

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-7-118-130

^{1,*}Ханин С.И., ¹Малахов М.А., ²Мордовская О.С., ¹Синица Е.В.¹Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова²Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*E-mail: dh@intbel.ru

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОСТАВНОЙ КОНСТРУКЦИИ ШПАЛЬТОВОГО СИТА ДЛЯ ГРОХОЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ С ЛЕЩАДНОЙ ФОРМОЙ ЧАСТИЦ

Аннотация. Вибрационные грохоты, занимающие одно из важных мест в технологических комплексах различных отраслей промышленности, характеризуются достаточно высокой производительностью, надежностью и возможностью точной настройки параметров классификации. Из характеризующих процесс грохочения параметров обоснованно выделены характеристики качества: его эффективность и лещадность продукта грохочения. Приведено описание особенностей составной конструкции шпальтового сита, направленных на улучшение выделенных параметров, и обоснован выбор оказывающих на них наибольшее влияние факторов. Обоснована необходимость исследования процесса грохочения материала с наличием частиц лещадной формы на грохоте с этим ситом, которое осуществлено с использованием программного комплекса Altair EDEM и метода математического планирования экспериментов. С использованием полученных уравнений регрессии установлены закономерности изменения эффективности процесса грохочения и лещадности продукта грохочения от шага волны целевых отверстий второй просеивающей поверхности, ширины целевых отверстий первой просеивающей поверхности, массы подаваемого материала. Определены рациональные значения этих факторов, обеспечивающие максимальное значение эффективности процесса грохочения и минимальное значение лещадности продукта грохочения. При сравнении оснащенного составной конструкцией шпальтового сита грохота с прототипом, по рассматриваемым показателям качества процесса грохочения материала с лещадной формой частиц, установлена эффективность его работы.

Ключевые слова: вибрационный грохот, составное шпальтовое сито, процесс, лещадность материала, эффективность грохочения.

Введение. Современные промышленные комплексы по переработке сыпучих материалов нуждаются в оборудовании, обеспечивающем их высокопроизводительную, эффективную классификацию по фракциям. Вибрационные грохоты, основанные на принципе динамического воздействия на материал посредством колебаний просеивающей поверхности, занимают одно из важных мест в технологических комплексах таких отраслей промышленности как легкая, пищевая, химическая, строительных материалов и других. Их широкое применение обусловлено достаточно высокой производительностью, надежностью и возможностью точной настройки параметров классификации. Основные направления совершенствования вибрационных грохотов включают повышение долговечности рабочих органов за счет применения износостойких материалов для классифицирующих поверхностей; разработку систем динамической стабилизации оборудования; оптимизацию процесса классификации путем комплексного исследования влияния амплитудно-частотных характеристик вибрации, угла наклона и геометрии просеивающих поверхностей, а также других параметров на эффективность процесса разделения материала.

Производительность и качество продукта грохочения относятся к основным параметрам, характеризующим работу грохота. Особое внимание заслуживает контроль формы зерен продукта грохочения через снижение его лещадности путем конструктивного совершенствования сит. Это особенно актуально, так как повышает качество продукта грохочения.

Эффективность процесса грохочения E , характеризующая качество разделения материала по размерам частиц, представляет собой сложную функцию, зависящую от совокупности взаимосвязанных факторов. Так, к ним относятся геометрические параметры сита (размер и форма ячеек, угол наклона, конструктивное исполнение просеивающих поверхностей), кинематические характеристики процесса (амплитуда, частота и траектория колебаний), физико-механические свойства материала (гранулометрический состав, влажность, коэффициент трения, форма частиц), а также режимные параметры (производительность питания, толщина слоя материала на просеивающей поверхности, продолжительность грохочения). Согласно данным исследований [1, 2], диапазон изменения E варьируется в пределах

35–98%, что обусловлено значительным влиянием сочетания вышеперечисленных факторов. Эффективность процесса грохочения E и производительность Q , характеризуемая толщиной слоя материала на просеивающей поверхности, находятся в обратной зависимости, что подтверждается рядом исследований. Увеличение одного из этих параметров неизбежно приводит к снижению другого, что создает существенные ограничения при проектировании вибрационных грохотов.

Согласно рекомендациям, изложенным в работах [3, 4], оптимальная производительность грохота достигается при условии, когда высота слоя материала h на просеивающей поверхности не превышает четырехкратного размера средней частицы. Однако данное ограничение значительно сужает технологические возможности вибрационных грохотов, приводит к увеличению их габаритных параметров, что влечет за собой рост энергопотребления и снижение их эксплуатационной надежности. Решением этой проблемы может служить использование составной конструкции шпальтового сита, приведенной в работе [5]. В ней предложена конструкция шпальтового сита с двумя просеивающими поверхностями, из которых вторая имеет щелевые отверстия шириной l_n (рис.1).

Первая просеивающая поверхность, имеющая ширину щели l , превышающей ширину щелевых отверстий второй просеивающей поверхности l_n , обеспечивает предварительное отделение крупных частиц ($>1,25d$) и эффективное прохождение частиц размером $\leq d$ на вторую просеивающую поверхность. Под параметром d рассматриваются размеры частиц, не превышающие ширину щелевых отверстий l_n . Данное конструктивное решение позволяет увеличить подачу материала на сито. В работе [6] описано имитационное моделирование в программном продукте

Altair EDEM процесса разделения по размерам только частиц сферической формы на рассматриваемой конструкции шпальтового сита. Однако, в подвергнутых стадии дробления материалах имеется достаточно большое содержание частиц, имеющих лещадную или игловатую форму (далее лещадных частиц) - с отношением их наибольшего линейного размера к наименьшему, равным или превышающим значение 3:1. Так, в работе [7] приводятся сведения о содержании частиц лещадной формы в продуктах измельчения дробилок различных типов: для щековых как с простым, так и сложным движением щеки – до 60 %; для конусных среднего и мелкого дробления – до 40 %; для молотковых и роторных – до 20 %. Также отмечается, что повышение лещадности частиц в материале негативно влияет на качество изготовленной с их применением продукции. Повышение содержания таких частиц в бетонных смесях и асфальтобетоне приводит к снижению прочности изделий из-за неравномерного распределения напряжений, увеличению межзерновых пустот, что требует повышенного расхода вяжущих материалов, а также ухудшению удобоукладываемости смесей. Для песков фракций 2,5–5 мм содержание частиц лещадной формы нормируется и разделяется на три группы: 15 %, 25 %, 35% (ГОСТ 31424-2010 Материалы строительные нерудные из отсеков дробления плотных горных пород при производстве щебня. Межгосударственный стандарт. М., 2011. 11 с). Для щебня содержание лещадных фракций также нормируется и разделяется на пять групп: до 10 %, 10-15 %, 15-25 %, 25-35 % и 35-50 %, для гравия этот показатель ограничен 35 % (ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Межгосударственный стандарт. М., 1993. 13 с).

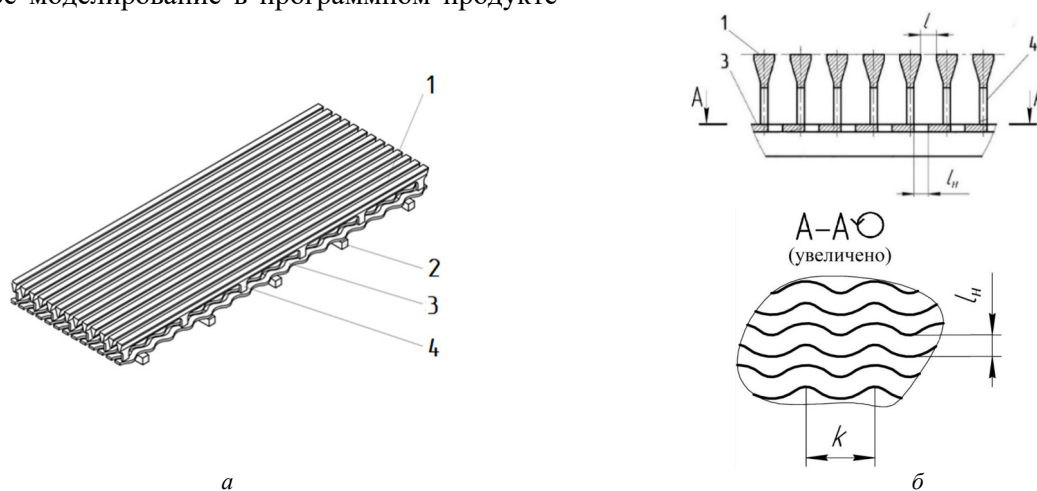


Рис. 1. Составное шпальтовое сито:

a – цифровая модель, b – схема фрагмента поперечного сечения:

1 – первая просеивающая поверхность, 2 – поперечина, 3 – вторая просеивающая поверхность, 4 – колосник

Приведенные описания, характеризующие наличие большого содержания частиц лещадной формы в поступающих на грохочение материалах и негативное влияние этого содержания в продуктах грохочения на качество изготовленной с их применением продукции, а также отсутствие описания возможностей выделения таких частиц на рассматриваемой составной конструкции шпальтового сита, свидетельствуют о целесообразности проведения исследований по установлению эффективности процесса классификации E и лещадности L продукта грохочения.

Материалы и методы. Целью проводимых исследований являлось:

- установление закономерностей изменения эффективности процесса грохочения E материала, содержащего частицы лещадной формы, и лещадности L продукта грохочения от конструктивно-технологических параметров грохота с составной конструкцией шпальтового сита и определение их рациональных значений;

- сопоставление показателей работы грохотов с составной конструкцией шпальтового сита и его прототипа по значениям эффективности процесса грохочения E материала и лещадности L продукта грохочения.

Для реализации поставленной цели были поставлены следующие задачи.

1. Выбора:

- условий проведения исследований,
- объекта исследования,
- методов проведения исследований,
- программных продуктов для проведения исследований.

2. Проведения моделирования, на грохотах с рассматриваемыми конструкциями шпальтовых сит, процессов грохочения материала, содержащего частицы лещадной формы.

3. Анализа полученных результатов процессов грохочения материала и обобщения установленных закономерностей.

На данном этапе экспериментальных исследований, при выборе условий проведения, предпочтение было отдано виртуальному эксперименту, как наименее затратному по временным и материальным ресурсам по сравнению с естественными промышленным и лабораторным экспериментами (ГОСТ Р 57721-2017 Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Эксперимент виртуальный. Стандартинформ. М., 2018. 15 с). В качестве прототипа для объекта исследования рассматривался выпускаемый в промышленных целях горизонтальный вибрационный грохот ГСЛ-11, характеризующийся производительностью по исходному материалу, изменяющейся, в зависимости от его

крупности, в пределах – $Q_{ф.пр}=0,05..8$ т/ч; просеивающей поверхностью с шириной – $H_{ф.пр}=0,75$ м; длиной – $L_{ф.пр}=1,7$ м и размерами ячеек – $l_{ф.пр}=0,5..20$ мм. Амплитуда и частота колебаний короба соответственно имеют значения: $A=4$ мм, $\omega=16$ Гц. За объект исследования принята уменьшенная цифровая модель грохота ГСЛ-11 со шпальтовым ситом, разработанная в программной среде КОМПАС-3D [8, 9]. Коэффициент геометрического подобия цифровой модели к физическому объекту составил $K_r=3$. Просеивающие поверхности сит цифровых моделей вибрационного грохота с составной конструкцией шпальтового сита и его конструктивного прототипа характеризовались длиной – $L_c=L_{пр}=0,35$ м; шириной – $H_c=H_{пр}=0,15$ м. Для лещадных частиц задавалась 3-х кратная разница между шириной и длиной соответствующей частицы. Для исследования процесса грохочения материала, содержащего частицы лещадной формы, использовалось имитационное моделирование процесса в программном продукте Altair EDEM [10-13]. Для исследования процесса грохочения на модели вибрационного грохота со шпальтовым ситом использованы методы имитационного моделирования и математического планирования эксперимента по плану ЦКРП-2³ [14].

Составная конструкция шпальтового сита имеет особенности, предназначенные для повышения эффективности выделения частиц лещадной формы из сыпучей среды. Наличие криволинейной волнистой формы щелевых отверстий второй просеивающей поверхности создаёт условия для изменения траекторий движения частиц материала и их многократной переориентации относительно направления щели в процессе грохочения. Такое расположение отверстий приводит к формированию дополнительных сил, воздействующих на зерна материала, что создает благоприятные условия для выделения частиц лещадной формы в процессе грохочения. Изменение шага волны щелевых отверстий позволяет влиять на изменение лещадности продукта грохочения вследствие изменения расположения щели отверстий по отношению к направлению движения материала по второй просеивающей поверхности. Кроме того, на показатель лещадности подрешетного продукта влияют ширина щели первой просеивающей поверхности и объемная подача на нее материала, поскольку лещадные частицы, обладающие повышенным отношением длины к толщине, испытывают затруднения при прохождении через уплотненные нижние слои материала, что способствует их задержанию на просеивающей поверхности (фрагмент текста перенесен со страницы 2).

С учетом рассмотренных особенностей в качестве факторов при математическом планировании эксперимента по плану ЦКРП-2³ приняты шаг k волны щелевых отверстий второй просеивающей поверхности, ширина l щелевых отверстий первой просеивающей поверхности, масса m подаваемого материала. Факторы и уровни их варьирования приведены в табл. 1. Размеры щели между колосниками первой просеивающей поверхности варьировались в диапазоне от 5,5 мм до 7,5 мм, при которых «живое сечение» соответственно составляло $L_{c1}=58,6-80\%$. Вторая просеивающая поверхность имеет криволинейную волнистую форму отверстий с постоянным размером щели $l_n=5$ мм, шаг волны этих отверстий варьировался в пределах от 12 мм до 20 мм, при этом «живое сечение» соответственно составляло $L_{c2}=55,9-58,9\%$. Амплитуда и частота колебаний короба назначались постоянными и соответствовали параметрам промышленного прототипа грохота ($A=4$ мм, $\omega=16$ Гц). Проведение эксперимента характеризовалось следующими общими с работой [6] условиями. Просеиваемому материалу задавались свойства сухого кварцевого песка. Продолжительность симуляции не превышала 5 с и определялась полным

прохождением классифицируемого материала через просеивающие поверхности. По условию проведения экспериментов на сито грохота подавалась одна порция материала варьированной массой m .

В качестве исследуемых функций приняты выраженные в процентах эффективность E грохочения кварцевого песка и лещадность L подрешетного продукта грохочения. Для определения эффективности грохочения применялась следующая формула [15, с. 86]:

$$E = \frac{m'_a}{m_a} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где m'_a – масса прошедшего через сито материала заданной крупности, кг;

m_a – масса материала заданной крупности в исходном материале, кг.

Содержание зерен лещадной формы в подрешетном продукте определялось согласно рекомендациям ГОСТ 31424-2010. С. 6:

$$E_l = \frac{m'_{\phi l}}{m'_{\phi}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где для рассматриваемой фракции подрешетного продукта: $m'_{\phi l}$ и m'_{ϕ} соответственно массы зерен лещадной формы и всей фракции, кг.

Таблица 1

Факторы и уровни варьирования ПФЭ ЦКРП-2³

Факторы	Обозначение		Интервал	Уровни варьирования факторов				
	Кодированный вид	Натуральный вид		-1,68	-1	0	1	1,68
Шаг волны щелевых отверстий второй просеивающей поверхности	X_1	k , мм	2,38	12,00	13,62	16,00	18,38	20,00
Ширина щели отверстий первой просеивающей поверхности	X_2	l , мм	0,60	5,50	5,90	6,50	7,10	7,50
Масса подаваемого материала	X_3	m , г	293	492,00	691,14	984,00	1276,86	1476,00

Значение ширины l щели отверстий первой просеивающей поверхности, соответствующее центру плана, задавалось, согласно рекомендациям [5, 6], равное $1,25 \cdot l_n$. Перед началом процесса грохочения классифицируемый материал ровным слоем, с равномерно распределённой крупностью частиц, размещался на четверти

просеивающей поверхности шпальтового сита в его загрузочной части. Гранулометрический состав классифицируемого материала назначался согласно составу, в виде частных остатков на контрольных ситах, продуктов дробления дробилки ДКД-300, приведенному в работе [15] (табл.2).

Таблица 2

Гранулометрический состав продукта дробления дробилки ДКД-300

Параметр	Значение параметра													
Класс крупности, мм	+40	-40 +20	-20 +10	-10 +5	-5 +2,5	-2,5 +1,6	-1,6 +1	-1 +0,63	-0,36 + 0,315	-0,315 +0,16	-0,16 +0,1	-0,1 +0,063	-0,063	Всего
Выход, %	1.97	9.81	21.82	14.87	15.92	3.30	8.32	5.39	7.23	6.07	2.57	1.81	0.92	100

Частный остаток на каждом сите $C_{чi}$, %, согласно (ГОСТ 8269.0-97 Щебень и гравий из

плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Ме-

тоды физических испытаний. Межгосударственный стандарт. М., Стандартиформ. 2018, С. 7) определяется по результатам просеивания на каждом сите по формуле:

$$C_{qi} = \frac{m_i}{m_n} \cdot 100, \quad (3)$$

где m_i – масса остатка на сите, г;

m_n – масса пробы, г.

Полные остатки на каждом сите в процентах массы пробы определяются как равные сумме частных остатков на данном сите и всех ситах с большими размерами отверстий.

Этот продукт дробления должен подвергнуться фракционированию. Шпальтовые сита производятся с максимальной шириной щели 20 мм, что явилось основанием для ограничения максимальной крупности частиц в проводимых исследованиях. Минимальный размер частиц

ограничивался 1 мм. Использование в исследованиях частиц меньших размеров привело бы к увеличению общего количества подаваемых на сита частиц, превышающему возможности персонального компьютера. Указанные ограничения частиц по размерам не противоречат условиям фракционирования продуктов дробления в производственных условиях. В таблице 2 рассматриваемые в исследованиях фракции выделены цветом.

Так как выделенный для проведения исследований материал представлен самостоятельной фракцией -20+1, то была выполнена процедура пересчета содержания в нем каждой из рассматриваемых фракций, при этом классы крупности -2,5+1,6 и -1,6+1 были объединены во фракцию -2,5+1 (табл. 3). Затем был выполнен пересчет значений этих частных остатков в полные остатки на ситах №10, №5, №2,5 и №1 (табл. 3).

Таблица 3

Гранулометрический состав классифицируемого материала

Размер отверстия сита, d_c , мм	10	5	2,5	1
Частные остатки на ситах, $C_{ч}$, %	35,81	24,4	26,12	13,67
Полные остатки на ситах, $C_{п}$, %	35,81	60,21	86,33	100

Так как гранулометрическое распределение частиц материала продуктов дробления в производственных условиях характеризуется широким диапазоном размеров частиц, а в приведенном распределении оно ограничено примененным набором сит, то с целью расширения гранулометрического распределения частиц материала для значений полных остатков на ситах (табл. 3) с помощью приложения *Excel* получено уравнение

аппроксимации с оценкой достоверности аппроксимации $R^2=0,997$:

$$C_{п.а} = 113,676 - 13,108 \cdot d_c + 0,530 \cdot d_c^2. \quad (4)$$

С помощью уравнения (4) для классифицируемого материала рассчитаны значения полных остатков на ситах расширенного состава, по которым выполнен пересчет частных остатков. Полученные значения приведены в табл. 4.

Таблица 4

Расширенный гранулометрический состав классифицируемого материала

Размер отверстия сита, d_c , мм	10	9	8	7	6	5	4	3	2,5	1
Частные остатки на ситах, $C_{ч.а}$, %	35,60	3,03	4,1	5,16	6,22	7,28	8,33	9,4	5,1	15,78
Полные остатки на ситах, $C_{п.а}$, %	35,60	38,63	42,73	47,89	54,11	61,39	69,72	79,12	84,22	100

Частные остатки материала рассчитывались на основании значений полных остатков на ситах рассматриваемого ряда. Частный остаток на сите рассчитывался как разница между значением полного остатка на рассматриваемом сите и значением полного остатка на сите, размер отверстий которого превышает размер его отверстий и предшествует размеру отверстий рассматриваемого сита в рассматриваемом ряду. Так, частный остаток на сите с размером отверстия $d_c=9$ мм определялся как:

$$C_{ч.а.9} = C_{п.а.9} - C_{п.а.10}. \quad (5)$$

При применении дополнительных сит для расширения характеристики гранулометрического состава материала частный остаток на сите,

перед которым добавлены сита с большими размерами отверстий, перераспределяется на этих ситах в виде суммы их частных остатков. Так, суммарное значение частных остатков $C_{ч.а.9}$, $C_{ч.а.8}$, $C_{ч.а.7}$, $C_{ч.а.6}$, $C_{ч.а.5}$, полученных для сит с соответствующими размерами отверстий $d_c=9$ мм, $d_c=8$ мм, $d_c=7$ мм, $d_c=6$ мм, $d_c=5$ мм (табл. 4), находится в достаточно близком соответствии со значением частного остатка $C_{ч.5}$ (табл. 3). Суммарное значение частных остатков $C_{ч.а.4}$, $C_{ч.а.3}$, $C_{ч.а.2,5}$, полученных для сит с соответствующими размерами отверстий $d_c=4$ мм, $d_c=3$ мм, $d_c=2,5$ мм, находится в достаточно близком соответствии со значением частного остатка $C_{ч.2,5}$.

В программном продукте *Altair EDEM* при проведении экспериментов 80 % частиц классифицируемого материала придавалась сферическая форма, а 20 % – форма цилиндров с полусферами на их концах и отношение длины к диаметру – 3:1 (лещадные частицы). В зависимости от значения массы подаваемого на грохочение материала количество частиц в экспериментах изменялось от 50041 до 149406 шт.

Основная часть. Симуляция процессов грохочения материала с частицами лещадной формы на цифровой модели грохота с составной конструкцией шпальтового сита проводилась в программном продукте *Altair EDEM* по плану

ЦКРП-2³ согласно рекомендациям работы [14]. На рис. 2 приведены результаты симуляции одного из проведенных экспериментов, в виде продольных разрезов цифровой модели корпуса грохота с находящимся в нем материалом, при разном времени грохочения. Частицы, диаметр которых больше и меньше ширины щелей второй просеивающей поверхности, выделены соответствующим цветом. Эксперимент проводился при следующих значениях факторов: шаге волны щелевых отверстий второй просеивающей поверхности $k=16,00$ мм; ширине щели отверстий первой просеивающей поверхности $l=6,5$ мм; массе подаваемого материала $m=984,00$ г.

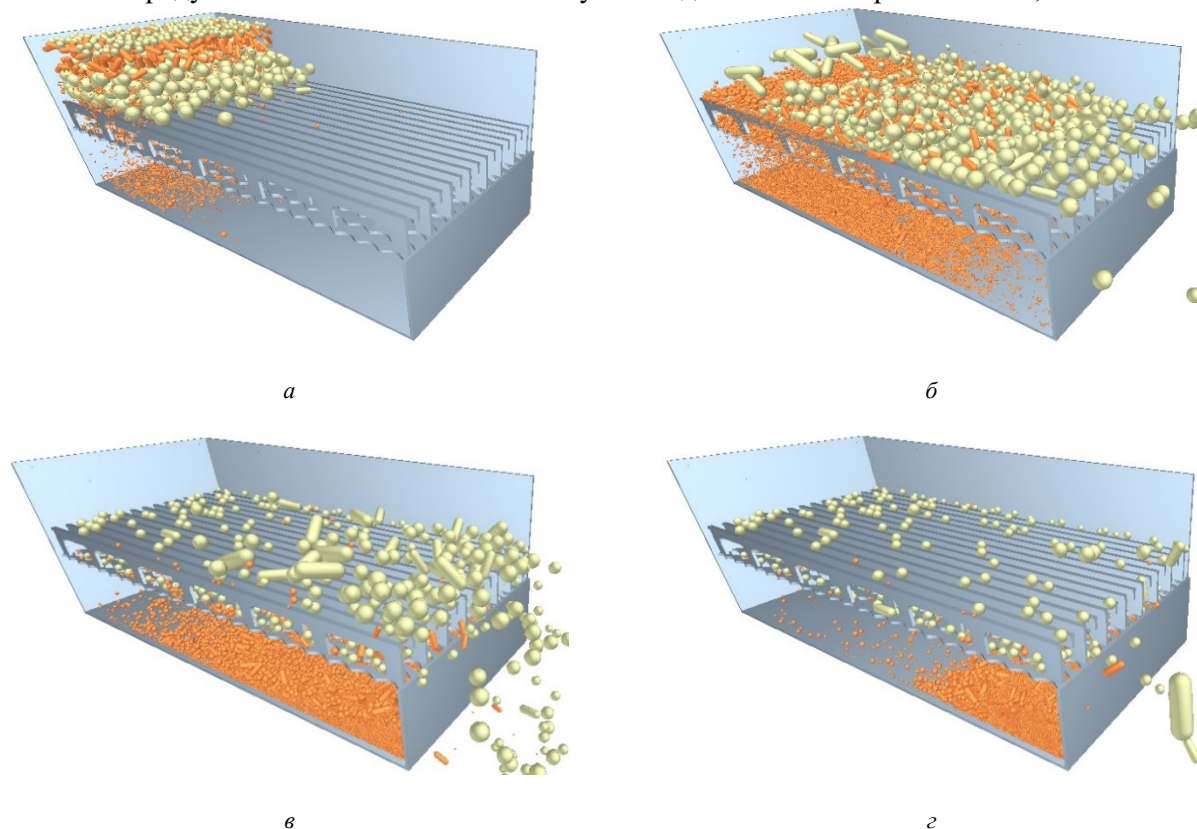


Рис. 2. Продольные разрезы цифровой модели корпуса грохота с составной конструкцией шпальтового сита при разном времени грохочения материала с частицами лещадной формы: а - $t=0,35$; б - $t=1$ с; в - $t=2$ с; г - $t=3$ с:

- – частицы, диаметр которых больше ширины щелей второй просеивающей поверхности;
- – частицы, диаметр которых меньше ширины щелей второй просеивающей поверхности

Согласно [14] для доверительной вероятности $P=0,95$ (уровень значимости 0,05) установлена воспроизводимость повторных опытов по соблюдению условия $G_p \leq G$, где G_p и G – соответственно расчетное и табличное значения критерия Кохрена (табл. 5). На основе данных, полученных при симуляции процесса грохочения в

программном комплексе *Altair EDEM* в соответствии с планом ЦКРП-2³ и обработанных в программной среде *Excel*, получены уравнения регрессии, проверку адекватности которых осуществляли сравнением расчетного F_p и табличного F критерия Фишера (табл. 5).

Таблица 5

Расчетные и табличные значения критериев

Функция	Параметры			
	Значения критерия Кохрена		Значения критерия Фишера	
	Расчетное	Табличное	Расчетное, F_p	Табличное, F
Эффективность процесса грохочения, E_k	0,263	0,271	4,91	5,05
Лещадность материала, L_k	0,269	0,271	4,81	5,05

После оценки значимости коэффициентов уравнение в кодированной форме для функции

$$E_k = 91,947 + 0,105 \cdot X_2 - 1,454 \cdot X_3 + 0,089 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,100 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,086 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,040 \cdot X_1^2 - 0,235 \cdot X_2^2 + 0,249 \cdot X_3^2. \quad (6)$$

Натуральная форма уравнения:

$$E = 74,7239259 + 8,1452774 \cdot l - 0,0097852 \cdot m + 0,0623249 \cdot k \cdot l - 0,3202469 \cdot k + 0,0001434 \cdot k \cdot m - 0,0004892 \cdot l \cdot m - 0,0070616 \cdot k^2 - 0,6527777 \cdot l^2 + 0,0000029 \cdot m^2. \quad (7)$$

С использованием программного комплекса *Maple* выполнено исследование уравнения регрессии. Построены графики, отражающие динамику изменения эффективности процесса грохочения при варьировании факторов в указанных диапазонах их значений (рис. 3).

Непрерывная в исследуемой области функция достигает минимального значения $E_{\min}=89,54$ % при факторах $k=20$ мм, $l=5,5$ мм, $m=1476 \times 10^{-3}$ кг и максимального значения $E_{\max}=95,27$ % при $k=12$ мм, $l=6,62$ мм, $m=492 \times 10^{-3}$ кг. Разница между этими значениями составляет 5,73 %.

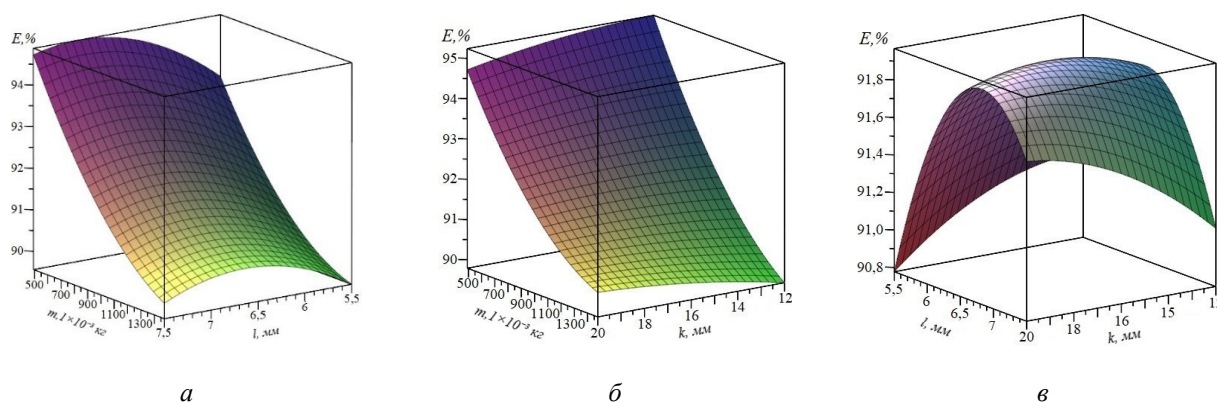


Рис. 3. Графические зависимости эффективности процесса грохочения E от шага k волны щелевых отверстий второй просеивающей поверхности, ширины l щелевых отверстий первой просеивающей поверхности, массы m подаваемого материала: а – $k = 16$ мм; б – $l = 6,5$ мм; в – $m = 984 \cdot 10^{-3}$ кг

Проведенный анализ выявил нелинейную зависимость эффективности грохочения E от шага k волны щелевых отверстий второй просеивающей поверхности. Увеличение значений k при малых, в рассматриваемом диапазоне, величинах l приводит к снижению значений функции (рис. 3, в). Так, при фиксированных $l=5,5$ мм и $m=984 \cdot 10^{-3}$ кг увеличение шага k волны щелевых отверстий с 12 мм до 16 мм и 20 мм приводит к соответственному снижению с $E=91,25$ % до $E=91,11$ % и $E=90,76$ %. При $l=6$ мм, $m=984 \cdot 10^{-3}$ кг последовательное увеличение k с 12 мм до 16 мм и далее до 20 мм приводит к соответственному увеличению функции с $E=91,71$ % до $E=91,69$ % и последующему уменьшению до $E=91,45$ %. Увеличение значений k при максимальных величинах l приводит к увеличению значений функции E . При $l=20$ мм, $m=984 \cdot 10^{-3}$ кг последовательное увеличение k с 12 мм до 16 мм и далее до 20 мм приводит соответственно к увеличению функции с $E=91,71$ % до $E=91,69$ % и последующему уменьшению до $E=91,45$ %. При фиксированных $l=6,5$ мм и $m=492 \cdot 10^{-3}$ кг увеличение значений k с 12 мм до 16 мм и 20 мм

приводит к снижению значений с $E=95,25$ % до $E=95,09$ % и $E=94,69$ %, соответственно (рис. 3, б). При $l=6,5$ мм и $m=984 \cdot 10^{-3}$ кг указанное увеличение k приводит к увеличению E с $E=91,83$ % до $E=91,94$ % и последующему снижению до $E=91,83$ %. При $l=6,5$ мм и $m=1476$ указанное увеличение k приводит к увеличению значений функции с $E=89,81$ % до $E=90,20$ % и $E=90,38$ %, соответственно.

Изменение значений фактора l приводит к нелинейному изменению значений функции E , с максимальными величинами, соответствующими центральной части диапазона исследуемого фактора. При увеличении значений l с начала диапазона эффективность E возрастает, достигает пикового значения, а затем снижается. В частности, при фиксированных $k=16$ мм и $m=492 \cdot 10^{-3}$ кг увеличение l с 5,5 мм до 6,5 мм приводит к небольшому росту E с 94,02 % до 95,09 %, тогда как при дальнейшем увеличении l до 7,5 мм наблюдается снижение E до 94,85 % (рис. 3, а). При фиксированных $k = 16$ мм и $m = 984 \cdot 10^{-3}$ кг значение E составляет 91,31 % при $l=5,5$ мм, возрастает до 92,16 % при $l=6,5$ мм и

снижается до 91,70 % при увеличении l до 7,5 мм (рис. 3, в).

Изменение массы m также приводит к нелинейному изменению значений эффективности грохочения E . При увеличении массы подаваемого материала эффективность снижается. Экспериментальные данные демонстрируют эту закономерность: при $k=12$ мм и $l=6,5$ мм увеличение m с $492 \cdot 10^{-3}$ кг до $984 \cdot 10^{-3}$ кг приводит к снижению E с 95,25 % до 91,83 %, дальнейшее увеличение m до $1476 \cdot 10^{-3}$ кг приводит к снижению E до 89,81 % (рис. 3, б). Аналогичная тенденция прослеживается при $k=16$ мм и $l=6,5$ мм:

$$L_k = 17,844 + 0,299 \cdot X_1 + 0,284 \cdot X_2 - 0,625 \cdot X_3 - 0,127 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,044 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,067 \cdot X_2^2. \quad (8)$$

Натуральная форма уравнения:

$$L = -1,2628710 + 0,6416241 \cdot k + 4,3157469 \cdot l - 0,0031426 \cdot m - 0,0889355 \cdot k \cdot l + 0,0000631 \cdot k \cdot m - 0,1861111 \cdot l^2. \quad (9)$$

С использованием программного комплекса *Maple* выполнено исследование уравнения регрессии. Построены графики, отражающие

значение E составляет 95,09 % при $m = 492 \cdot 10^{-3}$ кг, снижается до 92,16 % при $m=984 \cdot 10^{-3}$ кг и продолжает снижаться до 90,20 % при $m=1476 \cdot 10^{-3}$ кг. При $k=20$ мм и $l=6,5$ мм зависимость сохраняет аналогичный характер: E последовательно принимает значения $E=94,69$ % ($m=492 \cdot 10^{-3}$ кг), $E=91,83$ % ($m=984 \cdot 10^{-3}$ кг) и $E=90,37$ % ($m=1476 \cdot 10^{-3}$ кг).

Уравнение в кодированной форме, описывающее изменение лещадности материала в продукте грохочения, принимает следующий вид:

щие изменение лещадности материала в продукте грохочения при варьировании факторов (рис. 4).

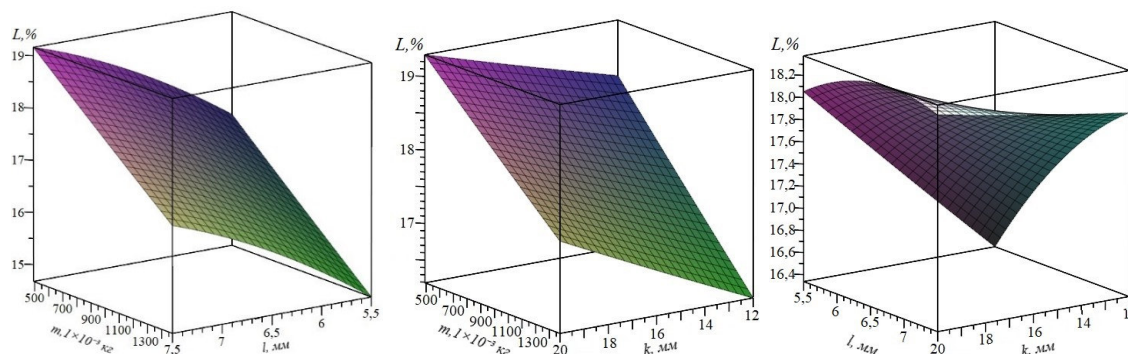


Рис. 4. Графические зависимости лещадности L продукта грохочения от шага k волны щелевых отверстий второй просеивающей поверхности, ширины l щелевых отверстий первой просеивающей поверхности, массы m подаваемого материала: а – $k = 16$ мм; б – $l = 6,5$ мм; в – $m = 984 \cdot 10^{-3}$ кг

Непрерывная в исследуемой области функция достигает минимального значения $L_{min}=15,15$ % при факторах $k=12$ мм, $l=5,5$ мм, $m=1476 \cdot 10^{-3}$ кг и максимального значения $L_{max}=19,30$ % при $k=20$ мм, $l=6,81$ мм, $m=492 \cdot 10^{-3}$ кг. Разница между этими значениями составляет 4,15 %.

Проведенный анализ выявил линейный характер зависимости лещадности L от шага k волны щелевых отверстий второй просеивающей поверхности. При увеличении k от минимальных значений лещадность L последовательно увеличивается. Так, при фиксированных $l=6,5$ мм и $m=492 \cdot 10^{-3}$ кг изменение шага k волны щелевых отверстий с 12 мм до 16 мм приводит к росту значений лещадности с $L=18,51$ % до 18,89 %, при $k=20$ мм значение L увеличивается до 19,26 % (рис. 4, б). Аналогичные изменения наблюдаются при $l=6,5$ мм и $m=984 \cdot 10^{-3}$ кг ($L=17,34$ % при $k=12$ мм; $L=17,84$ % при $k=16$ мм; $L=18,34$ % при $k=20$ мм). При

$l=6,5$ мм, $m=1476 \cdot 10^{-3}$ кг и увеличении значений k показатель лещадности возрастает с $L=16,16$ % при $k=12$ мм до $L=16,79$ % при $k=16$ мм, затем продолжает увеличение до $L=17,42$ % при $k=20$ мм.

Изменение значений параметра l приводит к нелинейному изменению значений функции L . При фиксированных $k=12$ мм и $m=984 \cdot 10^{-3}$ кг увеличение l с 5,5 мм до 6,5 мм приводит к увеличению значений L с 16,32 % до 17,34 %, при дальнейшем увеличении l до 7,5 мм значение L продолжает увеличение до 17,98 % (рис. 4, в). При $k=16$ мм и $m=984 \cdot 10^{-3}$ кг значение лещадности с 17,18 %, при $l=5,5$ мм, увеличивается до 17,84 % при $l=6,5$ мм и возрастает до 18,13 % при $l=7,5$ мм. При значениях $k=20$ мм и $m=984 \cdot 10^{-3}$ кг рассматриваемая зависимость имеет иной характер: функция последовательно увеличивает значения с 18,04 % ($l=5,5$ мм) до 18,34 % ($l=6,5$ мм) затем снижается до 18,27 % ($l=7,5$ мм).

Изменение массы m приводит к линейному характеру изменения лещадности L . При увеличении массы подаваемого материала значения лещадности последовательно снижаются. Так, при $k=16$ мм и $l=5,5$ мм увеличение m с $492 \cdot 10^{-3}$ кг до $984 \cdot 10^{-3}$ кг приводит к снижению L с 18,23 % до 17,18 %, при дальнейшем увеличении m до $1476 \cdot 10^{-3}$ кг продолжает наблюдаться уменьшение L до 16,13 % (рис. 4, а). Аналогичная тенденция прослеживается при $k=16$ мм и $l=6,5$ мм: значения L составляют 18,89 % ($m=492 \cdot 10^{-3}$ кг), снижаются до 17,84 % ($m=984 \cdot 10^{-3}$ кг) и продолжают снижение до 16,79 % ($m=1476 \cdot 10^{-3}$ кг). При $k=16$ мм и $l=7,5$ мм зависимость сохраняет тот же характер: изменение значений массы подаваемого материала с $m=492 \cdot 10^{-3}$ кг до $m=984 \cdot 10^{-3}$ кг и $m=1476 \cdot 10^{-3}$ кг приводит к соответственному изменению L : 19,18 %, 18,13 % и 17,08 %.

Полученные результаты имитационного моделирования в программном комплексе *Altair EDEM* свидетельствуют о заметном влиянии рассматриваемых параметров составной конструкции шпальтового сита на эффективность процесса грохочения и снижение лещадности продукта грохочения. Установлено, что составная конструкция шпальтового сита за счёт увеличения ширины щели первой просеивающей поверхности, по отношению к значению d , и предварительного выделения на ней частиц размером, превышающим $1,25d$, позволяет увеличивать подачу материала с 4 до 10 слоев при потере эффективности до 3,22%. Криволинейная волнистая форма щелевых отверстий второй просеивающей поверхности способствует более эффективному отделению лещадных частиц.

Для установления эффективности применения шпальтового сита рассматриваемой конструкции проведены исследования процесса

грохочения материала на его конструктивном прототипе в программном комплексе *Altair EDEM*. Отличительной особенностью этого прототипа является наличие одной просеивающей поверхности с шириной щелевых отверстий, равной l_n [5]. Характеристики вариантов исполнения грохота и процессов грохочения материала, включающего 20 % содержание лещадных частиц, приведены в табл. 6.

Сравнивая приведенные в табл. 6 характеристики процессов грохочения материала на грохоте по вариантам исполнения 1.1 и 2.1 необходимо отметить преимущество применения составной конструкции шпальтового сита: эффективности E характеризуется соответственно значениями 95,27 % и 89,81 % (разница 5,46 %), а лещадность L имеет достаточно близкие значения - 18,59 % и 19,68 % (разница 1,09 %). Процессы грохочения материала по вариантам 1.2 и 2.2 характеризуются значениями эффективности E - 89,47 % и 76,19 %, соответственно, (разница 13,28 %); а также лещадностью L продукта грохочения - 15,15 % и 18,94 %, соответственно, (разница 3,79 %). Таким образом, приведенные значения характеризуют грохот с составной конструкцией шпальтового сита, в сравнении с прототипом, как более эффективный по показателям эффективности процесса грохочения и лещадности продукта грохочения. Так как стремление улучшить один из этих показателей приводит к ухудшению другого, то в случае применения результатов исследования в производственных условиях необходимо исходить из целесообразности предпочтения или рационального сочетания рассматриваемых характеристик процесса грохочения.

Таблица 6

Характеристики вариантов исполнения грохота и процессов грохочения

Вариант исполнения грохота	Масса материала, m , 1×10^{-3} г	Ширина щелевых отверстий просеивающей поверхности		Шаг волны щелевых отверстий второй просеивающей поверхности, k , мм	Эффективность грохочения, E , %	Лещадность продукта грохочения, L , %
		первой, l , мм	второй, l_n , мм			
Со шпальтовым ситом составной конструкции, вариант 1.1	492	6,6	5	12	95,27	18,59
Со шпальтовым ситом прототипа, вариант 2.1	492	5	—	—	89,81	19,68
Со шпальтовым ситом составной конструкции, вариант 1.2	1476	5,5	5	12	89,47	15,15
Со шпальтовым ситом прототипа, вариант 2.2	1476	5	—	—	76,19	18,94

Выводы.

1. Рассмотрены причины распространения вибрационных грохотов на технологических комплексах предприятий ряда обрабатывающих

отраслей промышленности и возможности повышения эффективности их работы. Из основных параметров, характеризующих работу вибрационного грохота, обоснованно выделены характе-

ристики качества процесса грохочения: его эффективность E и лещадность L продукта грохочения.

2. Приведено описание особенностей составной конструкции шпальтового сита, направленных на повышение эффективности E процесса грохочения содержащего частицы лещадной формы материала и снижение лещадности L продукта грохочения, обоснован выбор основных факторов, оказывающих наибольшее влияние на эти параметры.

3. Обоснована необходимость проведения исследований процесса грохочения материала с лещадной формой частиц на грохоте с составной конструкцией шпальтового сита. С использованием программного комплекса *Altair EDEM* и метода математического планирования экспериментов проведено имитационное моделирование процесса грохочения материала с 20 % содержанием частиц лещадной формы.

4. Для грохота с составной конструкцией шпальтового сита с использованием полученных уравнений регрессии установлены закономерности изменения эффективности E и лещадности L от шага k волны щелевых отверстий второй просеивающей поверхности, ширины l щелевых отверстий первой просеивающей поверхности, массы m подаваемого материала. Определены рациональные значения этих факторов, обеспечивающих максимальное значение эффективности процесса грохочения E и минимальное значения лещадности L продукта грохочения.

Установлена эффективность работы грохота с составной конструкцией шпальтового сита по сравнению с его прототипом: эффективность E процесса грохочения увеличивается с 89,81 % до 95,27 % при соответственных значениях лещадности L продукта грохочения - 18,59 % и 19,68 %; лещадность L уменьшается с 18,94 % до 15,15 % при соответственных значениях эффективности E - 89,47 % и 76,19 %. Результаты исследования позволяют осуществить выбор варьируемых факторов исходя из рационального сочетания рассматриваемых характеристик процесса грохочения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дружинин О.А., Ковалев О.А., Салтанов В.Г., Чирова Ю.О. Исследование факторов, влияющих на эффективность грохочения, и построение математической модели процесса. // Молодёжная научная весна. Материалы XLIV научно-практической конференции молодых исследователей. Забайкальский государственный университет. 2017. С. 22–29.
2. Перепелкин М.А., Пилипенко С.С., Кудаш С.В. Влияние угла наклона решета вибрационного грохота на эффективность грохочения рудного материала // Горная промышленность. 2015. № 6. С. 68–69.
3. Вайсберг Л.А., Картавый А.Н., Коровников А.Н. Просеивающие поверхности грохотов: Конструкции, материалы, опыт применения: монография. Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 2005. 252 с.
4. Вайсберг Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М.: Недра, 1986. 144 с.
5. Пат. 225593, Российская Федерация, МПК В07В 1/40, В07В 1/46. Вибрационный грохот / С. И. Ханин, М. А. Малахов, О. С. Мордовская; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова». №2024105121, заявл. 28.02.2024; опубл. 25.04.2024, бюл. №12. 12 с
6. Ханин С.И., Малахов М.А., Мордовская О.С., Анциферов С.И. Исследование эффективности процесса грохочения на вибрационном грохоте с составной конструкцией шпальтового сита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 9. С. 131–140. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-131-2140
7. Реутова Я.И. Совершенствование конструкции роторной дробилки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №. 4. С. 136–139. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-131-2140
8. Zharkevich O.M., Shlyakhov S.V., Nurzhanova O. A., Imasheva K. I. Development and Research of a New Reinforced Design of the Mounting. Material and Mechanical Engineering Technology. 2025. Vol. 1, No. 1. Pp. 28–35. DOI: 10.52209/2706-977X_2025_1_28
9. Shchekin A. V., Mayorov A. M. Automated Determination of MC Codes for Russian Steels in the ISO Classification. Russian Engineering Research. 2024. Vol. 44, No. 6. Pp. 787–792. DOI: 10.3103/S1068798X24701235
10. Discrete Element Modeling - DEM Software. Altair EDEM. [Electronic resource]. URL: <https://altair.com/edem/>. (Accessed 07.08.2025).
11. Xu T.H. Comparative study on the efficiency of vibrating screening parameters based on EDEM. Southern Agricultural Machinery. 2024. Vol. 55 No. 01. Pp. 166–168.
12. Kaiqin Hu. Simulation Study Based on the Influencing Factors of Vibrating Screen Screening Efficiency. Journal of Engineering Research and Reports. 2025. Vol. 27, No. 1. Pp. 92–100. DOI: 10.9734/jerr/2025/v27i11370
13. Hou Y., Li H. Theoretical Study and Simulation of Elliptical Vibrating Screen with Self-Synchronous Drive of Double Eccentric Wheels. Fang Journal of Vibration Engineering and Technologies. 2025. Vol. 13, No. 1. Pp. 123. DOI: 10.1007/s42417-024-01678-5
14. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. Л., «Химия», 1975. 48 с.

15. Рудакова Е.В. Эффективность грохочения // Российская наука и образование сегодня: проблемы и перспективы. 2014. № 3(2). С. 85–87.

16. Львов Е.С. Матвеев А.И. Изучение формирования гранулометрического состава и рас-

крытия минералов при дроблении руд с использованием дробилки многократного динамического действия ДКД-300 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 10. С. 112–116.

Информация об авторах

Ханин Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования. E-mail: dh@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Малахов Михаил Алексеевич, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: ehe912@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мордовская Ольга Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий. E-mail: unique.ox@gmail.com. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

Синица Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: evsinita@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 03.09.2025 г.

© Ханин С.И., Малахов М.А., Мордовская О.С., Синица Е.В., 2026

^{1,*}Khanin S.I., ¹Malakhov M.A., ²Mordovskaya O.S., ¹Sinita E.V.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

²Belgorod State National Research University.

*E-mail: dh@intbel.ru

POSSIBILITIES OF USING COMPOSITE STRUCTURE OF SHEET SIEVE FOR SCREENING OF MATERIALS WITH FLAKY SHAPE OF PARTICLES

Abstract. *Vibration screens, which occupy one of the important places in technological complexes of various industries, are characterized by sufficiently high productivity, reliability and the possibility of fine-tuning classification parameters. Quality characteristics are reasonably distinguished, from the scope of parameters characterizing the screening process: its efficiency and flakiness of the screening product. Description of the features of the composite structure of the shallows sieve aimed at improving the selected parameters is provided, and the selection of the factors that have the greatest influence on them is justified. The needs for study the process of screening of material with the presence of flaky particles on the screen with this sieve, which was carried out using the Altair EDEM software complex and the mathematical planning of experiments methods, was justified. Using the obtained regression equations, the efficiency of the screening process and flakiness of the screening product dependency's from the wave pitch of the slot-out holes of the second screening surface, the width of the slot-out holes of the first screening surface and the mass of the fed material are established. Rational values of these factors are determined, which ensure maximum efficiency value of screening process and minimum value of screening product flakiness. Comparing prototype and screen equipped with a composite structure of the shallows screen, according to the considered quality indicators of the screening process of material with a flaky particle shape, the efficiency of its operation is established.*

Keywords: *vibrating screen, composite sheet screen, process, flakiness of material, screening efficiency.*

REFERENCES

1. Druzhinin O.A., Kovalev O.A., Saltanov V.G., Chirova Yu.O. Investigation of factors affecting screening efficiency and construction of a mathematical model of the process [Issledovanie faktorov, vliyayushchikh na effektivnost' grokho-teniya, i postroenie matematicheskoy modeli

protessa]. Youth Scientific Spring. Materials of the XLIV Scientific and Practical Conference of Young Researchers. Transbaikal State University [Molodyozhnaya nauchnaya vesna. Materialy XLIV nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh issledovateley. Zabaykal'skiy gosudarstvennyy universitet]. 2017. Pp. 22–29. (rus)

2. Perepelkin M.A., Pilipenko S.S., Kudash S.V. Influence of the inclination angle of the sieve of a vibrating screen on the screening efficiency of ore material [Vliyanie ugla naklona resheta vibratsionnogo grokhota na effektivnost' grokhoteniya rudnogo materiala]. Mining Industry [Gornaya promyshlennost']. 2015. No. 6. Pp. 68–69. (rus)
3. Vaisberg L.A., Kartavyi A.N., Korovnikov A.N. Screening surfaces of screens: Designs, materials, application experience: monograph [Proseivayushchie poverkhnosti grokhotov: Konstruktsii, materialy, opyt primeneniya: monografiya]. Saint Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2005. 252 p. (rus)
4. Vaisberg L.A. Design and calculation of vibrating screens [Proektirovanie i raschet vibratsionnykh grokhotov]. Moscow: Nedra, 1986. 144 p. (rus)
5. Patent 225593, Russian Federation, IPC B07B 1/40, B07B 1/46. Vibrating screen [Vibratsionnyy grokhot]. S.I. Khanin, M.A. Malakhov, O.S. Mordovskaya; applicant and patent holder FSEI HE "BSTU named after V.G. Shukhov". No. 2024105121, filed 28.02.2024; published 25.04.2024, Bull. No. 12. 12 p. (rus)
6. Khanin S.I., Malakhov M.A., Mordovskaya O.S., Antsiferov S.I. Investigation of the screening process efficiency on a vibrating screen with a composite slotted sieve design [Issledovanie effektivnosti protsessa grokhoteniya na vibratsionnom grokhote s sostavnoy konstruktsiey shpal'tovogo sita]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9. Pp. 131–140. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-131-140 (rus)
7. Reutova Ya.I. Improvement of the rotor crusher design [Sovershenstvovanie konstruktsii rotornoy drobilki]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 4. Pp. 136–139. DOI: 10.34031/2071-7318-2016-4-136-139 (rus)
8. Zharkevich O.M., Shlyakhov S.V., Nurzhanova O.A., Imasheva K.I. Development and Research of a New Reinforced Design of the Mounting. Material and Mechanical Engineering Technology. 2025. Vol. 1, No. 1. Pp. 28–35. DOI: 10.52209/2706-977X_2025_1_28
9. Shchekin A.V., Mayorov A.M. Automated Determination of MC Codes for Russian Steels in the ISO Classification. Russian Engineering Research. 2024. Vol. 44, No. 6. Pp. 787–792. DOI: 10.3103/S1068798X24701235
10. Discrete Element Modeling – DEM Software. Altair EDEM. [Electronic resource]. URL: <https://altair.com/edem/>. (Accessed 07.08.2025).
11. Xu T.H. Comparative study on the efficiency of vibrating screening parameters based on EDEM. Southern Agricultural Machinery. 2024. Vol. 55, No. 1. Pp. 166–168.
12. Hu K. Simulation Study Based on the Influencing Factors of Vibrating Screen Screening Efficiency. Journal of Engineering Research and Reports. 2025. Vol. 27, No. 1. Pp. 92–100. DOI: 10.9734/jerr/2025/v27i11370
13. Hou Y., Li H. Theoretical Study and Simulation of Elliptical Vibrating Screen with Self-Synchronous Drive of Double Eccentric Wheels. Journal of Vibration Engineering and Technologies. 2025. Vol. 13, No. 1. 123. DOI: 10.1007/s42417-024-01678-5
14. Sautin S.N. Experimental design in chemistry and chemical technology [Planirovanie eksperimenta v khimii i khimicheskoy tekhnologii]. Leningrad: Khimiya, 1975. 48 p. (rus)
15. Rudakova E.V. Screening efficiency [Effektivnost' grokhoteniya]. Russian Science and Education Today: Problems and Prospects. 2014. No. 3(2). Pp. 85–87. (rus)
16. Lvov E.S., Matveev A.I. Study of the formation of granulometric composition and mineral liberation during ore crushing using a multiple dynamic action crusher DKD-300 [Izuchenie formirovaniya granulometricheskogo sostava i raskrytiya mineralov pri droblenii rud s ispol'zovaniem drobilki mnogokratnogo dinamicheskogo deystviya DKD-300]. Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal) [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)]. 2014. No. 10. Pp. 112–116. (rus)

Information about the author

Khanin, Sergey I. DSc, Professor of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: dh@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

Malakhov, Mikhail A. Postgraduate student of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: exe912@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

Mordovskaya, Olga S. PhD, Associate Professor of the Department of Applied Informatics and Information Technologies. E-mail: unique.ox@gmail.com. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Victory, 85.

Sinita, Elena V. PhD, Assistant professor. E-mail: evsinita@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 03.09.2025

Для цитирования:

Ханин С.И., Малахов М.А., Мордовская О.С., Синица Е.В. Возможности применения составной конструкции шпальтового сита для грохочения материалов с лещадной формой частиц // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 7. С. 118–130. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-7-118-130

For citation:

Khanin S.I., Malakhov M.A., Mordovskaya O.S., Sinitsa E.V. Possibilities of using composite structure of sheet sieve for screening of materials with flaky shape of particles. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 7. Pp. 118–130. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-7-118-130