плотность материала (за счет заполнения пор), но при этом не оказывает существенного влияния на его прочностные характеристики и влечет за собой дополнительные расходы, обусловленные использованием цемента и микрокремнезема.

Помимо описанного выше, общеизвестны такие методы обогащения разнопрочных каменных материалов, как гидравлическая [3] и воздушная [4] отсадка, обогащение в тяжелых средах (жидкостях, имеющих плотность выше плотности воды) [1], обогащение на плитных и барабанных механических классификаторах, обогащение на фрикционном сепараторе [5-6], избирательное дробление [7]. Основной целью применения данных методов является отделение малопористых (более плотных) зерен каменного материала от высокопористых (менее плотных) для последующего использования первых (называемых обогащенными) в дорожном строительстве.

Развивая положительный опыт, полученный по результатам исследований [1-7] и учитывая выявленные недостатки, была определена цель настоящего исследования – обоснование и моделирование в лабораторных условиях технологической линии для избирательного дробления и гидрофобизации дорожно-строительного щебня из доменного шлака.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- определение требований и предложение возможного варианта комплектования технологической линии для обогащения и гидрофобизации шлакового щебня;
- имитация технологического процесса, реализуемого предлагаемой технологической линией, в лабораторных условиях;
- экспериментальная оценка эффективности технологического процесса обработки шлакового щебня, включающего избирательное дробление и пропитку наиболее прочных зерен водоотталкивающим составом.

Последняя из перечисленных задач была реализована путем сравнения физико-механических характеристик шлакового щебня до и после обработки предлагаемым способом.

Научная новизна исследования заключается:

- в предложенном варианте комплектования технологической линии для обогащения и гидрофобизации дорожно-строительного шлакового щебня;
- в полученных результатах апробации пред-

лагаемого технологического процесса обработки шлакового щебня в лабораторных условиях;

- в результатах испытаний нового материала (обогащенного гидрофобизированного шлакового щебня) на водопоглощение, дробимость и морозостойкость.

### Методы исследования

Для достижения поставленной цели исследования использовались следующие общетехнические и специализированные методы:

1) 3D-моделирование в программной среде КОМПАС-3D (для построения компьютерных моделей оборудования, входящего в состав предлагаемой технологической линии);

2) лабораторный эксперимент (для имитации работы предлагаемой технологической линии с применением упрощенного инструментария в лабораторных условиях);

3) метод избирательного дробления (для отделения малопористых (более прочных) зерен шлакового щебня от высокопористых (менее прочных));

4) метод гидрофобизации (для пропитки водоотталкивающим составом обогащенных (малопористых) зерен шлакового щебня, выделенных в результате избирательного дробления, с целью дополнительного снижения их водопоглощения и повышения морозостойкости;

5) метод ускоренного определения морозостойкости щебня, при котором циклы замораживания/оттаивания имитируются посредством насыщения испытуемой пробы раствором сернокислого натрия и последующего высушивания;

6) метод определения водопоглощения щебня;

7) метод испытания щебня на дробимость в цилиндре;

8) метод определения насыпной плотности щебня.

Порядок испытаний щебня перечисленными методами представлен в ГОСТ 8269.0-97 [10].

**Научные результаты.** По результатам предварительных исследований [1, 7] для обогащения шлакового щебня по прочности зерен выбран метод избирательного дробления, как наиболее экономичный и позволяющий наиболее точно отделять прочные зерна от хрупких. Для дополнительного снижения водопоглощения предлагается пропитывать более прочные (обогащенные) зерна щебня водоотталкивающим составом. Для реализации данного процесса может быть использована технологическая линия (рисунок 2), работающая следующим образом. Шлаковый щебень необходимой фракции (10-20, 20-40 или 40-70 мм) загружается в шаровую мельницу, в которой происходит избирательное дробление в течение времени  $t = 35$  мин, установленного по результатам предварительных экспериментальных исследований [1, 7]. По результатам избирательного дробления более хрупкие зерна шлакового щеб-

ня полностью или частично разрушаются, а более прочные сохраняют свою целостность. Для отделения разрушенных зерен от целых используется вибрационный грохот.

Высокопористые зерна, разрушенные в результате избирательного дробления (рисунок 2, а), могут использоваться в дальнейшем при производстве шлакопортландцемента, а малопористые зерна (рисунок 2, б), сохранившие свою целостность – поступают на следующий этап обработки, на котором осуществляется их пропитка водоотталкивающим составом (поверхностная гидрофобизация).

Пропитка водоотталкивающим составом производится в установке для гидрофобизации, включающей 2 резервуара: верхний (где непосредственно производится пропитка) и нижний (куда сливается гидрофобизатор после завершения цикла пропитки). Выгрузка готовой продукции (гидрофобизированного шлакового щебня) осуществляется путем опрокидывания пропиточного резервуара (после предварительного слива гидрофобизатора, по аналогии с кузовом автомобиля-самосвала). Гидрофобизатор после слива и фильтрации используется повторно в последующих циклах пропитки водоотталкивающим

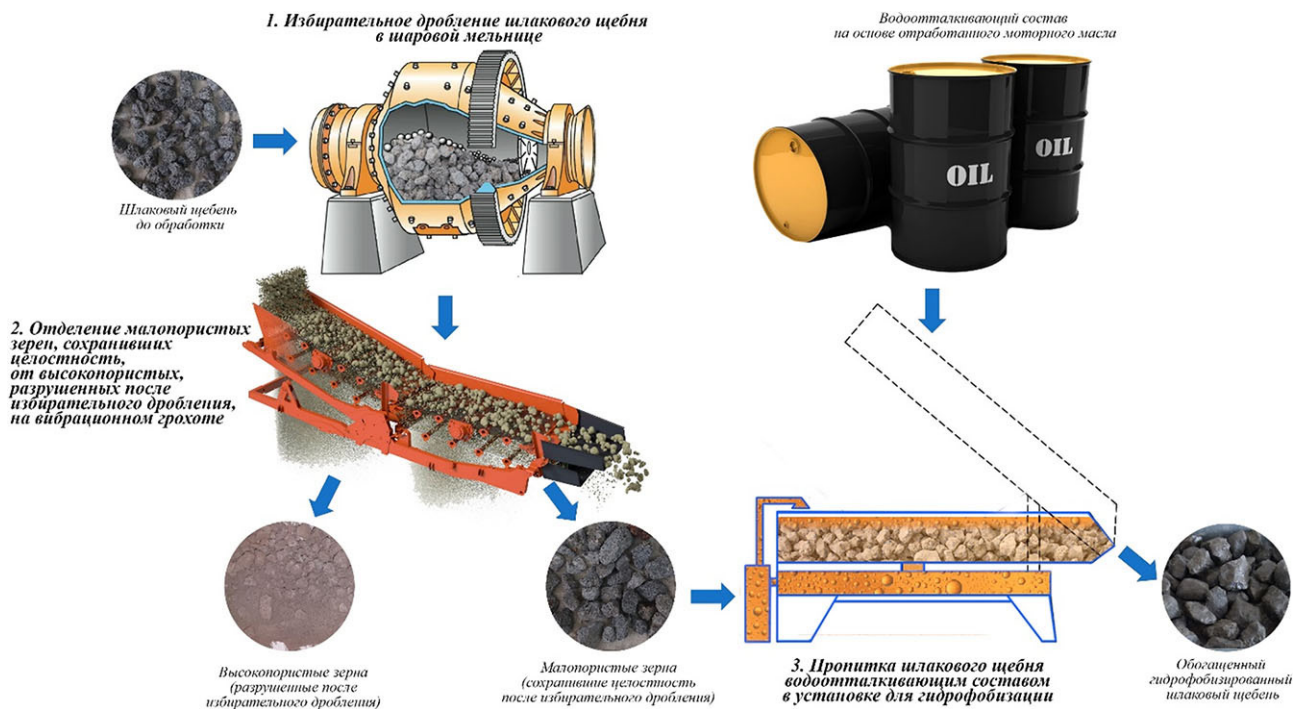
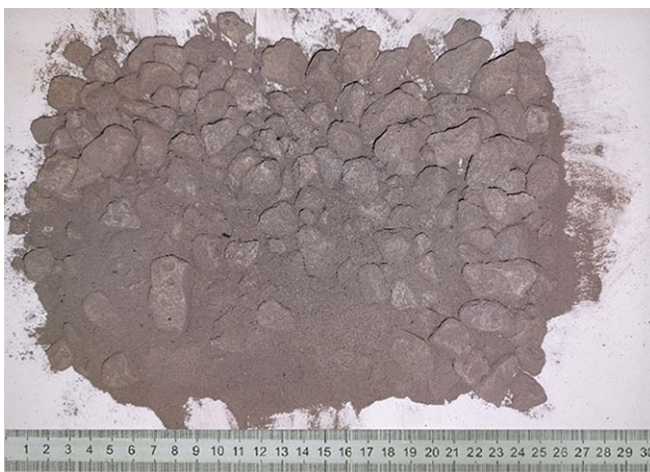


Рисунок 1 – Предлагаемая технологическая линия для обогащения и гидрофобизации шлакового щебня



а



б

а – разрушенные в результате избирательного дробления; б – сохранившие целостность

Рисунок 2 – Зерна шлакового щебня после избирательного дробления



составом.

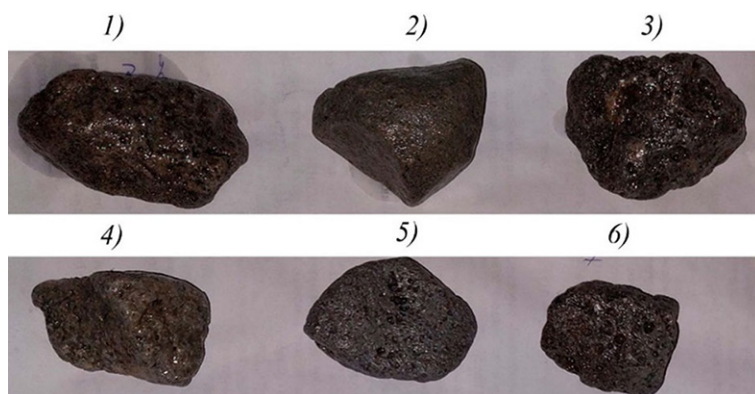
В лабораторных условиях была смоделирована работа предлагаемой линии для обогащения и гидрофобизации шлакового щебня. Для снижения затрат на изготовление автоматизированного оборудования апробация технологического процесса осуществлялась с использованием более простого (но достаточного для лабораторных исследований) ручного инструментария, обеспечивающего, тем не менее, полное соответствие требованиям, предъявляемым к качеству и точности технологического процесса. Так, вместо грохота использовалось лабораторное сито с размером

ячеек 20 мм, а вместо установки для гидрофобизации щебня – металлический резервуар. Наиболее важные параметры оборудования, использованного в лабораторных исследованиях при физическом моделировании работы предлагаемой линии, и технологического процесса обработки шлакового щебня приведены в таблице 1.

Примеры зерен шлакового щебня фракции 20-40 мм после обогащения и гидрофобизации представлены на рисунке 3. В таблице 2 представлены основные физико-механические характеристики шлакового щебня до и после обогащения и гидрофобизации в лабораторных условиях.

**Таблица 1 – Основные параметры оборудования и технологического процесса обогащения и гидрофобизации шлакового щебня, апробированного в лабораторных условиях**

| Параметр, ед. изм.                                                      | Значение                    |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Избирательное дробление</b>                                          |                             |
| Частота вращения барабана шаровой мельницы, об/мин                      | 50                          |
| Тип мелющих тел                                                         | шары и ципбельсы            |
| Количество мелющих тел:                                                 |                             |
| шары                                                                    | 2                           |
| ципбельсы                                                               | 2                           |
| Масса мелющих тел, кг                                                   |                             |
| шар                                                                     | 3.3                         |
| ципбельс                                                                | 4.85                        |
| Диаметр мелющих тел, мм                                                 |                             |
| шар                                                                     | 100                         |
| ципбельс                                                                | 100                         |
| Время избирательного дробления, мин                                     | 35                          |
| Диаметр отверстий контрольного сита после выхода с шаровой мельница, мм | 20                          |
| Диаметр барабана мельницы, мм                                           | 600                         |
| Масса пробы щебня перед началом избирательного дробления, кг            | 4.5                         |
| <b>Пропитка водоотталкивающим составом (гидрофобизация)</b>             |                             |
| Тип водоотталкивающего состава                                          | отработанное моторное масло |
| Время пропитки, мин                                                     | 20                          |
| Время просушки после гидрофобизации, сут                                | 2                           |
| Температура водоотталкивающего состава, °С                              | +20                         |



**Рисунок 3 – Образцы гидрофобизированного обогащенного шлакового щебня**

Таблица 2 – Характеристики шлакового щебня до и после обработки методом избирательного дробления и гидрофобизации

| Характеристика                        | Обычный шлаковый щебень до обработки | Гидрофобизированный обогащенный шлаковый щебень (после обработки) |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup> | 1124                                 | 1312                                                              |
| Водопоглощение, %                     | 4,45                                 | 1,22                                                              |
| Дробимость, %                         | 30,71                                | 19,85                                                             |
| Марка по морозостойкости              | F150                                 | F300                                                              |

**Выводы**

1) Предложен проект технологической линии для обогащения шлакового щебня по прочности зерен и пропитки водоотталкивающим составом. Предлагаемая линия отличается от аналогов тем, что обогащение осуществляется методом избирательного дробления в шаровой мельнице, а пропитка производится в установке для гидрофобизации с опрокидывающимся резервуаром.

2) В лабораторных условиях смоделирован технологический процесс обогащения и гидрофобизации шлакового щебня предлагаемым методом.

3) Обогащенный гидрофобизированный шлаковый щебень имеет в 1,17 раза более высокую насыпную плотность (1312 кг/м<sup>3</sup>), в 3,65 раза более

низкое водопоглощение (1,22%), в 1,55 раза более низкую дробимость по сравнению с обычным шлаковым щебнем. Также материал, прошедший обработку предлагаемым способом, имеет более высокие показатели по морозостойкости (марка F300) по сравнению с обычным шлаковым щебнем (марка F150). Это подтверждает эффективность предлагаемой технологической линии для обогащения и гидрофобизации шлакового щебня.

**Сведения о финансировании.**

Данная работа выполнена в рамках исследования, финансируемого Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP15473081).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Кунаев В.А., Тавшанов И.С., Четын А. Анализ оборудования и технологий обогащения щебня из промышленных отходов для строительства объектов транспортной инфраструктуры // Труды университета. – 2023. – № 2 (91). – С. 206-211.
- Georgiadi I., Kadyrov A., Kunaev V. Development of the universal working equipment of the excavator for preparation of materials based on waste during the road building // Commun. – Sci. Lett. Univ. Zilina. – 2023. – 25 (2). – Pp. B62-B76. <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.022>
- Gschwenter V.L.S., Tubino R.M.C., Ambrós W.M., Miltzarek G.L., Sampaio C.H., Moncunill J.O. и др. Production of high-quality coarse recycled aggregates through a two-stage jigging process // Minerals. – 2022. – 12 (5). – 532. <https://doi.org/10.3390/min12050532>
- Ambros W.M., Sampaio C.H., Cazacliu B.G., Miltzarek G.L., Miranda L.R. Usage of air jigging for multi-component separation of construction and demolition waste // Waste Management. – 2017. – 60. – 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.029>
- Анохин П.М., Афанасьев А.И., Казаков Ю.М., Потапов В.Я. Рабочий процесс полочного фрикционного сепаратора с криволинейным трамплином переменной кривизны // Известия УГТУ. – 2016. – 2 (42). – С. 70-72.
- Potapov V.Y., Makarov V.N., Potapov V.V., Makarov N.V. Analysis of particle motion in friction separator, Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2018. – 4. – Pp. 197-203.
- Kunaev V., Bazarov V., Tavshanov I., Kadyrov A., Abdugaliyeva G., Kydyrbayeva S. Evaluation of the effect of enrichment of slag aggregate for pavement subbase by grains density on its physical and mechanical characteristics // Results in Engineering. – 2023. – 18. – 101181. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101181>
- ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. – М.: Стандартинформ, 2018. – 56 с.

**Домна қожынан жасалған жол-құрылыс қиыршық тастарын іріктеп ұсақтауға және гидрофобизациялауға арналған технологиялық желі жобасы**

<sup>1</sup>\*КУНАЕВ Вячеслав Александрович, PhD, постдокторант, доцент, [kunaev91@list.ru](mailto:kunaev91@list.ru),

<sup>2</sup>ТИМУХИНА Елена Николаевна, т.ф.д., кафедра меңгерушісі, [ETimuhina@usurt.ru](mailto:ETimuhina@usurt.ru),

<sup>1</sup>«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Теміртау, Республика даңғылы, 30,

<sup>2</sup>Орал мемлекеттік жолдар хабарламалар университеті, Ресей, Екатеринбург, Колмогоров көшесі, 66,

\*автор-корреспондент.

**Аңдатпа.** Мақала домендік қождан жасалған жол-құрылыс қиыршық тастарының физика-механикалық сипаттамаларын арттыру мәселесіне арналған. Зерттеудің мақсаты – зертханалық жағдайда осы материалды іріктеп ұсақтау және гидрофобизациялау үшін технологиялық желіні негіздеу және модельдеу. Мақсатқа жету үшін селективті ұсақтау, гидрофобизация, қиыршық тасты аязға төзімділікке, суды сіңіруге, ұсақтауға сынау сияқты эксперименттік әдістер қолданылды. Қожды қиыршық тасты іріктеп ұсақтауға және гидрофобтауға арналған технологиялық желінің жобасы ұсынылған, оның жұмыс принципі сипатталған. Шар диірменіндегі селективті ұсақтаудың және қожды қиыршық тастың гидрофобизациясының оның физика-механикалық сипаттамаларына әсерін бағалау бойынша эксперименттік зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Ұсынылған технологиялық процестің тиімділігін бағалау жүргізілді.

**Кілт сөздер:** байыту, селективті ұсақтау, гидрофобизация, беріктік, суды сіңіру, аязға төзімділік, қож қиыршық тас, жол құрылысы, домна шлактары.

### **Project of a Technological Line for Selective Crushing and Hydrophobization of Road Subbase Aggregate from the Blast Furnace Slag**

<sup>1</sup>\*KUNAEV Vyacheslav, PhD, Postdoctoral Researcher, Docent, kunaev91@list.ru,

<sup>2</sup>TIMUKHINA Elena, Dr. of Tech. Sci., Head of Department, ETimuhina@usurt.ru,

<sup>1</sup>NPJSC «Karaganda Industrial University», Kazakhstan, Temirtau, Republic Avenue, 30,

<sup>2</sup>Ural State University of Railway Transport, Russia, Yekaterinburg, Kolmogorov Street, 66,

\*corresponding author.

**Abstract.** The paper is devoted to the issue of increasing the physical and mechanical characteristics of road-building crushed stone from blast furnace slag. The purpose of the study is to substantiate and simulate in laboratory conditions a technological line for selective crushing and hydrophobization of this material. To achieve this purpose, the experimental methods such as selective crushing, hydrophobization, testing of the slag aggregate for frost resistance, water absorption, and crushing were used. A project of a technological line for selective crushing and hydrophobization of the slag aggregate is presented, the principle of its operation is described. The results of experimental studies on the evaluation of the effect of selective crushing in a ball mill and hydrophobization of the slag aggregate on its physical and mechanical characteristics are presented. The efficiency of the proposed technological process was evaluated.

**Keywords:** enrichment, selective crushing, hydrophobization, strength, water absorption, frost resistance, slag aggregate, road construction, blast furnace slag.

## REFERENCES

1. Kunaev V.A., Tavshanov I.S., Chetyn A. Analiz oborudovaniya i tekhnologij obogashcheniya shchebnya iz promyshlennyh othodov dlya stroitel'stva ob'ektov transportnoj infrastruktury // Trudy universiteta. – 2023. – No. 2 (91). – Pp. 206-211.
2. Georgiadi I., Kadyrov A., Kunaev V. Development of the universal working equipment of the excavator for preparation of materials based on waste during the road building // Commun. – Sci. Lett. Univ. Zilina. – 2023. – 25(2). – P. B62-B76. <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.022>
3. Gschwenter V.L.S., Tubino R.M.C., Ambrós W.M., Miltzarek G.L., Sampaio C.H., Moncunill J.O. i dr. Production of high-quality coarse recycled aggregates through a two-stage jigging process // Minerals. – 2022. – 12 (5). – 532. <https://doi.org/10.3390/min12050532>
4. Ambros W.M., Sampaio C.H., Cazacliu B.G., Miltzarek G.L., Miranda L.R. Usage of air jigging for multi-component separation of construction and demolition waste // Waste Management. – 2017. – 60. – 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.029>
5. Anohin P.M., Afanas'ev A.I., Kazakov YU.M., Potapov V.YA. Rabochij process polochnogo frikcionnogo separatora s krivolinejnym tramplinom peremennoj krivizny // Izvestiya UGGU. – 2016. – 2 (42). – Pp. 70-72.
6. Potapov V.Y., Makarov V.N., Potapov V.V., Makarov N.V. Analysis of particle motion in friction separator, Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2018. – 4. – Pp. 197-203.
7. Kunaev V., Bazarov V., Tavshanov I., Kadyrov A., Abdugaliyeva G., Kydyrbayeva S. Evaluation of the effect of enrichment of slag aggregate for pavement subbase by grains density on its physical and mechanical characteristics // Results in Engineering. – 2023. – 18. – 101181. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101181>
8. GOST 8269.0-97. SHCheben' i gravij iz plotnyh gornyh porod i othodov promyshlennogo proizvodstva dlya stroitel'nyh rabot. Metody fiziko-mekhanicheskikh ispytaniy. – Moscow: Standartinform, 2018. – 56 p.