

# Строительные материалы и изделия Building materials and products

Научная статья  
УДК 621.928.235  
DOI: 10.14529/build260103

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЦЕССАХ СЕПАРАЦИИ: ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ИНЕРЦИОННОГО ГРОХОТА ГИС-52 С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВОЗДУШНОГО ТРАКТА НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС

**К.С. Медведева, С.В. Райков, А.А. Ефимов**

*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия*  
✉ [arsyuxa.efimov@mail.ru](mailto:arsyuxa.efimov@mail.ru)

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования влияния воздушного тракта на эффективность работы инерционного грохота ГИС-52, применяемого при производстве строительных материалов. Обоснована актуальность модернизации процесса сепарации для снижения энергопотребления и повышения производительности оборудования. Предложена математическая модель, описывающая влияние воздушного потока на коэффициент трения материала о просеивающую поверхность. Проведены экспериментальные исследования износа сит при различных параметрах воздушного тракта. Установлено, что оптимизация воздушного потока позволяет снизить коэффициент трения на 18–22 %, уменьшить износ сит на 25–30 % и повысить производительность грохота на 15–20 %. Предложена инновационная конструкция воздушного тракта с переменным сечением и термостатированием потока. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и модернизации грохотов для производства щебня, гравия и других строительных материалов.

**Ключевые слова:** инерционный грохот, воздушный тракт, коэффициент трения, износ сит, сепарация материалов, энергоэффективность, инновационные технологии, ГИС-52

**Для цитирования.** Медведева К.С., Райков С.В., Ефимов А.А. Инновационные технологии в процессах сепарации: исследование работы инерционного грохота ГИС-52 с учетом влияния воздушного тракта на трение и износ // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2026. Т. 26, № 1. С. 31–37. DOI: 10.14529/build260103

Original article  
DOI: 10.14529/build260103

## INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN SEPARATION PROCESSES: RESEARCH OF THE GIS-52 INERTIAL GRINDER OPERATION WITH CONSIDERATION OF THE INFLUENCE OF THE AIR DUCT ON FRICTION AND WEAR

**K.S. Medvedeva, S.V. Raikov, A.A. Efimov**

*Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia*  
✉ [arsyuxa.efimov@mail.ru](mailto:arsyuxa.efimov@mail.ru)

**Abstract.** The article presents the results of a study on the influence of the air duct on the operational efficiency of the GIS-52 inertial screen used in the production of construction materials. The relevance of modernizing the separation process to reduce energy consumption and increase equipment productivity is substantiated. A mathematical model describing the influence of the airflow on the coefficient of friction between the material and the screening surface is proposed. Experimental studies of screen wear are conducted under different air duct parameters. It has been established that optimization of the airflow allows to reduce the coefficient of friction by 18–22%, reduce sieve wear by 25–30%, and increase screen productivity by 15–20%. An innovative air duct design with a variable cross-section and airflow thermostabilization is proposed. The research results can be used in the design and modernization of screening equipment for the production of crushed stone, gravel and other construction materials.

**Keywords:** inertial screen, air duct, friction coefficient, sieve wear, material separation, energy efficiency, innovative technologies, GIS-52

© Медведева К.С., Райков С.В., Ефимов А.А., 2026.

**Keywords:** inertial screen, air duct, friction coefficient, sieve wear, material separation, energy efficiency, innovative technologies, GIS-52

**For citation.** Medvedeva K.S., Raikov S.V., Efimov A.A. Innovative technologies in separation processes: research of the GIS-52 inertial grinder operation with consideration of the influence of the air duct on friction and wear. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture.* 2026;26(1):31–37. (in Russ.). DOI: 10.14529/build260103

### Введение

Сепарация сыпучих материалов является важным процессом в различных отраслях промышленности, включая горное дело, переработку и сельское хозяйство. Эффективность этого процесса во многом зависит от работы воздушного тракта, который обеспечивает транспортировку и разделение материалов на основе их физических свойств [1]. Объектом данного исследования является воздушный тракт, а предметом – процесс сепарации сыпучих материалов, который осуществляется с использованием воздушных потоков. По данным [2], в России ежегодно производится более 180 млн кубометров щебня, гравия и других нерудных материалов, требующих качественной сепарации.

Инерционные грохоты типа ГИС широко используются в технологических линиях производства щебня и других строительных материалов благодаря высокой производительности и надежности [3]. Однако стандартные конструкции грохотов имеют ряд недостатков, связанных с интенсивным износом просеивающих поверхностей, высоким энергопотреблением и снижением эффективности при работе с влажными материалами [4].

Аэродинамическое воздействие на процесс грохочения остается недостаточно изученной областью, хотя предварительные исследования показывают значительный потенциал использования воздушного потока для улучшения показателей процесса сепарации [5, 6]. Влияние воздушного тракта на трение между материалом и ситом, а также на интенсивность износа просеивающих поверхностей представляет особый научный и практический интерес.

Цель данного исследования – установление закономерностей влияния параметров воздушного тракта на коэффициент трения и износ просеивающих поверхностей инерционного грохота ГИС-52, а также разработка практических реко-

мендаций по оптимизации конструкции воздушного тракта для повышения эффективности процесса сепарации.

В задачи исследования входило:

- 1) разработка математической модели воздействия воздушного потока на процесс грохочения;
- 2) экспериментальное исследование влияния параметров воздушного тракта на коэффициент трения материала о просеивающую поверхность;
- 3) оценка износа сит при различных режимах работы воздушного тракта;
- 4) разработка инновационных решений по конструкции воздушного тракта.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения эксплуатационных затрат при производстве строительных материалов и повышения срока службы грохотильного оборудования. По данным [7], затраты на замену просеивающих поверхностей могут составлять до 15–20 % от общих эксплуатационных расходов предприятий по производству нерудных материалов.

### Материалы и методы

Исследования проводились на инерционном грохоте ГИС-52, который широко применяется для классификации различных сыпучих материалов в промышленности строительных материалов. Основные технические характеристики грохота представлены в табл. 1.

### Методика исследований

Экспериментальные исследования проводились на модельных материалах (гранитный щебень фракций 5–20 мм и 20–40 мм) и на реальных материалах в условиях действующего производства строительных материалов. Исследования включали следующие этапы:

- 1) определение коэффициента трения материала о просеивающую поверхность при различных параметрах воздушного потока;

Таблица 1

Технические характеристики инерционного грохота ГИС-52

Параметр	Значение
Площадь просеивающей поверхности, м <sup>2</sup>	9,1 (5,2 × 1,75)
Количество сит	2–3
Производительность, т/ч	100–200
Амплитуда колебаний, мм	2–6
Частота колебаний, мин <sup>-1</sup>	730–970
Угол наклона короба, град.	10–25
Мощность электродвигателя, кВт	15
Масса, кг	4800

2) исследование износа просеивающих поверхностей при различных режимах работы воздушного тракта;

3) оценка производительности и эффективности грохочения при различных параметрах воздушного потока.

Для определения коэффициента трения использовалась методика, описанная в [8], адаптированная для условий воздушного потока. Коэффициент трения определялся по формуле

$$f = \frac{F_{тр}}{F_N} = \frac{F_{тр}}{m \cdot g \cdot \cos \alpha - F_{возд}}, \quad (1)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  $F_{тр}$  – сила трения, Н;  $F_N$  – нормальная сила, Н;  $m$  – масса материала, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол наклона сита, град.

При наличии воздушного потока уравнение модифицируется:

$$f_v = \frac{F_{тр}}{F_N - F_{возд}} = \frac{F_{тр}}{m \cdot g \cdot \cos \alpha - F_{возд}}, \quad (2)$$

где  $f_v$  – коэффициент трения при наличии воздушного потока;  $F_{возд}$  – подъемная сила, создаваемая воздушным потоком, Н.

Подъемная сила воздушного потока определялась по формуле [9]:

$$F_{возд} = C_y \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot S_{эф}, \quad (3)$$

где  $C_y$  – коэффициент подъемной силы (определяется экспериментально);  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость воздушного потока, м/с;  $S_{эф}$  – эффективная площадь воздействия потока, м<sup>2</sup>.

Износ просеивающих поверхностей оценивался по потере массы сит после определенного периода работы (100 часов) при различных режимах воздушного тракта. Массу сит определяли с помощью прецизионных весов с точностью до 0,1 г.

Эффективность грохочения оценивалась по стандартной методике [10] как отношение массы подрешетного продукта к массе материала, размер которого меньше размера отверстий сита:

$$E = \frac{m_{подр}}{m_{исх} \cdot \beta} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где  $E$  – эффективность грохочения, %;  $m_{подр}$  – масса подрешетного продукта, кг;  $m_{исх}$  – масса исходного материала, кг;  $\beta$  – содержание в исходном материале фракций мельче размера отверстий сита, доли ед.

### Моделирование процесса сепарации с учетом воздушного потока

Для математического описания процесса сепарации с учетом воздушного потока была разработана модель движения частицы материала по просеивающей поверхности. Модель учитывала силы инерции, тяжести, трения и воздействие воздушного потока [11].

Уравнение движения частицы по ситу в проекции на ось  $x$  (вдоль сита) имеет вид:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos \beta - f \cdot (m \cdot g \cdot \cos \alpha - F_{возд}) - m \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

где  $m$  – масса частицы, кг;  $x$  – координата частицы вдоль сита, м;  $t$  – время, с;  $A$  – амплитуда колебаний, м;  $\omega$  – угловая частота колебаний, рад/с;  $\beta$  – угол наклона вибратора, град.

Для решения данного дифференциального уравнения использовался метод Рунге – Кутты четвертого порядка, реализованный в программе MATLAB [12]. Моделирование позволило определить оптимальные параметры воздушного потока для различных материалов и режимов работы грохота.

### Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования показали, что воздушный поток, направленный перпендикулярно плоскости сита снизу вверх, оказывает существенное влияние на коэффициент трения материала о просеивающую поверхность. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что с увеличением скорости воздушного потока коэффициент трения снижается, достигая минимума при скорости 10–12 м/с. При этом для более мелкой фракции (5–20 мм) эффект снижения коэффициента трения проявляется сильнее, что можно объяснить большей удельной поверхностью материала и, соответственно, большей площадью воздействия воздушного потока [13].

Снижение коэффициента трения объясняется формированием воздушной прослойки между материалом и ситом, что согласуется с теоретическими положениями, изложенными в [14]. При скорости потока более 12,5 м/с наблюдается стабилизация коэффициента трения, а для мелких фракций даже некоторое его повышение, что мо-

Таблица 2

Влияние скорости воздушного потока на коэффициент трения щебня о стальное сито

Скорость воздушного потока, м/с	Коэффициент трения для фракции 5–20 мм	Коэффициент трения для фракции 20–40 мм	Уменьшение коэффициента трения, %
0 (без потока)	0,58	0,62	–
2,5	0,54	0,58	6,9–6,5
5,0	0,49	0,53	15,5–14,5
7,5	0,47	0,50	19,0–19,4
10,0	0,45	0,47	22,4–24,2
12,5	0,46	0,47	20,7–24,2

жет быть связано с турбулизацией потока и возникновением завихрений.

Зависимость коэффициента трения от скорости воздушного потока можно аппроксимировать выражением

$$f = f_0 \cdot (1 - k \cdot v^n) \cdot (1 + \alpha \cdot v^m), \quad (6)$$

где  $f_0$  – коэффициент трения без воздушного потока;  $k$ ,  $n$ ,  $\alpha$ ,  $m$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств материала и конструкции сита.

Для исследованных фракций гранитного щебня значения коэффициентов составили:  $k = 0,03$ ,  $n = 0,8$ ,  $\alpha = 0,001$ ,  $m = 2,5$ .

#### **Износ просеивающих поверхностей**

Результаты исследования износа просеивающих поверхностей при различных режимах работы воздушного тракта представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, применение воздушного тракта позволяет существенно снизить износ просеивающих поверхностей. Наибольший эффект достигается при использовании постоянного воздушного потока с высокой интенсивностью (скорость 10,0 м/с), что обеспечивает снижение

износа на 30,3 % по сравнению с базовым вариантом.

Интересно отметить, что пульсирующий воздушный поток также показывает хорошие результаты, обеспечивая снижение износа на 25,4–27,8 %. При этом энергопотребление системы воздушного тракта при использовании пульсирующего потока на 30–40 % ниже, чем при постоянном потоке той же средней интенсивности [15].

Снижение износа просеивающих поверхностей при использовании воздушного тракта объясняется несколькими факторами:

- 1) уменьшением коэффициента трения между материалом и ситом;
- 2) снижением нормальной нагрузки на сито за счет подъемной силы воздушного потока;
- 3) очищающим эффектом воздушного потока, препятствующим застреванию частиц в отверстиях сита [16].

#### **Производительность и эффективность грохочения**

Влияние параметров воздушного тракта на производительность и эффективность грохочения представлено в табл. 4.

**Таблица 3**  
**Износ просеивающих поверхностей грохота ГИС-52 при различных режимах работы воздушного тракта (период испытаний – 100 часов)**

Режим работы воздушного тракта	Скорость воздушного потока, м/с	Износ сита, г/м <sup>2</sup>	Снижение износа относительно базового варианта, %
Без воздушного потока (базовый)	0	284	–
Постоянный поток, малая интенсивность	5,0	243	14,4
Постоянный поток, средняя интенсивность	7,5	218	23,2
Постоянный поток, высокая интенсивность	10,0	198	30,3
Пульсирующий поток, 5 Гц	7,5 (средняя)	212	25,4
Пульсирующий поток, 10 Гц	7,5 (средняя)	205	27,8

**Таблица 4**  
**Влияние параметров воздушного тракта на производительность и эффективность грохочения грохота ГИС-52**

Режим работы воздушного тракта	Скорость воздушного потока, м/с	Производительность, т/ч	Увеличение производительности, %	Эффективность грохочения, %	Увеличение эффективности, п. п.
Без воздушного потока (базовый)	0	158	–	88,5	–
Постоянный поток, малая интенсивность	5,0	167	5,7	90,2	1,7
Постоянный поток, средняя интенсивность	7,5	178	12,7	91,8	3,3
Постоянный поток, высокая интенсивность	10,0	186	17,7	93,2	4,7
Пульсирующий поток, 5 Гц	7,5 (средняя)	175	10,8	92,5	4,0
Пульсирующий поток, 10 Гц	7,5 (средняя)	182	15,2	94,1	5,6

Результаты показывают, что применение воздушного тракта позволяет значительно повысить как производительность грохота (до 17,7 %), так и эффективность грохочения (до 5,6 процентного пункта). Наиболее интересные результаты показал пульсирующий поток с частотой 10 Гц, который обеспечил эффективность грохочения 94,1 %, что особенно важно при работе с влажными материалами [17].

Повышение производительности и эффективности грохочения при использовании воздушного тракта объясняется следующими факторами:

- 1) снижением застреваемости частиц в отверстиях сита благодаря продувке;
- 2) увеличением скорости перемещения материала по ситам за счет снижения трения;
- 3) интенсификацией просеивания благодаря созданию «псевдооживленного» слоя материала;
- 4) улучшением условий взаимного перемещения частиц в слое материала [18].

### Инновационная конструкция воздушного тракта

На основе проведенных исследований разработана инновационная конструкция воздушного тракта для инерционных грохотов типа ГИС. Главными отличительными особенностями предложенной конструкции являются:

- 1) переменное сечение воздухопроводов, обеспечивающее оптимальное распределение воздушного потока по длине грохота;
- 2) система пульсаторов с возможностью регулирования частоты пульсаций;
- 3) термостатирование воздушного потока для работы с влажными материалами;
- 4) секционная конструкция, позволяющая адаптировать систему для различных типов материалов и режимов работы.

Расчетное энергопотребление инновационной системы составляет 5,5–7,5 кВт в зависимости от режима работы, что составляет около 40–50 % от мощности привода грохота [19]. При этом экономический эффект от увеличения срока службы сит и повышения производительности значительно превышает дополнительные энергозатраты.

Для оценки эффективности внедрения инновационной конструкции воздушного тракта было проведено технико-экономическое обоснование. Расчеты показали, что при средней стоимости комплекта сит для грохота ГИС-52 около 180–220 тыс. рублей и среднем сроке службы сит

без воздушного тракта 45–60 дней, внедрение предложенной системы обеспечивает годовую экономию около 650–750 тыс. рублей только за счет снижения затрат на замену сит. Дополнительный экономический эффект достигается за счет увеличения производительности грохота и снижения простоев оборудования [20].

### Выводы

Проведенные исследования влияния воздушного тракта на работу инерционного грохота ГИС-52 позволили сделать следующие выводы:

1. Применение воздушного потока, направленного перпендикулярно плоскости сита снизу вверх, обеспечивает снижение коэффициента трения материала о просеивающую поверхность на 18–22 % при оптимальной скорости потока 10–12 м/с.

2. Использование воздушного тракта позволяет снизить износ просеивающих поверхностей на 25–30 %, что существенно увеличивает срок службы сит и снижает эксплуатационные затраты.

3. Пульсирующий воздушный поток с частотой 10 Гц показывает наилучшие результаты по эффективности грохочения, обеспечивая ее увеличение на 5,6 процентного пункта при повышении производительности на 15,2 %.

4. Предложенная инновационная конструкция воздушного тракта с переменным сечением и термостатированием позволяет оптимизировать процесс сепарации для различных типов материалов и условий работы.

5. Расчетный экономический эффект от внедрения разработанной технологии составляет 650–750 тыс. рублей в год на один грохот за счет снижения затрат на замену сит, без учета эффекта от повышения производительности.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для предприятий, производящих щебень, гравий и другие строительные материалы. Внедрение разработанной технологии позволит снизить эксплуатационные затраты, повысить производительность оборудования и улучшить качество продукции.

Дальнейшие исследования планируется направить на оптимизацию конструкции воздушного тракта для различных типов материалов, в том числе материалов с повышенной влажностью, а также на разработку автоматизированных систем управления воздушным трактом в зависимости от свойств сепарируемого материала.

### Список литературы

1. Пелевин А.Е., Цыпин Е.Ф. Научные основы процесса грохочения и развитие технологии тонкого грохочения // Обогащение руд. 2019. № 5. С. 33–40.
2. Головин К.А., Копылов А.Б., Сарычев В.И. Современное состояние и перспективы развития производства нерудных строительных материалов в России // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2020. № 3. С. 318–329.
3. Юдин А.В., Шестаков В.С. Расчет и проектирование вибрационных грохотов. Екатеринбург: УГГУ, 2017. 156 с.

4. Блехман И.И. Вибрационная механика и вибрационная техника. Теория, технологические процессы и оборудование. М.: Инфра-Инженерия, 2018. 640 с.
5. Севостьянов В.С., Ильина Т.Н., Кухарев Д.А. Энергосберегающие мельницы и технологические комплексы для производства строительных материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 7. С. 84–89.
6. Сокур Н.И., Потураев В.Н., Бабец Е.К. Дробление и классификация полезных ископаемых. Киев: Освіта України, 2019. 368 с.
7. Федотов П.К., Сенченко А.Е., Федотов К.В. Обоснование выбора и расчет оптимальных параметров вибрационных грохотов // Обогащение руд. 2020. № 3. С. 15–20.
8. Тимченко И.И., Кирсанов В.А. Методика экспериментального определения коэффициентов трения сыпучих материалов о различные поверхности // Строительные материалы. 2022. № 3. С. 59–64.
9. Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 2019. 328 с.
10. ГОСТ 32862-2014. Щебень и песок из горных пород для дорожных работ. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.
11. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 2020. 315 с.
12. Дьяконов В.П. МАТЛАВ: Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2018. 768 с.
13. Акопов М.Г., Козлов Ю.Д. Аэродинамика зернистой среды и ее применение при сепарации сыпучих материалов // Известия вузов. Строительство. 2021. № 5. С. 42–48.
14. Васильев А.М., Зверев Н.А., Костин И.М. Воздействие воздушного потока на процесс грохочения строительных материалов // Строительные материалы. 2021. № 7. С. 76–81.
15. Иванов О.П., Яшина Т.И. Пульсирующие газовые потоки в технологических процессах. М.: Машиностроение, 2021. 283 с.
16. Жиркин Ю.В., Мироненков Е.А., Тютяряков Н.Ш. Надежность, эксплуатация и ремонт металлургических машин и оборудования. Магнитогорск: МГТУ, 2019. 330 с.
17. Исаев А.А., Чибисова Н.В. Особенности грохочения влажных материалов // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 8. С. 90–96.
18. Борщев В.Я., Долгунин В.Н., Иванов О.О. Научные основы процессов взаимодействия дисперсных материалов и ресурсосберегающие технологии их переработки // Вестник ТГТУ. 2018. Т. 24, № 4. С. 612–623.
19. Серебряков А.В., Кузьмин Р.С. Энергоэффективные технологии в производстве строительных материалов // Энергосбережение. 2022. № 2. С. 58–63.
20. Экономика строительства: учебное пособие / под ред. В.В. Бузырева. М.: Юрайт, 2019. 311 с.

#### References

1. Pelevin A.E., Tsyplin E.F. [Scientific foundations of the screening process and the development of fine screening technology]. *Obogashchenie rud* [Ore Concentration], 2019, no. 5, pp. 33–40. (in Russ.)
2. Golovin K.A., Kopilov A.B., Sarichev V.I. [Current state and prospects for the development of non-metallic building materials production in Russia]. *Izvestiya TulGU. Nauki o zemle* [Proceedings of Tula State University. Earth Sciences], 2020, no. 3, pp. 318–329. (in Russ.)
3. Yudin A.V., Shestakov V.S. *Raschet i proektirovanie vibraatsionnykh grokhoto* [Calculation and design of vibrating screens]. Ekaterinburg, UGGU Publ., 2017. 156 p. (in Russ.)
4. Blekhman I.I. *Vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya tekhnika. Teoriya, tekhnologicheskie protsessy i oborudovanie* [Vibration mechanics and vibration engineering. Theory, technological processes and equipment]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2018. 640 p. (in Russ.)
5. Sevostyanov V.S., Ilyina T.N., Kukharev D.A. [Energy-saving mills and technological complexes for the production of construction materials]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov], 2019, no. 7, pp. 84–89. (in Russ.)
6. Sokur N.I., Poturaev V.N., Babets E.K. *Droblenie i klassifikatsiya poleznykh iskopaemykh* [Crushing and classification of minerals]. Kiev, Osvita Ukrainy Publ., 2019. 368 p. (in Russ.)
7. Fedotov P.K., Senchenko A.E., Fedotov K.V. [Justification of the choice and calculation of the optimal parameters of vibrating screens]. *Obogashchenie rud* [Ore Concentration], 2020, no. 3, pp. 15–20. (in Russ.)
8. Timchenko I.I., Kirsanov V.A. [Methodology for experimental determination of friction coefficients of bulk materials on different surfaces]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2022, no. 3, pp. 59–64. (in Russ.)
9. Altshul A.D., Zhivotovsky L.S., Ivanov L.P. *Gidravlika i aehroodinamika* [Hydraulics and aerodynamics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2019. 328 p. (in Russ.)

10. GOST 32862–2014. *Shcheben' i pesok iz gornykh porod dlya dorozhnykh rabot. Tekhnicheskie trebovaniya* [GOST 32862–2014. Crushed stone and sand from rocks for road works. Technical requirements]. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. 20 p. (in Russ.)
11. Andreev S.E., Perov V.A., Zverevich V.V. *Droblenie, izmelchenie i grokhocenie poleznykh iskopaemykh* [Crushing, grinding and screening of minerals]. Moscow, Nedra Publ., 2020. 315 p. (in Russ.)
12. Dyakonov V.P. *MATLAB: Polnyj samouchitel'* [MATLAB: Complete self-study guide]. Moscow, DMK Press Publ., 2018. 768 p. (in Russ.)
13. Akopov M.G., Kozlov Yu.D. [Aerodynamics of granular medium and its application in separation of bulk materials]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [University Proceedings. Civil Engineering], 2021, no. 5, pp. 42–48. (in Russ.)
14. Vasilyev A.M., Zverev N.A., Kostin I.M. [Effect of airflow on the screening process of construction materials]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2021, no. 7, pp. 76–81. (in Russ.)
15. Ivanov O.P., Yashina T.I. *Pul'siruyushchie gazovye potoki v tekhnologicheskikh protsessakh* [Pulsating gas flows in technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2021. 283 p. (in Russ.)
16. Zhirkin Yu.V., Mironenkov E.A., Tyuteriakov N.Sh. *Nadezhnost', ekspluatatsiya i remont metallurgicheskikh mashin i oborudovaniya* [Reliability, operation and repair of metallurgical machines and equipment]. Magnitogorsk, MGTU Publ., 2019. 330 p. (in Russ.)
17. Isayev A.A., Chibisova N.V. [Features of wet material screening]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [University Proceedings. Mining Journal], 2020, no. 8, pp. 90–96. (in Russ.)
18. Borshchev V.Ya., Dolgunin V.N., Ivanov O.O. [Scientific fundamentals of interaction processes of disperse materials and resource-saving processing technologies]. *Vestnik TGTU* [TGTU Bulletin], 2018, vol. 24, no. 4, pp. 612–623. (in Russ.)
19. Serebryakov A.V., Kuz'min R.S. [Energy-efficient technologies in the production of building materials]. *Energoberezhenie* [Energy Conservation], 2022, no. 2, pp. 58–63. (in Russ.)
20. *Ekonomika stroitel'stva: uchebnoe posobie* [Construction economics: textbook]. Edited by V.V. Buzyrev. Moscow: Yurayt, 2019. 311 p. (in Russ.)

**Информация об авторах:**

**Медведева Ксения Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта и логистики, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия; kseniamedvedeva17@gmail.com

**Райков Сергей Валентинович**, кандидат технических наук, доцент кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия; raykov\_s\_v@mail.ru

**Ефимов Арсений Андреевич**, студент кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия; arsyuxa.efimov@mail.ru

**Information about the authors:**

**Ksenia S. Medvedeva**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor at the Department of Transport and Logistics, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia; kseniamedvedeva17@gmail.com

**Sergey V. Raykov**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor at the Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia; raykov\_s\_v@mail.ru

**Arseniy A. Efimov**, student, Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia; arsyuxa.efimov@mail.ru

**Статья поступила в редакцию 10.12.2025, принята к публикации 15.12.2025.**

**The article was submitted 10.12.2025, approved after reviewing 15.12.2025.**