

Применение фрикционного сепаратора для повышения прочности и снижения водопоглощения дорожно-строительного шлакового щебня

¹**КУНАЕВ Вячеслав Александрович**, PhD, постдокторант, доцент, kunaev91@list.ru,

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

²**ТИМУХИНА Елена Николаевна**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой, ETimuhina@usurt.ru,

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

²Уральский государственный университет путей сообщения, Россия, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Цель исследования – оценка влияния параметров рабочего процесса лабораторного фрикционного сепаратора на физико-механические характеристики обогащаемого материала (шлакового щебня). Для достижения цели использованы методы лабораторного эксперимента (обогащение на фрикционном сепараторе), физико-механических испытаний дорожно-строительных материалов, математическая обработка экспериментальных данных. Рассмотрена конструкция фрикционного сепаратора для обогащения шлакового щебня, описан принцип его работы. Представлены результаты эксперимента по оценке влияния обогащения шлакового щебня на фрикционном сепараторе на его прочность и водопоглощение. Установлены зависимости, взаимосвязывающие физико-механические характеристики шлакового щебня и параметры работы фрикционного сепаратора. Получена количественная оценка снижения водопоглощения и повышения прочности дорожно-строительного шлакового щебня после обогащения на фрикционном сепараторе.

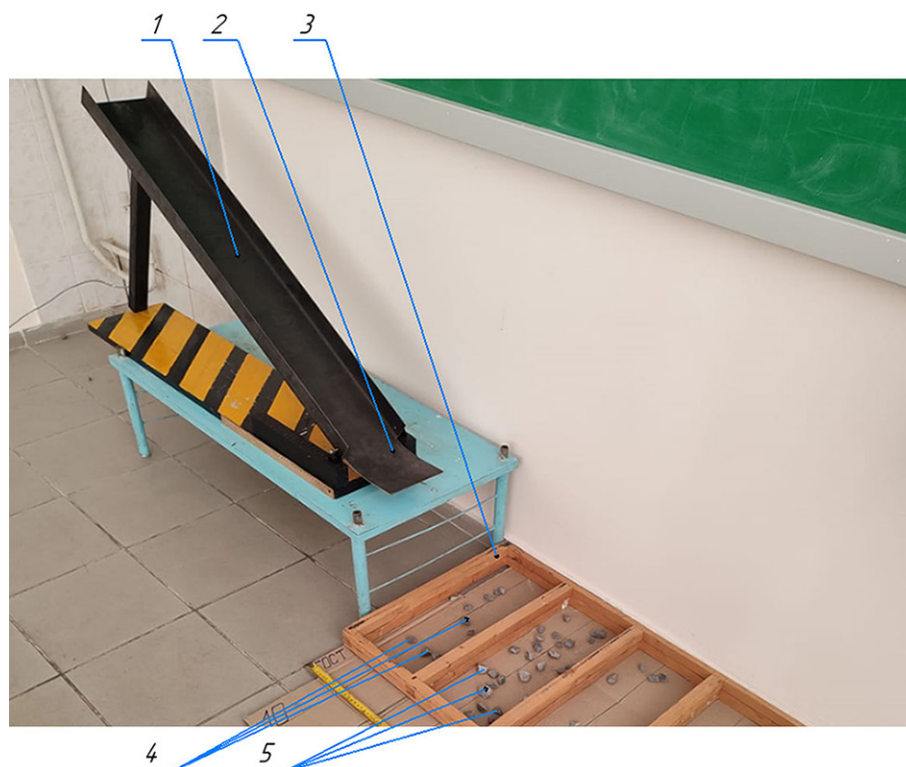
Ключевые слова: фрикционный сепаратор, обогащение, прочность, водопоглощение, шлаковый щебень, дорожное строительство, доменный шлак.

Введение. Качество и долговечность автомобильных дорог напрямую зависят от физико-механических характеристик материалов, из которых они построены. В регионах с развитым металлургическим производством для экономии природного сырья в качестве материала дорожных оснований вместо каменного щебня может использоваться шлаковый щебень, изготовленный из доменного шлака либо других твердых металлургических отходов. В силу разнородного состава шлакового щебня из доменного шлака (от 2 до 20 МПа для разных зерен) и разного водопоглощения (от 1 до 40%), использование данного материала в дорожном строительстве возможно только после отбраковки некачественных зерен, имеющих низкий предел прочности и высокое водопоглощение [1-3]. Как правило, такие зерна шлакового щебня отличаются более высокой пористостью, которая и обуславливает их низкие физико-механические характеристики. Для отбраковки таких зерен может применяться предварительное обогащение шлакового щебня (так-

же могут использоваться термины «сортировка», «разделение», «классификация») по прочности (т.е. отделение более прочных зерен щебня для их дальнейшего применения в дорожном строительстве от менее прочных). Это позволит получать прочный и водостойкий материал для дорожного строительства из металлургических отходов, не прибегая к дорогостоящей добыче и транспортировке природного щебня, что свидетельствует об актуальности темы исследования.

Существует различное оборудование для обогащения каменных материалов по прочности зерен [4-5]. Одним из наиболее энергоэффективных средств механизации данного процесса является фрикционный сепаратор [5-7].

Фрикционный сепаратор (рисунок 1) включает в себя наклонную полку с регулируемым углом наклона, которая заканчивается в своей нижней части криволинейным трамплином. Под криволинейным трамплином размещаются приемные емкости, в которые падают зерна материала, разделенные по фрикционным характеристикам.



1 – наклонная полка; 2 – криволинейный трамплин; 3 – приемные емкости;
4 – высокопористые зерна шлакового щебня; 5 – малопористые зерна шлакового щебня

Рисунок 1 – Лабораторный фрикционный сепаратор

Высокопористые зерна (которые имеют более высокое водопоглощение и низкий предел прочности), обладающие более шероховатой поверхностью и, соответственно, высоким коэффициентом трения, скатываясь по наклонной полке, сильно снижают скорость на криволинейном трамплине и после выхода с него падают в ближнюю приемную емкость. Малопористые зерна шлакового щебня с более низким водопоглощением и высоким пределом прочности имеют более гладкую поверхность и, соответственно, более низкий коэффициент трения. За счет этого такие зерна выходят с криволинейного трамплина с более высокой скоростью и, соответственно, падают в дальнюю приемную емкость [5-7].

Цель исследования заключается в оценке влияния параметров рабочего процесса лабораторного фрикционного сепаратора на физико-механические характеристики обогащаемого материала (шлакового щебня).

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- изготовление лабораторной конструкции фрикционного сепаратора;
- подготовка пробы шлакового щебня и предварительное испытание зерен пробы на водопоглощение;
- обогащение шлакового щебня на лабораторном фрикционном сепараторе с выделением 75% обогащенных зерен;

- определение предела прочности зерен шлакового щебня;

- оценка влияния водопоглощения и предела прочности зерен шлакового щебня на дальность падения от края криволинейного сепаратора.

Научная новизна исследования заключается:

- в установленных математических зависимостях, взаимосвязывающих параметры рабочего процесса фрикционного сепаратора и характеристики обогащаемого материала;
- в полученном уравнении аппроксимации, позволяющем прогнозировать изменение дальности падения зерен шлакового щебня от края криволинейного сепаратора при дальнейшем увеличении прочности.

Методы исследования.

Для лабораторных исследований использовался метод обогащения шлакового щебня по прочности зерен на лабораторном фрикционном сепараторе, изготовленном в условиях НАО «КарИУ». В качестве аналога при изготовлении лабораторного фрикционного сепаратора использовалась конструкция, описанная в [5]. Для определения водопоглощения W_{abs} и предела прочности зерен шлакового щебня применялись общеизвестные методы испытаний, описанные в межгосударственных стандартах [8-9].

При проведении эксперимента каждое зерно экспериментальной пробы шлакового щебня с заранее установленным водопоглощением ска-

тывалось 3 раза по наклонной полке фрикционного сепаратора. После выхода с криволинейного трамплина зерна шлакового щебня падали по разной траектории: более прочные зерна падали на большем расстоянии от криволинейного трамплина, а менее прочные – на меньшем расстоянии. Дальность падения зерен измерялась с точностью до 1 см. По результатам 3-х измерений рассчитывались средние значения для каждого зерна, которые использовали для дальнейших расчетов и графических построений. Для каждого испытуемого зерна шлакового щебня определялся предел прочности на механическом индикаторе прочности камня [9].

Научные результаты. По известным значениям водопоглощения W_{abs} каждого зерна шлакового щебня и средней дальности падения от края криволинейного трамплина фрикционного сепаратора L_{cp} построена графическая зависимость (рисунок 2):

$$L_{cp} = f(W_{abs}).$$

Данная зависимость аппроксимируется экспоненциальной линией тренда, описываемой следующим уравнением, имеющим коэффициент достоверности выше среднего $R^2 = 0,6136$:

$$L_{cp} = 23,853 e^{-0,032 W_{abs}}.$$

Оценку снижения водопоглощения по итогам обогащения на фрикционном сепараторе можно провести, задав необходимый процент обогащенных зерен или граничное значение дальности падения щебня от края криволинейного трамплина, при котором (и выше) зерна щебня относятся к обогащенным. В качестве примера, к обогащенным были отнесены 75% зерен шлакового щебня с наибольшей дальностью падения от края кри-

волинейного трамплина. Среднее водопоглощение этой выделенной (обогащенной) части зерен составило 3,64%. В свою очередь, среднее водопоглощение всех 100% испытываемых зерен (т.е. до обогащения) составляет 4,45%. Таким образом, обогащение шлакового щебня на фрикционном сепараторе с выделением 75% лучших зерен позволило снизить водопоглощение на 0,81%, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности данного метода обогащения.

Результаты испытаний щебня на прочность зерен показаны в виде распределения величин предела прочности по 100 испытанным образцам на графике, который приведен на рисунке 3.

На рисунке 4 показана зависимость среднего значения предела прочности зерен шлакового щебня (в МПа) от их дальности падения от края криволинейного трамплина фрикционного сепаратора (в см). Из графика наглядно видно, что дальность падения от края криволинейного трамплина фрикционного сепаратора растет пропорциональному пределу прочности зерен. То есть, чем выше прочность шлакового щебня, тем на большем расстоянии от края криволинейного трамплина оно падает.

Например, зерна щебня с низким пределом прочности (от 1,8 до 5 МПа) падают на расстоянии 5-17 см от края криволинейного трамплина (на графике показаны красным квадратом), а зерна с высоким пределом прочности (от 8 до 12 МПа) – на расстоянии 23-30 см (на графике показаны зеленым квадратом).

Примечание: высота расположения края криволинейного сепаратора от горизонтальной плоскости, на которую падали зерна щебня, в ходе эксперимента составляла 20 см. При изменении высоты установки сепаратора значения дальности

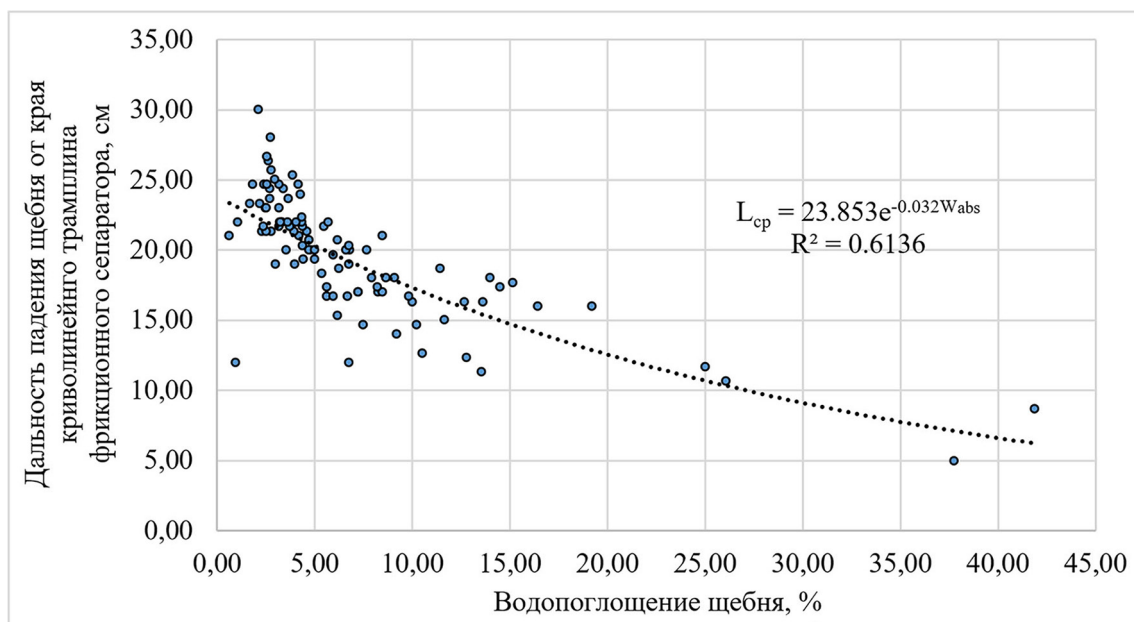


Рисунок 2 – Зависимость $L_{cp} = f(W_{abs})$ с экспоненциальной линией тренда

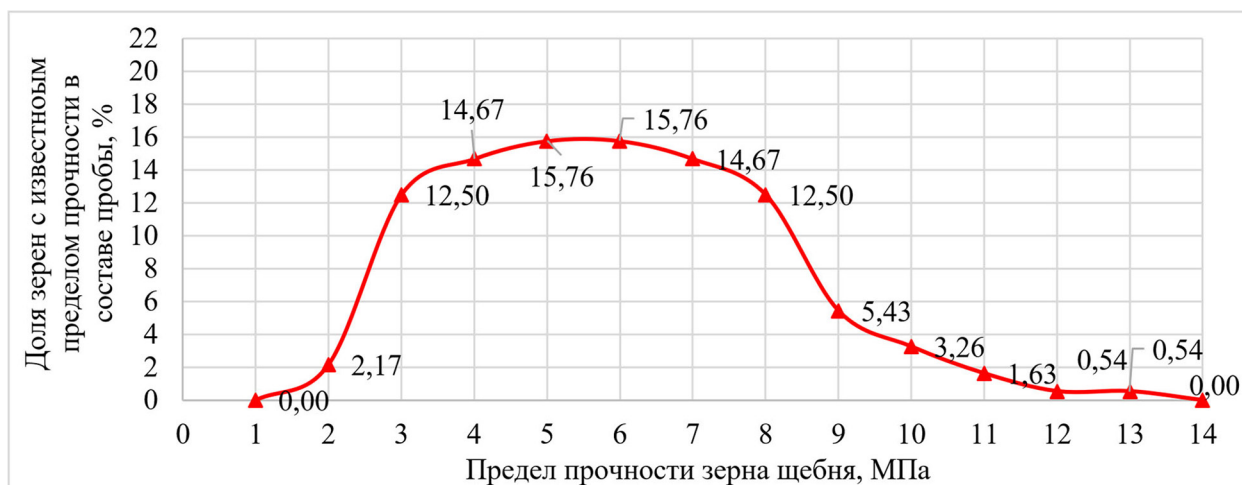


Рисунок 3 – Распределение величин предела прочности образцов шлакового щебня



Рисунок 4 – Зависимость дальности падения зерен шлакового щебня от края криволинейного трамплина фрикционного сепаратора от среднего значения их предела прочности

падения будут другими, но, как показали предварительные поисковые эксперименты, прямо пропорциональная зависимость предела прочности и дальности падения при этом сохраняется.

Ввиду ограниченного количества испытанных зерен шлакового щебня, для моделирования изменения их дальности падения при более высокой прочности построены различные линии тренда (линейная, экспоненциальная, полиномиальная, степенная, логарифмическая), для каждой из которых получены уравнения аппроксимации и определены коэффициенты их достоверности. Данные линии тренда позволяют прогнозировать изменение дальности падения зерен шлакового щебня при увеличении их прочности до 20 МПа. Предел в 20 МПа был выбран ввиду ограниченной реальной прочности зерен щебня из доменного шлака. В наибольшей степени близка к описанию

реального технологического процесса обогащения шлакового щебня на фрикционном сепараторе полученная логарифмическая тренда (рисунок 5), имеющая достаточно высокий коэффициент достоверности $R^2 = 0,8322$ и описываемая следующим уравнением аппроксимации:

$$L_{\text{ср}} = 11,753 \ln(\sigma) - 1,537,$$

где $L_{\text{ср}}$ – средняя дальность падения зерен шлакового щебня от края криволинейного трамплина фрикционного сепаратора, см;
 σ – предел прочности зерен шлакового щебня, МПа.

Приведем пример прогнозирования изменения дальности падения зерен шлакового щебня от края криволинейного трамплина фрикционного сепаратора от среднего при увеличении предела прочности зерна до 20 МПа. В данном случае

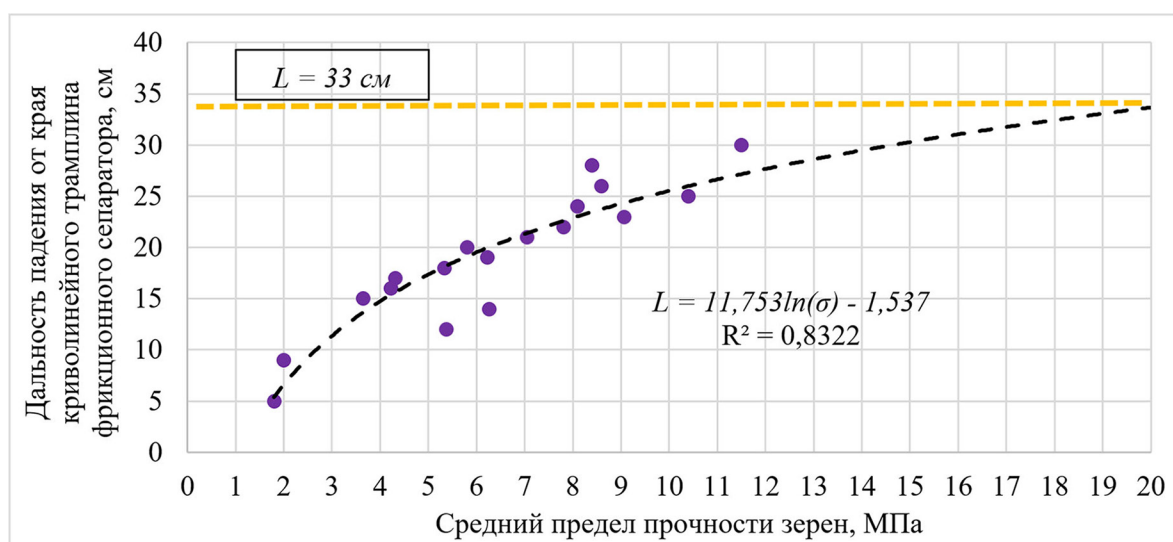


Рисунок 5 – Зависимость дальности падения зерен шлакового щебня от края криволинейного трамплина фрикционного сепаратора от их предела прочности

дальность падения от края криволинейного сепаратора, прогнозируемая с точностью $R^2 = 83,22\%$, составит (как видно по рисунку 5) $L = 33$ см.

Оценка повышения прочности шлакового щебня по итогам обогащения на фрикционном сепараторе была проведена аналогично оценке снижения водопоглощения. Среднее значение предела прочности 75% обогащенных зерен составило 6,87 МПа, тогда как до обогащения среднее значение всех 100% испытываемых зерен составляло 6,24 МПа. Таким образом, обогащение пробы щебня на фрикционном сепараторе с выделением 75% лучших зерен позволило повысить средний предел прочности зерен на 0,63 МПа (или 10%).

Выводы

1) Эффективность обогащения шлакового щебня на фрикционном сепараторе достигается за счет отличающегося коэффициента трения высокопористых зерен с более шероховатой поверх-

ностью и малопористых зерен с более гладкой поверхностью.

2) Выделение 75% наиболее качественных зерен путем обогащения пробы на фрикционном сепараторе позволяет снизить среднее водопоглощение с 4,45% до 3,64% и повысить средний предел прочности зерен с 6,24 МПа до 6,87 МПа.

3) Добиться более значительного снижения водопоглощения и повышения прочности щебня по результатам обогащения на фрикционном сепараторе можно, выделяя меньшую по объему долю (порядка 30-40% по результатам предварительных поисковых экспериментов) материала от общей массы обогащаемой пробы.

Сведения о финансировании

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- 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.
- 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.
- Матросов А.А. Технология обогащения щебня из карбонатных пород по прочности на барабанном механическом классификаторе для строительства автомобильных дорог: Автореф. дис. ... кандидата технических наук: 05.23.11. М.: Гос. дорожный науч.-исслед. ин-т, 2002. – 23 с.
- 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.
- 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.
- Kunaev V., Bazarov B., Tavshanov I., 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.

8. ГОСТ 33057-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение средней и истинной плотности, пористости и водопоглощения. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.
9. ГОСТ 33054-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение содержания зерен слабых пород в щебне (гравии). М.: Стандартинформ, 2016. 11 с.

Жол-құрылыс қож қиыршық тасының беріктігін арттыру және суды сіңіруді азайту үшін үйкеліс сепараторын қолдану

¹*КУНАЕВ Вячеслав Александрович, PhD, постдокторант, доцент, kunaev91@list.ru,

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

²ТИМУХИНА Елена Николаевна, т.ғ.д., профессор, кафедра меңгерушісі, ETimuhina@usurt.ru,

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

²Орал мемлекеттік жолдар хабарламалар университеті, Ресей, Екатеринбург, Колмогоров көшесі, 66,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Зерттеудің мақсаты-зертханалық үйкеліс сепараторының жұмыс процесі параметрлерінің байытылған материалдың (қож қиыршық тас) физикалық-механикалық сипаттамаларына әсерін бағалау. Мақсатқа жету үшін зертханалық эксперимент (үйкеліс сепараторында байыту), жол-құрылыс материалдарын физикалық-механикалық сынау, эксперименттік деректерді математикалық өңдеу әдістері қолданылды. Қожды қиыршық тасты байытуға арналған үйкеліс сепараторының дизайны қарастырылған, оның жұмыс принципі сипатталған. Үйкеліс сепараторындағы қожды қиыршық тасты байытудың оның беріктігі мен суды сіңіруіне әсерін бағалау бойынша эксперимент нәтижелері ұсынылған. Қожды қиыршық тастың физика-механикалық сипаттамаларын және үйкеліс сепараторының жұмыс параметрлерін өзара байланыстыратын тәуелділіктер анықталды. Үйкеліс сепараторында байытылғаннан кейін су сіңірудің төмендеуін және жол-құрылыс қож қиыршық тастарының беріктігін арттыруды сандық бағалау алынды.

Кілт сөздер: үйкеліс сепараторы, байыту, беріктік, суды сіңіру, қож қиыршық тас, жол құрылысы, домна пешінің қожы.

The Use of a Friction Separator to Increase the Strength and Reduce Water Absorption of the Road-construction Slag Aggregate

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

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

²TIMOKHINA Elena, Dr. of Tech. Sci., Professor, Head of Department, ETimuhina@usurt.ru,

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

²Ural State University of Railway Transport, Russia, Yekaterinburg, Kolmogorov Street, 66,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of the study is to assess the influence of the parameters of the working process of a laboratory friction separator on the physical and mechanical characteristics of the enriched material (slag aggregate). To achieve the purpose, the methods of laboratory experiment (enrichment on a friction separator), physical-mechanical tests of road-building materials, mathematical processing of experimental data were used. The design of a friction separator for the enrichment of the slag aggregate is considered, the principle of its operation is described. The results of an experiment to assess the effect of the enrichment of the slag aggregate on a friction separator on its strength and water absorption are presented. The authors also established the dependencies interrelating the physical-mechanical characteristics of the slag aggregate and the parameters of the friction separator operation. A quantitative assessment of reducing water absorption and increasing the strength of road-construction slag aggregate after enrichment on a friction separator was obtained.

Keywords: friction separator, enrichment, strength, water absorption, slag aggregate, road construction, blast furnace slag.

REFERENCES

1. Kadyrov A.S., Kunaev B.A. Perspektivnye metody povysheniya fiziko-mekhanicheskikh harakteristik domennogo shlaka dlja 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 tehicheskie zhidkosti dlja poluchenija materiala dorozhnyh osnovanij // Jekologija 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 primenenija 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. Matrosov A.A. Tehnologija obogashhenija shhebnja iz karbonatnyh porod po prochnosti na barabannom mehanicheskom klassifikatore dlja stroitel'stva avtomobil'nyh dorog: Avtoref. dis. ... kandidata tehicheskikh nauk: 05.23.11. Moscow: Gos. dorozhnyj nauch.-issled. in-t, 2002. – 23 p.
5. Anohin P.M., Afanas'ev A.I., Kazakov Ju.M., Potapov V.Ja. Rabochij process polochnogo frikcionnogo separatora s krivolinejnym tramplinom peremennoj krivizny // Izvestija UGGU. – 2016. – 2 (42). – Pp. 70-72.
6. Kunaev V.A., Tavshanov I.S., Chetyn A. Analiz oborudovaniya i tehnologij obogashhenija shhebnja iz promyshlennyh othodov dlja stroitel'stva ob#ektov transportnoj infrastruktury // Trudy universiteta. – 2023. – No. 2 (91). – Pp. 206-211.
7. Kunaev V., Bazarov B., Tavshanov I., 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.
8. GOST 33057-2014. Dorogi avtomobil'nye obshhego pol'zovanija. Shheben' i gravij iz gornyh porod. Opredelenie srednej i istinnoj plotnosti, poristosti i vodopogloshhenija. Moscow: Standartinform, 2016. 12 p.
9. GOST 33054-2014. Dorogi avtomobil'nye obshhego pol'zovanija. Shheben' i gravij iz gornyh porod. Opredelenie soderzhaniya zeren slabyh porod v shhebne (gravii). Moscow: Standartinform, 2016. 11 p.