

Анализ оборудования и технологий обогащения щебня из промышленных отходов для строительства объектов транспортной инфраструктуры

¹*КУНАЕВ Вячеслав Александрович, PhD, постдокторант, старший научный сотрудник, kunaev91@list.ru,

¹ТАВШАНОВ Ильгар Сулейменович, магистрант, ilgartavshanov@gmail.com,

²ЧЕТЫН Айдын, PhD, профессор, acetin@gazi.edu.tr,

¹НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан, Темиртау, пр. Республики, 30,

²Университет Гази, Турция, Анкара, квартал Сафет, ул. Бандырма, 6/1,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Цель исследования заключается в выборе наиболее перспективных вариантов механизации технологического процесса обогащения щебня на основе доменного шлака. Для достижения цели использованы такие общенаучные методы, как литературный обзор, теория оптимизации, морфологический анализ и поисковый эксперимент. Рассмотрены основные технологии и оборудование, используемые для решения задач обогащения нерудных строительных материалов по прочности зерен. Предложены критерии оптимальности, позволяющие сравнивать технологические процессы обогащения. На основании предварительных поисковых экспериментов и результатов литературно-патентного обзора определены наиболее экономически целесообразные варианты обогащения щебня на основе доменного шлака.

Ключевые слова: обогащение нерудных строительных материалов, прочность, шлаковый щебень, дорожное строительство, критерии оптимальности.

Введение. Вопросы строительства и реконструкции автомобильных дорог являются одними из наиболее актуальных в сфере транспорта. Одной из самых дорогостоящих операций в дорожном строительстве является производство и транспортировка дорожно-строительных материалов к месту возведения автодороги. В этой связи, актуальной является задача производства более дешевых материалов для строительства дорог, например, из отходов [1].

Одним из таких отходов является доменный шлак, который образуется в жидком состоянии при выплавке чугуна и застывает после охлаждения. В мире ежегодно производится около 500-550 млн тонн. Например, в отвалах АО «АрселорМиттал Темиртау», по данным на 2023 год, накоплено более 30 млн тонн доменного шлака [2, 3].

Одним из способов переработки твердого доменного шлака из отвалов является производство щебня для дорожного строительства. Однако на сегодня использование доменного шлака для строительства автодорог ограничено из-за его высокого водопоглощения (6-8%), недостаточной морозостойкости и разнопрочного состава [4].

Прочность зерен щебня из доменного шла-

ка варьируется в широком диапазоне (от 2 до 40 МПа) [2]. Более прочные (соответственно, менее пористые) зерна не уступают по своим эксплуатационным характеристикам природному щебню и могут использоваться для строительства автомобильных дорог, тогда как менее прочные зерна (соответственно, более пористые) по своим характеристикам не подходят для дорожного строительства.

По этим причинам для использования шлакового щебня в дорожном строительстве необходимо его предварительное обогащение (в разных источниках также применяют термины «сортировка», «разделение», «классификация») по прочности (т.е. отделение более прочных зерен щебня для их дальнейшего использования в дорожном строительстве от менее прочных). Это позволит получать высокопрочный материал для строительства дорожных оснований из отходов, не прибегая к нерентабельной добыче и перевозкам природного щебня, что подтверждает актуальность данного исследования.

Цель исследования заключается в выборе наиболее перспективных вариантов механизации процесса обогащения шлакового щебня.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- обзор существующих технологий и оборудования для обогащения каменных материалов для дорожного строительства по прочности зерен;
- разработка алгоритма выбора наиболее эффективного способа обогащения шлакового щебня по критериям оптимальности;
- определение наиболее перспективных вариантов обогащения шлакового щебня для дальнейшей экспериментальной оценки их эффективности.

Научная новизна исследования заключается:

- в предложенных критериях оптимальности, позволяющих осуществлять выбор наиболее эффективного варианта обогащения щебня из промышленных отходов по прочности зерен;
- в предложенном алгоритме сравнения разных способов обогащения шлакового щебня по прочности зерен.

Методы исследования. Рассмотрим основные методы обогащения нерудных материалов по прочности зерен, применяемые в промышленности. Все методы обогащения можно разделить на 3 условные группы, в зависимости от характеристики материала, по которой происходит сортировка (рисунок 1). Основной задачей работы является сортировка щебня по прочности зерен, однако известно, что прочность σ может быть тесно связана с другими физическими характеристиками материалов, такими, как плотность ρ , упругость, характеризуемая модулем Юнга E , и коэффициент трения о различные фрикционные поверхности μ . Тогда зависимость прочности материала от его физико-механических характеристик можно представить в виде функции:

$$\sigma = f(\rho, E, \mu). \quad (1)$$

Таким образом, для повышения прочностных характеристик щебня можно осуществлять его обогащение как непосредственно по прочности,

так и по параметрам, с ней связанным: плотности, упругости и коэффициенту трения.

Рассмотрим представленные на рисунке 1 технологии, которые применяются или потенциально могут применяться для обогащения щебня, а также других полезных ископаемых по прочности, плотности, упругости зерен и их фрикционным характеристикам.

Обогащение по упругости и трению может осуществляться тремя возможными способами: на наклонной плите, на барабанном классификаторе, на фрикционном сепараторе.

При обогащении на плитных и барабанных механических классификаторах используется способ сепарации, базирующийся на разнице в упругости и трении зерен щебня [5]. В барабанном классификаторе (рисунок 2а) на поверхность вращающегося металлического барабана с определенной высоты падают куски материала. Прочные зерна (показаны на рисунке 2а черным цветом), обладающие большей упругостью $R_{пр}$, отскакивают от барабана в одну сторону, а хрупкие (или слабые) зерна, обладающие меньшей упругостью $R_{сл}$ (показаны белым цветом), увлекаются трением о поверхность барабана и падают по другую его сторону [5].

Центральный угол α , образованный осью, проходящей через центр разделительного барабана 3 и центр подвижной направляющей воронки 10, называют углом настройки. Его подбирают так, чтобы происходило максимальное отделение прочных зерен от слабых [5].

При разделении материала на наклонной плите (плитном классификаторе), показанном на рисунке 2б, все зерна подаются на металлическую плиту, а затем отскакивают от нее. Более прочные зерна, которые обладают большей упругостью (показаны на рисунке 2б черным цветом), отскакивают на большее расстояние, а слабые (показаны на рисунке 3 белым цветом) – на

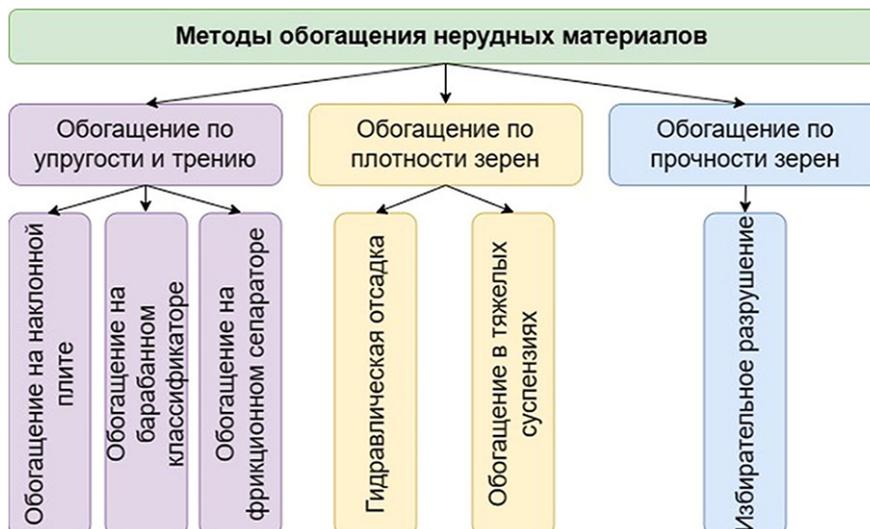
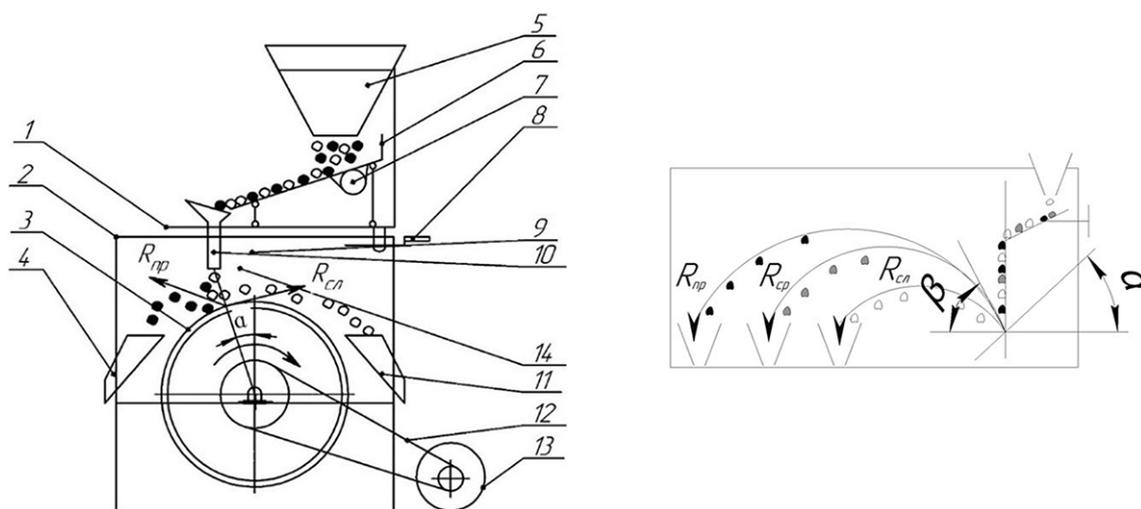


Рисунок 1 – Классификация методов обогащения нерудных материалов



1 – подвижная станина питателя, 2 – станина барабанного классификатора, 3 – разделительный барабан, 4 – лоток для обогащения материала, 5 – бункер, 6 – лоток питателя, 7 – вибратор, 8 – рукоятка для подвижки питателя, 9 – шкала углов настройки, 10 – подвижная направляющая воронка, 11 – лоток для отходов обогащения, 12 – привод барабана, 13 – электродвигатель, 14 – отражательный экран

Рисунок 2 – Устройство лабораторных механических классификаторов: барабанного (а) и плитного (б)

меньшее. Соответственно, зерна средней прочности (показаны на рисунке 3 серым цветом), отскакивают на среднее расстояние. Регулировку плитного классификатора производят, варьируя угол α .

Общим недостатком механических классификаторов является зависимость эффективности обогащения от формы зерен. В случае наличия в обогащаемой пробе зерен разной формы (например, округлых, кубовидных, лещадных или бесформенных, многоугольных, составляющих, как правило, большую часть пробы) дальность и направление отскока от разделительного барабана или плиты определяется в большей степени не прочностными характеристиками материала, а формой поверхности зерна щебня, которой оно соударяется с рабочей поверхностью обогатительного оборудования.

Разделение по фрикционным характеристикам проще всего осуществляется во фрикционном полочном сепараторе (рисунок 3) [6].

Фрикционный сепаратор состоит из наклонной полки 1, заканчивающейся в нижней части трамплином 2, выполненном по дуге с посто-

янным радиусом. Под трамплином устанавливаются приемные емкости 3, в которые падают зерна материала, разделенные по фрикционным характеристикам. Зерна, обладающие высоким коэффициентом трения, скатываясь по наклонной полке, сильно снижают скорость на криволинейном трамплине и после выхода с него падают в ближнюю приемную емкость. Зерна, обладающие низким коэффициентом трения, выходят с трамплина с более высокой скоростью и, соответственно, падают в дальнюю приемную емкость.

Недостатком фрикционного сепаратора является его невысокая производительность. В случае одновременного скольжения по наклонной полке нескольких зерен обогащаемого материала будет происходить их соударение друг о друга, что неизбежно повлияет на точность разделения. Данная проблема может быть решена, например, путем увеличения ширины наклонной полки для одновременного обогащения зерен без риска их соударения.

Применение фрикционного сепаратора для обогащения шлакового щебня может быть целесообразно в случае наличия корреляционной связи между прочностью зерен и коэффициентом трения поверхности зерен. Визуальная оценка зерен щебня позволяет выдвинуть гипотезу о наличии такой связи, т.к. более прочные зерна, как правило, обладают более гладкой поверхностью, без внешних пор. В свою очередь, менее прочные зерна обычно являются более пористыми и, из-за наличия большого количества внешних пор, имеют неровную поверхность. Исходя из этого, коэффициент трения поверхности более прочных зерен шлакового щебня должен быть ниже, чем у более хрупких. Однако для подтверждения данной гипотезы и оценки корреляционной взаи-

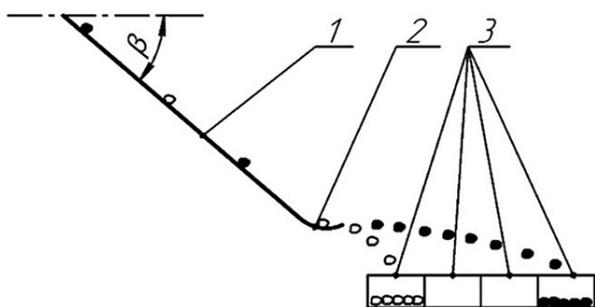


Рисунок 3 – Схема фрикционного сепаратора

мосвязи прочности, пористости и фрикционных характеристик шлакового щебня необходимы дополнительные эксперименты, которые запланированы к выполнению авторами данной статьи.

Метод обогащения в тяжелых средах состоит в следующем. Если смесь зерен материала различной плотности (например, щебня) погрузить в жидкость со средней плотностью между легкими и тяжелыми зернами, то зерна, обладающие более высокой плотностью, будут тонуть в этой жидкости, а легкие всплывут на поверхность. Для реализации процесса используют тяжелые суспензии (механические взвеси тонкодисперсного порошка (утяжелителя) гранулированного ферросилиция и/или магнетита в водной среде) [7].

Отсадка представляет собой один из гравитационных методов обогащения, основанный на расслаивании зерен обогащаемого материала в попеременных восходящем и нисходящем потоках воды [8].

При обогащении методом избирательного разрушения щебень загружается в дробилку, в которой в ходе дробления более хрупкие (соответственно, менее плотные) зерна разрушаются, а более прочные (соответственно, более плотные) сохраняют свою целостность. В результате такой обработки происходит отделение более прочных зерен щебня от менее прочных.

Научные результаты. Несмотря на существование ряда способов обогащения каменных материалов по прочности зерен, на сегодня в мире не проводились исследования по использованию перечисленных технологий для повышения физико-механических характеристик щебня на основе отходов доменного и других производств. Перечисленные технологии сортировки материалов по плотности использовались в основном на горнообогатительных комбинатах (обогащение угля тяжелосредней сепарацией и избирательным

дроблением), а также для обогащения природного щебня.

Для выбора оптимальной технологии и оборудования для обогащения шлакового щебня по прочности построен алгоритм, показанный на рисунке 4.

На первом этапе реализации данного алгоритма осуществлялось сравнение существующих методов обогащения (обогащение на наклонной плите, на барабанном классификаторе и т.д.) нерудных строительных материалов (показаны в верхней части рисунка желтым цветом) по критерию минимальной себестоимости C технологического процесса обогащения:

$$C \rightarrow \min. \quad (2)$$

По результатам предварительных исследований установлено, что наибольшей себестоимостью отличаются такие технологические процессы, как гидравлическая отсадка и обогащение в тяжелых суспензиях (показаны на блок-схеме алгоритма красным цветом). Высокая стоимость их реализации обусловлена необходимостью использования дорогостоящих дополнительных материалов (ферросилиций, магнетит).

Исходя из этого, дальнейший выбор осуществлялся из методов обогащения, не требующих применения дополнительных материалов, таких как обогащение на наклонной плите, барабанном классификаторе, фрикционном сепараторе и избирательное разрушение (выделены на блок-схеме алгоритма зеленым цветом). Эти методы сравнивались по критерию максимальной эффективности обогащения \mathcal{E} , которая определялась как отношение плотности пробы щебня после процедуры обогащения ρ_2 к плотности пробы щебня до нее ρ_1 :

$$\mathcal{E} = \rho_2 / \rho_1 \rightarrow \max. \quad (3)$$

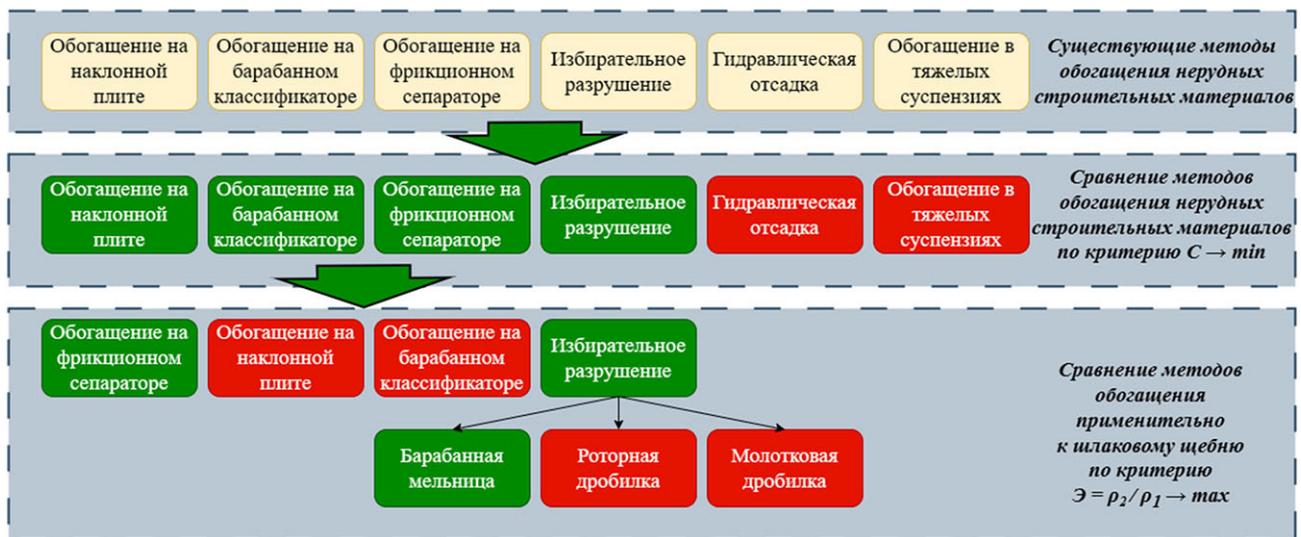


Рисунок 4 – Алгоритм сравнения технологий и оборудования для обогащения шлакового щебня по прочности зерен по критериям оптимальности

Предварительные поисковые эксперименты подтвердили перечисленные ранее недостатки методов обогащения на наклонной плите и барабанном классификаторе (выделены на блок-схеме красным цветом) и позволили установить, что самыми перспективными в плане максимальной эффективности обогащения являются такие методы, как обогащение на фрикционном сепараторе и избирательное разрушение.

Избирательное разрушение целесообразно производить в дробильном оборудовании ударного действия, например, в барабанных мельницах, роторных или молотковых дробилках. В большей степени требованиям, предъявляемым к процессу избирательного разрушения, удовлетворяет барабанная мельница (выделена на блок-схеме зеленым цветом). В отличие от роторных и молотковых дробилок, она позволяет гибко варьировать параметры обогащения (за счет изменения заполняемости рабочей камеры, размеров, типа мелющих тел и т.д.).

Выводы

1. Сортировка шлакового щебня по прочности зерен может осуществляться такими методами, как обогащение на барабанном/плитном классификаторе, фрикционном сепараторе, в тяжелых средах, гидравлическая отсадка, избирательное разрушение.

2. Наиболее полно удовлетворяют предлагаемым критериям оптимальности (минимальная себестоимость технологического процесса и максимальная эффективность), такие методы из перечисленных, как обогащение на фрикционном сепараторе и избирательное разрушение (дробление) в барабанной мельнице.

3. Дальнейшие исследования в направлении обогащения шлакового щебня направлены на определение морфологического множества вариантов реализации выбранных технологических процессов (обогащение на фрикционном сепараторе и избирательное разрушение), и последующую экспериментальную оценку их эффективности.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадыров А.С., Кунаев В.А. Перспективные методы повышения физико-механических характеристик доменного шлака для дорожного строительства // Труды университета. – 2016. – № 4 (65). – С. 54-58.
2. Кадыров А.С., Кунаев В.А., Георгиади И.В. Отходы черной металлургии и отработанные технические жидкости для получения материала дорожных оснований // Экология и промышленность России. – 2017. – Т. 21. – № 12. – С. 44-48.
3. Кадыров А.С., Абуов Е.З., Кунаев В.А., Бакытов Е.С. Анализ способов применения твердых промышленных отходов при производстве строительных материалов // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2018. – № 1 (104). – С. 23-30.
4. Кунаев В.А., Тимухина Е.Н., Георгиади И.В. Определение параметров и разработка конструкции сливного резервуара установки для гидрофобизации шлакового щебня с погружным нагревателем // Труды университета. – 2021. – № 3 (84). – С. 172-177.
5. Матросов А.А. Технология обогащения щебня из карбонатных пород по прочности на барабанном механическом классификаторе для строительства автомобильных дорог: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11. – М.: Гос. дорожный науч.-исслед. ин-т, 2002. – 23 с.
6. Анохин П.М., Афанасьев А.И., Казаков Ю.М., Потапов В.Я. Рабочий процесс полочного фрикционного сепаратора с криволинейным трамплином переменной кривизны // Известия УГГУ. – 2016. – 2 (42). – С. 70-72.
7. Kang H., Kee S. Improving the quality of mixed recycled coarse aggregates from construction and demolition waste using heavy media separation with Fe₃O₄ suspension // Advances in Materials Science and Engineering. – 2017. – 201. – 875365.
8. Gawenda T., Saramak D., Stempkowska A., Naziemiec Z. Assessment of selected characteristics of enrichment products for regular and irregular aggregates beneficiation in pulsating jig // Minerals. – 2021. – 11(7). – 777.

Көлік инфрақұрылымы объектілерін салу үшін өнеркәсіптік қалдықтардан қиыршық тасты байыту жабдықтары мен технологияларын талдау

¹*КУНАЕВ Вячеслав Александрович, PhD, постдокторант, аға ғылыми қызметкер, kunaev91@list.ru,

¹ТАВШАНОВ Ильгар Сулейменович, магистрант, ilgartavshanov@gmail.com,

²ЧЕТЫН Айдын, PhD, профессор, acetin@gazi.edu.tr,

¹«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Теміртау, Республика даңғылы, 30,

²Гази университеті, Түркия, Анкара, Сафет кварталы, Бандырма көшесі, 6/1,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Зерттеудің мақсаты домендік қож негізінде қиыршық тасты байытудың технологиялық процесін механикаландырудың ең перспективалы нұсқаларын таңдау. Мақсатқа жету үшін әдеби шолу, экономика-

лық-математикалық модельдеу, оңтайландыру теориясы және іздеу эксперименті сияқты жалпы ғылыми әдістер қолданылды. Мақалада дәндердің беріктігі бойынша кенді емес құрылыс материалдарын байыту міндеттерін шешу үшін қолданылатын негізгі технологиялар мен жабдықтар қарастырылған. Байытудың технологиялық процестерін салыстыруға мүмкіндік беретін оңтайлылық критерийлері ұсынылған. Алдын ала іздеу эксперименттері мен алынған морфологиялық жиынтықты талдау нәтижелері негізінде домна шлактары негізінде қиыршық тасты байытудың ең перспективалы нұсқалары анықталды.

Кілт сөздер: кенді емес құрылыс материалдарын байыту, беріктігі, қожды қиыршық тас, жол құрылысы, оңтайлылық критерийлері.

Analysis of the Equipment and Technologies for the Enrichment of Crushed Stone From Industrial Waste for the Construction of Transport Infrastructure Facilities

¹*KUNAEV Vyacheslav, PhD, Postdoctoral Researcher, Senior Researcher, kunaev91@list.ru,

¹TAVSHANOV Ilgar, Master Student, ilgartavshanov@gmail.com,

²ÇETIN Aydin, PhD, Professor, acetin@gazi.edu.tr,

¹NCJSC «Karaganda Industrial University», Kazakhstan, Temirtau, Republic Avenue, 30,

²Gazi University, Turkey, Ankara, Safet Square, Bandyрма Street, 6/1,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of the study is to select the most promising options for mechanization of the technological process of enrichment of the crushed stone based on the blast furnace slag. To achieve this purpose, the authors used such general scientific methods as literary review, economic and mathematical modeling, optimization theory and search experiment. The main technologies and equipment used to solve the problems of the enrichment of the stone building materials by grain strength are considered. The article proposes optimality criteria that allow comparing the technological processes of enrichment. The authors proposed the optimality criteria that allow comparing the technological processes of enrichment. Based on preliminary search experiments and the results of the analysis of the obtained morphological set, the most promising options for the enrichment of crushed stone based on blast furnace slag are determined.

Keywords: enrichment of stone building materials, strength, slag crushed stone, road construction, optimality criteria.

REFERENCES

1. Kadyrov A.S., Kunaev B.A. Perspektivnye metody povysheniya fiziko-mekhanicheskikh karakteristik domennogo shlaka dlya dorozhnogo stroitel'stva // Trudy universiteta. – 2016. – No. 4 (65). – Pp. 54-58.
2. Kadyrov A.S., Kunaev V.A., Georgiadi I.V. Othody chernoj metallurgii i otrabotannye tekhnicheskie zhidkosti dlya polucheniya materiala dorozhnyh osnovanij // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. – 2017. – T. 21. – No. 12. – Pp. 44-48.
3. Kadyrov A.S., Abuov E.Z., Kunaev V.A., Bakytov E.S. Analiz sposobov primeneniya tverdyh promyshlennyh othodov pri proizvodstve stroitel'nyh materialov // Vestnik Kazahskoj akademii transporta i kommunikacij im. M. Tynyshpaeva. – 2018. – No. 1 (104). – Pp. 23-30.
4. Kunaev V.A., Timuhina E.N., Georgiadi I.V. Opredelenie parametrov i razrabotka konstrukcii slivnogo rezervuara ustanovki dlya gidrofobizatsii shlakovogo shchebnaya s pogruzhnyim nagrevatelem // Trudy universiteta. – 2021. – No. 3 (84). – Pp. 172-177.
5. Matrosov A.A. Tekhnologiya obogashcheniya shchebnaya iz karbonatnyh porod po prochnosti na barabannom mekhanicheskom klassifikatore dlya stroitel'stva avtomobil'nyh dorog: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.11. – Moscow: Gos. dorozhnyj nauch.-issled. in-t, 2002. – 23 p.
6. Anohin P.M., Afanas'ev A.I., Kazakov YU.M., Potapov V.YA. Rabochij process polochnogo frikcionnogo separatora s krivolinejnym trاملinom peremennoj krivizny // Izvestiya UGGU. – 2016. – 2 (42). – Pp. 70-72.
7. Kang H., Kee S. Improving the quality of mixed recycled coarse aggregates from construction and demolition waste using heavy media separation with Fe₃O₄ suspension // Advances in Materials Science and Engineering. – 2017. – 201. – 875365.
8. Gawenda T., Saramak D., Stempkowska A., Naziemiec Z. Assessment of selected characteristics of enrichment products for regular and irregular aggregates beneficiation in pulsating jig // Minerals. – 2021. – 11(7). – 777.