

На правах рукописи



**Анохин Петр Михайлович**

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ  
ФРИКЦИОННЫХ СЕПАРАТОРОВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ  
АСБЕСТОСОДЕРЖАЩИХ РУД**

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО  
«Уральский государственный горный университет».

**Научный руководитель – Потапов Валентин Яковлевич,**  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры горной механики ФГБОУ ВО «Ураль-  
ский государственный горный университет»  
(г. Екатеринбург).

**Официальные оппоненты:**

**Шарапов Рашид Ризаевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой механизации строитель-  
ства ФГБОУ ВО «Национальный исследова-  
тельский Московский государственный строи-  
тельный университет»;

**Шемякин Владимир Сергеевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
генеральный директор ЗАО «НПК «Техноген»,  
(г. Екатеринбург).


**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Уральский федеральный универ-  
ситет имени первого Президента России Б.Н.  
Ельцина» (г. Екатеринбург).

Защита диссертации состоится в зале заседаний Ученого совета  
« 20 » февраля 2019 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета  
Д 212.280.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Уральский государственный  
горный университет» по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ГСП,  
ул. Куйбышева, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте  
<http://www.ursmu.ru> ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный уни-  
верситет».

Автореферат диссертации разослан « 15 » января \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

 М. Л. Хазин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Совершенствование горных машин в последние годы осуществляется за счет введения в рудоподготовительный передел аппаратов предварительного разделения горной массы, позволяющих после первых стадий дробления удалить из технологического процесса пустую породу. Основным недостатком существующих машин, основанных на эффектах взаимодействия горной массы с рабочей поверхностью аппаратов, является то, что разделение горных пород осуществляется не по комплексу физико-механических свойств, а по одному наиболее контрастному признаку – трению, упругости, форме или твердости. Поэтому наиболее перспективным направлением в совершенствовании и проектировании разделительных аппаратов является создание аппаратов, использующих комплекс физико-механических свойств горных пород. Это является актуальной научной проблемой, решение которой имеет важное хозяйственное значение.

### **Степень разработанности темы исследований**

Существенный вклад в развитие теории и методики исследований по определению физико-механических свойств горных пород внесли ученые:

Л. И. Барон, Ф. П. Боуден, Л. Б. Глатман, М. Н. Гольдштейн, Т. И. Елифанов, В. Г. Деркач, Б. В. Дерягин, А. К. Зайцев, Б. М. Логунцов, П. В. Лященко., Н. В. Мельников, Е. З. Позин, С. Д. Померу, М. М. Протодьяконов, Е. Рабинович, В. В. Ржевский, С. А. Рубинштейн, Е. А. Симонян, К. В. Соломин, Д. Тейлор, Е. Н. Фритаг, Р. Т. Шпурр, И. Н. Щедров и др.

Научное развитие теории процессов и машин для разделения и классификации руд дано в работах Е. В. Александрова, М. Д. Барского, И. И. Блехмана, И. И. Быковского, Л. А. Вайсберга, В. Гольдсмита, Г. Ю. Джанелидзе, А. К. Зайцева, В. Б. Карнушина, Б. И. Крюкова, М. Б. Левенсона, Г. И. Линдера и др.

Теоретические основы разделения многокомпонентных продуктов по физическим свойствам минералов на плоскостях рассмотрены в работах Н. К. Тимченко, П. М. Заика и ряда других авторов. При этом мерой упругого взаимодействия частиц при падении на горизонтальную плоскость является только коэффициент восстановления при ударе и не учитывается коэффициент мгновенного трения.

**Идея работы:** Разделение дробленых горных пород для выделения свободного асбестового волокна и кусков пустой породы с учетом взаимосвязи их физико-механических и аэродинамических характеристик.

**Цель темы исследования** – повышение эффективности работы сепаратора.

**Задачи исследований.** Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

1. Выявить наиболее значимые факторы процесса разделения асбесто-содержащих руд для разработки конструкции аэродинамически активного фрикционного сепаратора.

2. Разработать новую модель разделительного аппарата, определить его рациональные конструктивные и режимные параметры.

3. Определить рациональные параметры системы подачи воздуха в зависимости от плотности материала частицы и скорости схода с трамплина, скорости воздушного потока, угла отклонения от горизонтали, силы давления воздуха на частицу.

**Научная новизна** работы заключается:

– в разработке математической модели процесса разделения многокомпонентных продуктов на полочном сепараторе с криволинейным трамплином переменного радиуса, учитывающей случайный характер фрикционных характеристик материалов;

– определении разделительного признака горных пород на основе их физико-механических свойств, позволяющего обосновать конструктивные параметры основных узлов сепаратора.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке математической модели аэродинамически активного аппарата для разделения полезных ископаемых по их фрикционным и упругим характеристикам, а **практическая** – в определении рациональных конструктивных и режимных параметров аэродинамически активного сепаратора, обеспечивающих требуемую эффективность разделения.

**Методология и методы исследований:** общелогические методы (анализ и обобщение научно-технической и патентной информации, индукция, синтез и т. д.), теория подобия, положения теории машин и механизмов, теоретической механики, теории и практики разделения полезных ископаемых по физико-механическим характеристикам, методы математического и физического моделирования, теория вероятности и математическая статистика при проведении экспериментальных исследований.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Обоснование конструктивных параметров сепаратора следует проводить с учетом фрикционных характеристик асбеста и вмещающих пород, а также их «парусности», определяющих кинематику движения частиц.

2. Повышение эффективности работы сепаратора достигается применением криволинейного трамплина с профилем, выполненным по логарифмической спирали.

3. Рациональные параметры работы полочных сепараторов обеспечиваются управлением траектории движения частиц воздушным потоком при полете после схода их с криволинейного трамплина.

**Степень достоверности** основных научных положений, выводов и рекомендаций достигнута корректным использованием теории подобия, методов математического и физического моделирования, а также положений теории вероятности и математической статистики, современного вычислительного оборудования и компьютерного программного обеспечения, апробированными методами экспериментальных исследований на физической модели сепаратора. Достоверность подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, относительное расхождение которых не превышает 15 % при доверительной вероятности 0,85– 0,95).

**Апробация результатов.** Результаты работы, её основные положения были доложены, обсуждены и одобрены на международных научно-практических конференциях: «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (г. Екатеринбург, 2015), «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (г. Екатеринбург, 2015 – 2016), «Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья» (Москва, 2015), симпозиумах «Неделя горняка» (г. Москва, НИТУ МИСиС, 2014 – 2017).

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач исследований, разработке методики исследования аппаратов, определении их параметров при проектировании и реализации принципиально новых конструкций аппаратов, организации и непосредственном участии в выполнении исследований и испытаний, в анализе и обобщении полученных результатов.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы и практические рекомендации использованы на экспериментально площадке 6 ОФ комбината ОАО «Ураласбест» при разработке аппаратов и технологических решений для разделения руд.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 7 работ в ведущих рецензируемых научных журналах по группе научных специальностей 05.05.06 – Транспортное, горное и строительное машиностроение.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 129 наименований, содержит 132 страницы текста, 57 рисунков, 21 таблицу и 3 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** выполнен анализ конструкций разделительных аппаратов для сухого разделения руд. Разделительные устройства для сухого разделения классифицируют по различным признакам: способу подачи материала, конструктивным особенностям рабочего органа, по характеру движения воздушного потока и т. д.

Аппараты с неподвижными разделяющими поверхностями отличаются дешевизна изготовления, простота обслуживания и надежность в работе, но они обеспечивают невысокую эффективность разделения. Основным преимуществом обогатительных плоскостей является то, что они обеспечивают высокие технологические показатели при полном отсутствии механизмов и энергопотребления.

К аппаратам с *движущейся рабочей поверхностью* относят ленточные, дисковые и барабанные сепараторы трения. К недостаткам дисковых сепараторов относят значительное истирание материала, чувствительность к составу и нагрузке, необходимость тщательного надзора и регулировки, а также недостаточную разделительную способность.

Для разделения частиц с использованием различий в форме компонентов могут использоваться следующие способы: грохочение на специально оформленной просеивающей поверхности; разделение с использованием различий в коэффициентах трения частиц различной формы; разделение по скорости движения частиц в среде, обусловленной различиями в форме частиц; разделение по площади контакта частицы с рабочей поверхностью аппарата.

Для разделения горной массы *по упругости* иногда применяют сепараторы с наклонной стальной плитой и сепараторы метательного типа. Основным недостатком таких устройств – низкая эффективность классификации, невозможность использовать для разделения волокнистого асбеста и чешуйчатых материалов (слюд).

*Комбинированное разделение* горной массы по трению и упругости основано на использовании различия в коэффициенте восстановления и трения при ударе.

Аппараты для разделения горных пород с использованием воздуха реализуют различие в «парусности» плоских и округлых частиц.

Анализ конструкций существующих разделительных устройств показал, что они используют одну или две физические характеристики горных пород, что приводит к относительно низкой эффективности классификации. Это позволило выбрать направление для дальнейшего совершенствования их конструкций – объединение в одной конструкции нескольких аппаратов, позволяющих разделить горные породы по комбинации физических характеристик компонентов, слагающих эти породы, и определить задачи исследований.

**Во второй главе** приведены результаты исследования физико-механических свойств горных пород, обладающих «парусностью».

Степень различия кусков по массовой доле в них полезного компонента принято оценивать по показателю контрастности  $M$ . Величина показателя контрастности может изменяться от 0 до 2. Чем выше значение  $M$ , тем руда

более подготовлена к разделению на богатые и бедные продукты по содержанию полезного компонента.

Величина показателя контрастности изученных классов крупности асбестовых руд лежит в пределах 0,94-1,67 (табл.1). По этому признаку асбестовые руды относят к контрастным и высококонтрастным, что свидетельствует о потенциально хорошей возможности разделения руды в крупнокусковом виде.

Закономерности процесса разделения асбестосодержащих продуктов по различию в коэффициентах трения, используемому при разделении на наклонных плоскостях, изучались в институте «УРАЛМЕХАНОБР».

Породные частицы имеют кинетический коэффициент трения  $f = 0,21 \dots 0,24$ , коэффициент восстановления  $k = 0,38-0,44$ ; коэффициент мгновенного трения  $\lambda = 0,64 \dots 0,70$ ; а для асбеста –  $f = 0,24 \dots 0,41$ ,  $k = 0,25-0,39$ ,  $\lambda = 0,70 \dots 0,88$ .

С увеличением крупности частиц уменьшаются статический и кинетический коэффициенты трения. Различия в кинетических коэффициентах трения асбеста и породы по стали и резине достаточны для их разделения. С увеличением крупности разница в коэффициентах трения частиц монофаз снижается. Это можно объяснить тем, что рост крупности частиц снижает их однородность по составу и форме и, как следствие, – разницу в коэффициентах трения.

Среди вышерассмотренных признаков, используемых при разделении материалов, подвергаемых разделению в воздушном потоке, является различная скорость витания асбестового волокна и породы (рис.1).

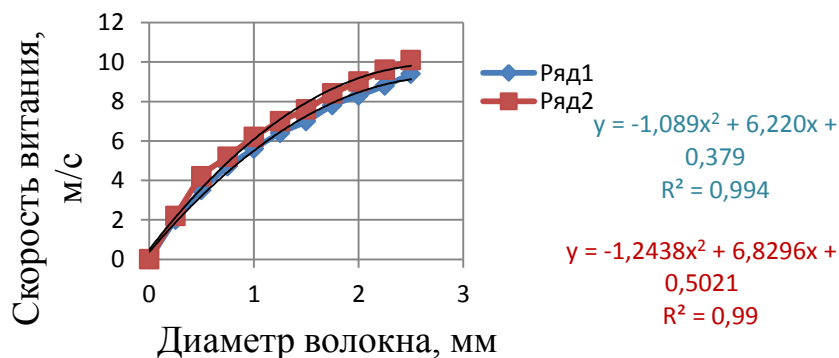


Рис.1. Зависимость скорости витания асбеста от диаметра волокна:  
1 – антофиллит-асбеста; 2 – хризотил-асбеста

Экспериментальные исследования проводились с недеформированными волокнами антофиллит-асбеста плотностью веса  $3,0 \text{ г/см}^3$  и хризотил-асбеста плотностью  $2,45 \text{ г/см}^3$ .

Анализ экспериментальных данных показывает, что скорость витания нелинейно зависит от эквивалентного диаметра частиц.

Анализ и последующий выбор признаков разделения был проведен по различным показателям: эффективности признака (П); корреляционному от-

ношению ( $\eta$ ) между величиной физического признака разделения ( $\xi$ ) и содержанием полезного компонента ( $x$ ); выходу хвостов при ограничении содержания в них полезного компонента ( $\gamma_{хв}$ ).

Чем больше показатель эффективности приближается к единице, тем теснее корреляция между физическим признаком и содержанием асбеста.

Таблица 1

**Показатели эффективности признаков разделения асбестовой руды**

Признак разделения	Массовая доля асбеста, %	Показатель эффективности признака $P_i$	Уравнение регрессии $x = \xi$	Корреляционное отношение $\eta$	Ранг признака	По алгоритму отбора и упорядоченности признака	
						информационная значимость признака	ранг признака
1	2	3	4	5	6	7	8
Массовая доля магнетита	0,74 0,40	0,57 0,64	$y = -1,67 + 1,01x - 0,04x^2$ $y = -0,12 + 0,18x - 0,001x^2$	0,57 0,30	4	0,086	6
Плотность	1,04	0,43	—	Связи нет	8	0,052	8
Коэффициент отражения	0,46	0,55	$y = -1,26 + 0,16x - 0,003x^2$	0,69	3	0,128	3
Добротность контура	0,69	0,44	$y = -0,27 + 0,24x - 0,003x^2$	0,52	6	0,108	4 – 5
Удельная магнитная восприимчивость	0,40	0,83	$y = -0,38 + 0,39 \cdot 10^{-5}x - 0,047x + 0,0002x^2$	0,53	5	0,136	2
Избирательное дробление	0,45	0,56	$y = -3,02 - 0,047x + 0,0002x^2$	0,51	7	0,108	4 – 5
Фрикционная характеристика	0,8	0,96	$y = -0,44 + 0,33/x$	0,86	2	0,156	1 – 2
Скорость витания	0,82	0,98	$y = -1,56 + 0,18x - 0,002x^2$	0,99	1	0,158	1 – 2

На основании анализа информативности признаков выявлено, что самыми информативными признаками являются фрикционные характеристики асбеста и вмещающих пород, а также «парусность». Таким образом, наиболее перспективным направлением в совершенствовании и проектировании разделительных аппаратов является разработка аппаратов, использующих комплексную физико-механическую характеристику горных пород, что обеспечивает более полное разделение полезных ископаемых в одном аппарате.

*Этим доказывается первое научное положение.*



**В третьей главе** приводится математическая модель рабочего процесса аэродинамически активного фрикционного сепаратора для разделения руд, обладающих «парусностью».

Фрикционный барабанно-полочный сепаратор состоит из нескольких механических устройств, которые разделяют частицы обогащаемого материала по различным признакам. Общий вид сепаратора представлен на рис. 2. Сепаратор включает: наклонную плоскость 1; ребра 2; механизм, изменяющий угол наклона плоскости, 3; трамплин с дефлекторами 4; механизм, изменяющий угол наклона трамплина относительно наклонной плоскости, 5; барабан 6; центробежный вентилятор 7 с подвижными диффузорами 11; механизм перемещения полки 8; механизм, изменяющий угол наклона рёбер относительно наклонной плоскости 9; воздухозаборное устройство 10; приёмник для частиц, обладающих парусностью, 12; приёмник для промежуточной фракции 13; приёмник для пустой породы 14. На наклонной полке (разгонной) происходит подготовка к разделению частиц с различными коэффициентами трения. Криволинейный трамплин, являясь продолжением наклонной плоскости, есть второй этап первой стадии подготовки частиц к разделению. При выходе частиц на участок свободного полета они имеют различные скорости. Таким образом, образуется веер разделения – это второй этап первой стадии разделения. Вторая стадия разделения происходит на вращающемся барабане.

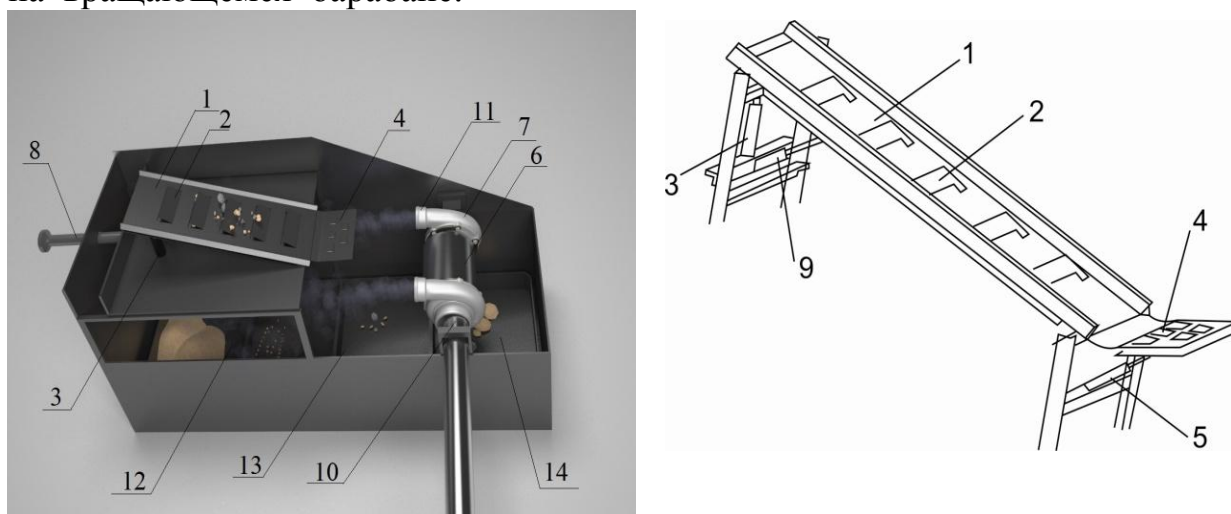


Рис.2. Фрикционный барабанно-полочный сепаратор

Испытания физической модели сепаратора с криволинейным трамплином цилиндрической формы показали, что веер разделения после схода частицы недостаточен для дальнейшего эффективного разделения на барабане. Одним из путей повышения эффективности разделения за счет увеличения веера частиц является перераспределение соотношения вертикальной и горизонтальной составляющих скорости схода частицы с трамплина. Для реализации этого предположения нами был разработан сепаратор с криволинейным трамплином переменной кривизны.

Получив скорость, равную  $V_A$ , частица выходит на криволинейный участок дуги  $AB$  (рис. 3). Свободный полет частицы начинается из точки  $B$  со скоростью  $V_B$ , направленной по касательной к линии криволинейного трамплина в данной точке. В настоящей работе в качестве такой поверхности выбрана логарифмическая спираль  $r = ke^{k_1\theta}$ , где  $r$  и  $\theta$  – полярные координаты;  $k, k_1$  – постоянные параметры.

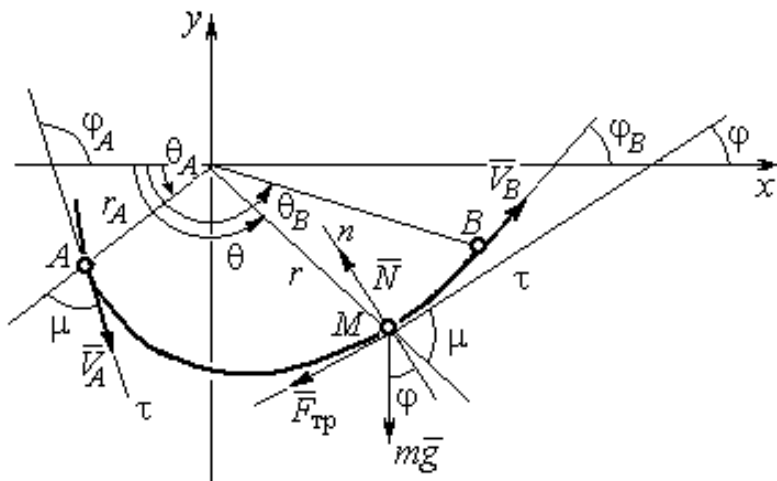


Рис.3. Схема криволинейного трамплина

Уравнения движения материальной точки массой  $m$  под действием силы тяжести, силы трения и реакции опоры в проекции на оси естественной системы координат ( $\tau Mn$ ) (см. рис.3), написанные для произвольного положения  $M$  на траектории, имеют вид:

$$\begin{aligned} m \frac{dV}{dt} &= -mg \sin \varphi - F_{\text{тр}} = -mg \sin \varphi - fN, \\ \frac{mV^2}{\rho} &= -mg \cos \varphi + N, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $V$  – скорость точки;  $f$  – коэффициент трения скольжения;  $N$  – реакция опоры;  $\rho$  – радиус кривизны спирали в месте, где находится материальная точка  $M$ ;  $\varphi$  – угол наклона касательной  $M\tau$  к положительному направлению оси  $Ox$ ;  $r, \theta$  – полярные координаты.

Радиус кривизны траектории зависит от положения полярного угла  $\theta$ :

$$\rho = \frac{(r^2 + r'^2)^{3/2}}{r^2 + 2r'r'' - rr'''} = \left( \sqrt{1 + k_1^2} \right) e^{k_1\theta}. \quad (2)$$

Подставляя выражение радиуса кривизны в выражение (1), получим уравнение движения частицы в окончательном виде:

$$\frac{dV^2}{d\varphi} + 2fV^2 = -2g \left( \sqrt{1 + k_1^2} \right) e^{k_1(\varphi - \mu + \pi)} \left( \sin \varphi + f \cos \varphi \right). \quad (3)$$

Уравнение представляет собой неоднородное линейное дифференциальное уравнение первого порядка относительно  $V^2$  по переменной  $\varphi$ .

В результате общее решение дифференциального уравнения (3) имеет вид

$$V^2 = Ce^{-2f\varphi} + e^{k_1(\varphi-\mu+\pi)} (A\sin\varphi + B\cos\varphi). \quad (4)$$

При  $V = V_A$ ,  $\theta = \theta_A$ ,  $\varphi = \varphi_A = -\alpha$  константа  $C$  находится из уравнения:

$$C = V_A^2 e^{2f\alpha} - e^{k_1\theta_A+2f\alpha} [A_1\sin\alpha + B_1\cos\alpha]. \quad (5)$$

Угол вектора скорости частицы при сходе с трамплина:

$$\varphi_B = \theta_B + \mu - \pi. \quad (6)$$

В практических расчётах положение точки удобнее определять не углом наклона касательной  $\varphi$ , а полярным углом  $\theta$ . Окончательно скорость точки в зависимости от её положения, определяемого полярным углом, определяется выражением:

$$V_B^2 = Ce^{-2f(\theta+\mu-\pi)} + e^{k_1\theta} \left( \frac{2gk \left[ -f \sqrt{1+k_1^2} \cos(\theta+\mu-\pi) - \frac{2gk \sqrt{1+k_1^2}}{1+k_1+2f} \sin(\theta+\mu-\pi) \right]}{1+k_1+2f} \right). \quad (7)$$

Для проверки модели произведены расчёты скорости точки при движении её по логарифмической спирали.

Для  $\alpha = 30^\circ$ ,  $k = 78$  мм,  $r_A = 100$  мм,  $f = 0,4$ ,  $V_A = 3$  м/с, получено:  $\mu = 77,4^\circ$ ,  $k_1 = 0,22$ ,  $\theta_A = 72,6^\circ$ ,  $\theta_B = 125,0^\circ$ ,  $V_B = 1,56$  м/с.

Используя закон сохранения энергии и дифференциальное уравнение движения частицы при свободном полете, определим расстояние падения частицы на горизонтальную плоскость, отсчитанную от кромки трамплина. Оно оказалось равным 43 см. Для хромита, имеющего коэффициент трения, равный 0,38...0,42, экспериментально определенное на физической модели это расстояние равно 41 см. Для других образцов горных пород также наблюдалось незначительное расхождение между экспериментальными и теоретическими результатами.

Таким образом, математическая модель адекватна реальному процессу, что позволяет определять рациональные параметры полочного сепаратора с криволинейным трамплином, который обеспечивает большой веер разделения и, соответственно, эффективность процесса.

*Этим доказывается второе научное положение.*

Дальнейшее совершенствование сепаратора с криволинейным трамплином переменного радиуса с целью увеличения веера разделения материала перед попаданием его на барабан было осуществлено путем снабжения барабана вентилятором.

На рис. 4 представлена расчетная схема при движении частицы в воздушном потоке при сходе её с криволинейного трамплина фрикционного сепаратора.

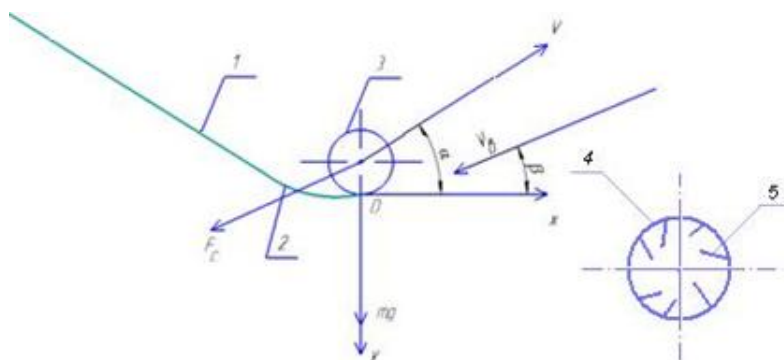


Рис. 4. Схема действия сил на частицу:

1 – разгонная плоскость; 2 – трамплин; 3 – частица; 4 – барабан; 5 – лопадки вентилятора

Свободный полет частицы начинается из точки  $B$  (см. рис.3) со скоростью  $V_B$ , направленной по касательной к линии криволинейного трамплина в данной точке.

Согласно закону Ньютона, векторную силу давления воздуха на частицу горной породы по горизонтальной и вертикальной оси можно представить в виде:

$$F_{cx} = AC\rho_B(V\cos\alpha + V_1\cos\beta)^2; \quad (8)$$

$$F_{cy} = AC\rho_B(-V\sin\alpha + V_1\sin\beta)^2, \quad (9)$$

где  $A = \pi d^2/4$  – площадь проекции частицы,  $m^2$ ;  $V$  – вектор скорости частицы;  $d$  – диаметр частицы, м;  $C$  – коэффициент обтекаемости («парусности»);  $\rho_B$  – плотность воздуха,  $\alpha$  – угол наклона скорости частицы при сходе с трамплина к оси  $Ox$ , град;  $\beta$  – угол наклона силы давления воздуха к оси  $Ox$ , град;  $V_1$  – скорость воздуха, поступающего от вентилятора, м/с.

Движение частицы под действием указанных сил в осях  $X Y$  описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} mx &= -a(V\cos\alpha + V_1\cos\beta)^2 \\ my &= mg + a(-V\sin\alpha + V_1\sin\beta)^2, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $a = AC\rho_B$ ;  $m$  – масса частицы, кг.

В первом приближении примем, что частица имеет сферическую форму. Так как скорость схода частицы с трамплина значительно меньше скорости воздуха, подаваемого вентилятором, то система уравнений (10) приобретает вид:

$$\begin{aligned} x + k_1x &= -k_2 \\ y + k_3y &= k_4 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{3c}{d} \frac{\rho_B}{\rho_M} V_1 \cos\beta \cos\alpha & k_3 &= \frac{3c}{d} \frac{\rho_B}{\rho_M} V_1 \sin\beta \sin\alpha \\ k_2 &= \frac{1,5c}{d} \frac{\rho_B}{\rho_M} V_1^2 \cos^2\beta & k_4 &= \frac{1,5c}{d} \frac{\rho_B}{\rho_M} V_1^2 \sin^2\beta + g \end{aligned}$$

где

$\rho_M$  – плотность материала частицы,  $кг/м^3$ .

Интегрируя уравнения системы (11), получим:

$$\begin{aligned}
 x &= \left( (V_H \cos \alpha + \frac{k_2}{k_1}) k_1^{-1} \right) 1 - e^{-k_1 t} - \frac{\cos \beta V_1}{2 \cos \alpha} t \\
 x &= \left( V_H \cos \alpha + \frac{k_2}{k_1} \right) e^{-k_1 t} - \frac{\cos \beta V_1}{2 \cos \alpha} \\
 y &= \left( (V_H \sin \alpha + \frac{k_4}{k_3}) k_3^{-1} \right) 1 - e^{-k_3 t} + \frac{k_4}{k_3} t \\
 y &= \left( V_H \sin \alpha - \frac{k_4}{k_3} \right) e^{-k_3 t} + \frac{k_4}{k_3}.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Свободный полет частицы заканчивается ударом о барабан. В вышеприведенных уравнениях имеются переменные, которые являются случайными величинами. Это: 1. Начальная скорость частицы перед началом свободного полета  $V_H$ . Она зависит от коэффициентов трения частицы о разгонную плоскость и криволинейный трамплин. 2. Плотность частицы  $\rho_m$ . 3. Размеры частицы –  $d$ .

Аналитически однозначно описать кинематику частицы при свободном полете не представляется возможным, поэтому была разработана имитационная модель, которая была реализована на ПЭВМ.

Характеристики частиц (коэффициенты трения, восстановления, плотность, размеры) соответствовали асбестовой руде крупностью +2-50 мм.

На рис. 5 и 6 приведены траектории движения частиц асбестовой руды (серпентинита) примерно 10 % и пустой породы (габбро, диорита, перидотита, дунита) – 90 %.

Ось барабана имеет координаты:  $X = 0,29$  м;  $Y = 0,55$  м.

Скорости движения воздуха изменялись от 0 до 10 м/с,

угол  $\beta = 0 \dots 90$  град, угол наклона разгонной плоскости  $\alpha = 40$  град,

начальный радиус дуги трамплина 120 мм, угол дуги трамплина 60 град.

В результате моделирования установлено, что частицы меньшей плотности (содержащие асбест) быстрее теряют горизонтальную составляющую скорости и попадают на барабан левее вертикальной оси симметрии. Это приводит к отбрасыванию их в левую емкость, где собирается асбест. Направление движения воздуха для плотности горной породы 3000...2500 кг/м<sup>3</sup> практически не влияет на абсциссу точки контакта частицы с барабаном. Следовательно, регулировать процесс разделения на второй стадии поворотом направления движения воздухом нецелесообразно.

На рис.7 приведены зависимости количества частиц, упавших левее барабана от скорости воздуха при различных углах наклона воздушной струи.

Из рис. 7 видно, что при скорости воздуха 5 м/с для принятого расположения барабана относительно трамплина, примерно 10 % от всех частиц, отделяется от всей массы. Это соответствует практически полному извлечению серпентинита из горной породы.

Анализируя рис. 7, можно сделать следующий вывод: регулируя скорость воздуха вентилятора, возможно разделять породу и руду, отличающиеся на 20 % коэффициентами трения, восстановления и плотностью.

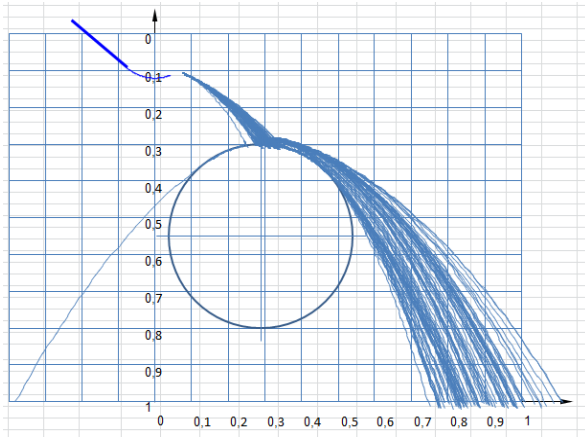


Рис. 5. Траектория движения частиц при скорости воздуха 0 м/с и угле  $\beta = 0$  град

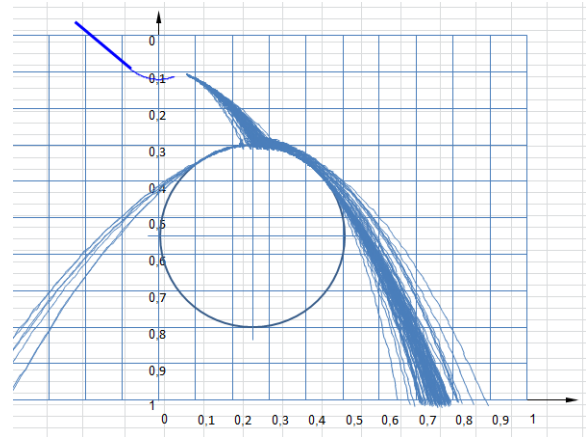


Рис. 6. Траектория движения частиц при скорости воздуха 5 м/с и угле  $\beta = 0$  град

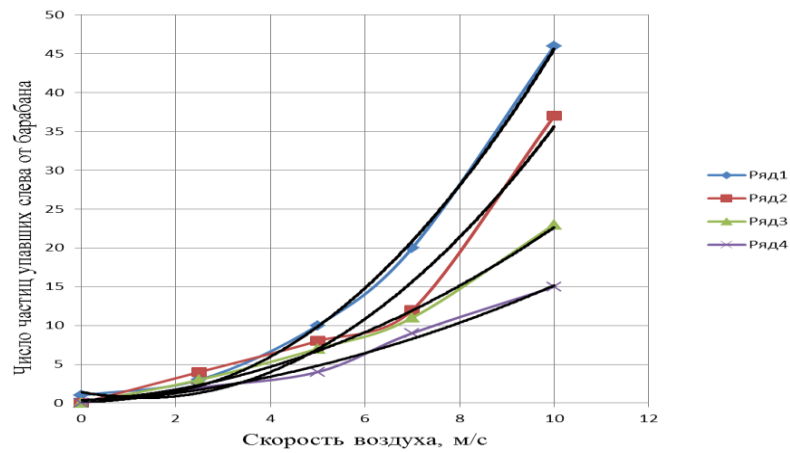


Рис. 7. Зависимость количества частиц (в %), упавших левее барабана от скорости воздуха:  
Ряд 1:  $\beta = 0$ ; Ряд 2:  $\beta = 30$ ; Ряд 3:  $\beta = 60$ ; Ряд 4:  $\beta = 90$

На рис. 8 приведена зависимость количества частиц (в %), упавших левее барабана от плотности горной породы.

Скорость воздуха составляла 5 и 7 м/с, угол наклона воздушной струи к горизонту  $\beta = 0$ , коэффициенты трения породы 0,41...0,23, коэффициент «парусности» равен 0,8.

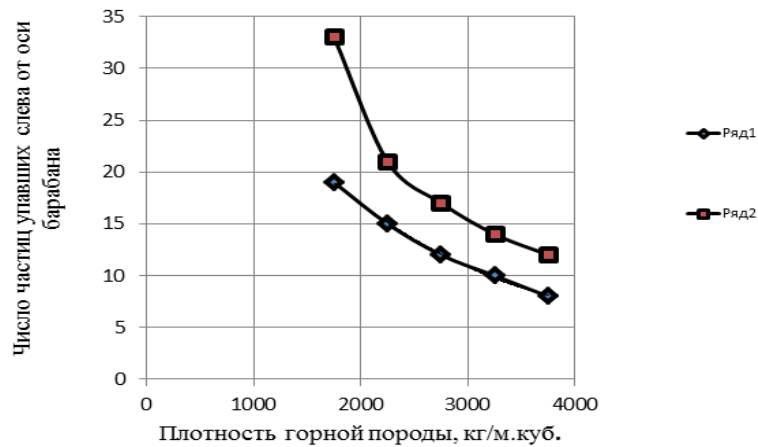


Рис. 8. Зависимость числа частиц, упавших левее оси барабана, от их плотности при различной скорости воздуха: 1 ряд  $-V_B = 5$  м/с; 2 ряд  $-V_B = 7$  м/с

Из рис. 8 видно, что при одинаковых коэффициентах трения, скорости воздуха увеличение плотности породы приводит к уменьшению величины веера падения частиц.

**В четвертой главе** приведено экспериментальное исследование процесса разделения мелкокусковой горной породы на физической модели, имеющей параметры: длина наклонной плоскости 1,25 м; угол наклона плоскости 25...45 град; центральный угол трамплина 90...120 град; ширина полки 500 и 800 мм.

В результате испытаний установлено, что при прочих равных условиях веер разделения у сепаратора с трамплином, выполненным по логарифмической спирали, казался больше, чем у сепаратора с цилиндрическим трамплином, на 30...40 %. Кроме того, этот веер сдвинулся влево от кромки трамплина на 5...15 см. Это свидетельствует о возможности более точно отделять пустую породу от полезного ископаемого.

На рис. 9 приведена гистограмма распределения по отсекам асбестовой руды. Длина отсека 10 см. Правая граница 3-го отсека (ящика) находится на нулевой отметке – под линией схода материала с трамплина. Правая граница 6-го ящика находится на вертикальной оси симметрии барабана.

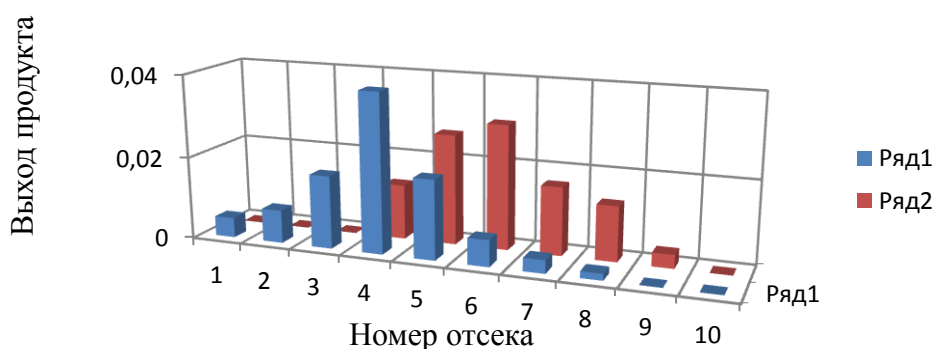


Рис. 9. Гистограмма распределения выхода асбеста:  
ряд 1 – скорость воздуха равна 7 м/с; ряд 2 – скорость воздуха равна нулю

Из рис. 9 видно, что аэродинамически активный сепаратор при прочих равных условиях отделяет практически весь (95 %) свободный асбест, а при скорости воздуха, равной нулю, выделяется не более 70 % асбеста.

Вторым этапом исследований на физической модели было определение факторов и их влияния на процесс разделения кусковой горной массы. Испытания проводились с кусками серпентинита крупностью – 40 +20 мм. Для этого был изготовлен стальной барабан диаметром 500 мм. Окружная скорость изменялась от 0,5 до 3 м/с.

Условия испытаний соответствовали реальному опытно-промышленному сепаратору АО «НИИпроектасбест».

Частицы серпентинита вертикально падали на барабан с различной скоростью ( $V_y$ ). Горизонтальная составляющая скорости ( $V_x$ ) частиц в момент

начала удара была равна нулю. Коэффициент восстановления серпентинита был определен ранее и составил 0,01...0,05.

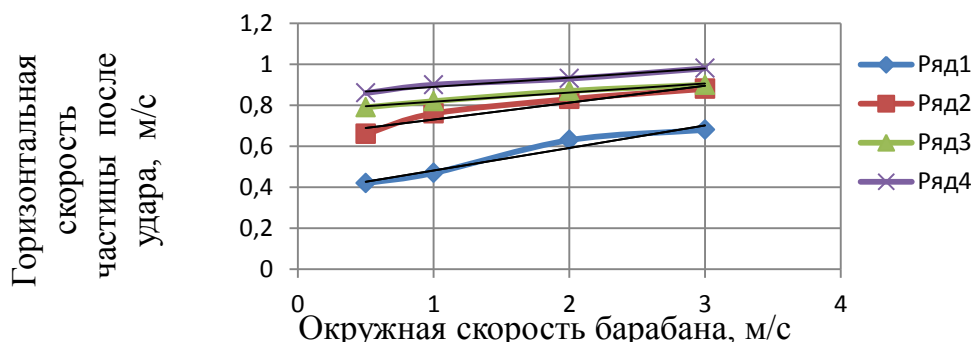


Рис.10. Зависимость горизонтальной скорости частицы после удара от окружной скорости барабана:  
 ряд 1 –  $V_y = 1,0$  м/с; ряд 2 –  $V_y = 1,42$  м/с; ряд 3 –  $V_y = 1,72$  м/с; ряд 4 –  $V_y = 2,0$  м/с

На рис. 10 приведены графики зависимости горизонтальной скорости частицы после удара от окружной скорости барабана.

Установлено, что с увеличением вертикальной скорости частицы возрастает её горизонтальная скорость после удара, т. е. также возрастает величина ударного импульса силы в горизонтальной плоскости. В следующей серии экспериментов в качестве функции отклика принят ударный импульс в горизонтальной плоскости, который определяет направление отскока частицы от барабана. В качестве варьируемых факторов приняты: окружная скорость вращения барабана ( $V_0 - x_1$ ), вертикальная скорость частицы при падении на барабан ( $V_y - x_2$ ), коэффициент трения частицы о барабан ( $f - x_3$ ).

Диаметр барабана был равен 500 мм.

Интервалы варьирования факторов приняты исходя из предыдущих экспериментов:  $V_0 = 1...3$  м/с,  $V_y = 1...2$  м/с,  $f = 0,39...0$ .

Целевая функция имеет вид:

$$y = 0,865 + 0,11x_1 + 0,112x_2 + 0,0425x_3 + 0,0125x_1x_2 + 0,0325x_1x_3 + 0,0325x_2x_3 + 0,0765x_1x_2x_3. \quad (13)$$

Адекватность модели (13) проверялась по критерию Фишера:

Так как  $F = 0,36$ ,  $F_{кр} = 3,75$ , то модель с 95 % вероятностью адекватна.

Регрессионное уравнение (13) показывает, что для отбрасывания частицы влево от вертикальной оси барабана необходимо, чтобы горизонтальный импульс силы был больше произведения её массы и горизонтальной составляющей скорости перед ударом о барабан.

Для выделения частиц серпентинита крупностью до 40 мм необходима скорость воздуха не меньше 5 м/с. При этом породные частицы крупностью меньше 5 мм также попадут в концентрат, что требует повторной стадии разделения.



Отскок частиц влево от вертикальной оси барабана возможен, если отношение вертикальной составляющей скорости при ударе к горизонтальной для серпентинита больше 1,6, для породных – больше 1,7.

Это отношение возрастает с уменьшением коэффициента трения.

В табл. 2 приведены результаты имитационного моделирования процесса разделения асбестосодержащей руды на аэродинамически активном сепараторе.

Таблица 2

**Результаты расчета параметров сепарации**

Скорость воздуха, м/с	Масса концентрата, кг	Масса хвостов, кг	$X_A$ , м	$Y_A$ , м	Выход концентрата, %
0	0,3	3,03	0,3	0,55	9,0
0	0,15	2,9	0,3	0,6	4,9
4	0,24	3,8	0,3	0,6	5,9
6	0,49	2,62	0,3	0,6	15,7

Анализ результатов расчета, приведенных в табл. 2, показывает, что абсцисса оси барабана может находиться от 0,29 до 0,31 м, а ордината – от 0,55 до 0,6 м. При этом увеличение абсциссы при постоянной ординате приводит к увеличению выхода концентратов и их разубоживанию.

Увеличение ординаты приводит к возрастанию вертикальной скорости контакта частиц с барабаном и, соответственно, выходу концентрата. Возрастание скорости воздуха приводит к уменьшению горизонтальной составляющей скорости при контакте и выходу концентрата.

*Таким образом, подтверждается третье научное положение.*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, на базе выполненных исследований, решена актуальная задача повышения эффективности работы аэродинамически активного барабанно-полочного сепаратора за счет выбора рациональных параметров и совершенствования конструкции на основе уточненной математической модели рабочего процесса. Основные научные выводы и практические рекомендации заключаются в следующем:

1. Разработана имитационная модель разделения кусковых материалов на фрикционном аэродинамически активном барабанно-полочном сепараторе, основанная на наиболее информативных признаках, которыми являются фрикционные и аэродинамические характеристики дробленых асбестосодержащих пород.

2. Имитационным моделированием установлено, что эффективность рабочего процесса сепаратора определяется величиной веера падения частиц, который является случайной величиной, зависит от ряда факторов:

- а) параметров трамплина (радиуса, длины и формы);
- б) величины и направления скорости частицы в момент схода с трамплина;
- в) ординаты точки удара частицы о барабан, зависящей от координат оси и радиуса барабана;
- г) координат точки схода частицы с трамплина и начальной скорости частицы;
- д) величины коэффициентов восстановления и трения при ударе;
- е) угловой скорости и радиуса барабана.

3. Определен диапазон рациональных конструктивных параметров аэродинамически активного барабанно-полочного сепаратора: диаметр барабана 0,5...1,0 м; длина разгонной полки 1 м; угол наклона полки 35...40°; угловая скорость вращения барабана 10...13 рад/с; скорость воздуха 5...7 м/с; угол отклонения от горизонтали силы давления струи воздуха на частицу  $\beta = 0^\circ$ ; профиль трамплина – логарифмическая спираль.

4. Аэродинамически активный фрикционный сепаратор при прочих равных условиях увеличивает выход свободного асбеста на 25 %.

5. Качественный эксплуатационный режим аэродинамически активного барабанно-полочного сепаратора обеспечивается, когда отбрасывание частицы, обладающей «парусностью», происходит влево от вертикальной оси барабана и это возможно, если отношение вертикальной составляющей скорости частицы при ударе к горизонтальной для серпентинита больше 1,6, для породных – больше 1,7.

6. Для выделения частиц серпентинита крупностью до 40 мм необходима скорость воздушного потока не меньше 5 м/с.

7. Основные результаты работы использованы при проектировании аэродинамически активного барабанно-полочного сепаратора для разделения асбестосодержащих руд. Ожидаемый экономический эффект при использовании барабанно-полочного сепаратора составит 265 тыс. руб. в год на одну машину.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

***Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах по группе научных специальностей 05.05.06 – Транспортное, горное и строительное машиностроение:***

1. Рабочий процесс полочного фрикционного сепаратора с криволинейным трамплином переменной кривизны / П. М. Анохин, А. И. Афанасьев, В. Я. Потапов, Ю.М. Казаков // Известия УГГУ. 2016. Выпуск 2(42). С.70-72.

2. Рабочий процесс трехстадийного фрикционно-воздушного сепаратора с криволинейным трамплином / П. М. Анохин, А. И. Афанасьев, В. Я. Потапов, Ю.М. Казаков//Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 8. С.49-54.

3. Математическое моделирование технологии классификации глиноземов в аэродинамических потоках фрикционных аппаратов / В. Я. Потапов, В. Н. Макаров, Н. В. Макаров, В. В. Потапов, П. М. Анохин // Вестник Забайкальского государственного университета. 2017. Т. 23, № 1. С.44-51.

4. Разработка фрикционных сепараторов использующих физико-механические характеристики материалов / В. Я. Потапов, В. В. Потапов, А. В. Семёнов, П. М. Анохин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 5. С. 57-67.

5. Математическая модель процесса разделения горной массы на полочном сепараторе с криволинейным трамплином переменного радиуса / П. М. Анохин, А. И. Афанасьев, В. Я. Потапов, В. В. Потапов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 8. С. 16-22.

6. Выбор информативных признаков для разделения асбестовых руд / В. Я. Потапов, В. В. Потапов, П. М. Анохин, Д. Д. Степаненков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 4. С. 53-64.

7. Изучение аэродинамических характеристик частиц, обладающих парусностью с целью создания пневмотранспортных систем / В. Я. Потапов, В. Н. Макаров, П. М. Анохин, В. В. Потапов, П. А. Костюк, Д. Д. Степаненков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 5. С. 52-56.

***Работы, опубликованные в других изданиях:***

8. Определение коэффициентов трения и восстановления сыпучих материалов для проектирования аппаратов/В. Я. Потапов, В. В. Потапов, Л. А. Семериков, П. М. Анохин, Д. Д. Степаненков // Материалы научно-

технической конференции «Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья». Екатеринбург, 2015. С. 176-183.

9. Разработка аэродинамических активных фрикционных сепараторов / В. Я. Потапов, В. В. Потапов, П. М. Анохин, И. М. Баранов, Е. А. Викулов // Материалы научно-технической конференции «Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья». Екатеринбург, 2015. С. 218-225.

10. Использование пневматических устройств для транспортировки сыпучих смесей после предварительного разделения материалов / В. Я. Потапов, В. В. Потапов, П. А. Костюк, П. М. Анохин, А. В. Семенов // Материалы научно-технической конференции «Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья». Екатеринбург, 2015. С. 229-232.

11. Конструкционное моделирование сепаратора для разделения руд по трению и упругости / В. Я. Потапов, В. В. Потапов, С. А. Ляпцев, Л. А. Семериков, П. М. Анохин // Математическое моделирование механических явлений: сборник. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. С. 51-57.

12. Формирование разделительных поверхностей на основе исследования композитных материалов / Потапов В. Я., Потапов В. В., Анохин П. М., Степаненков Д. Д. // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. тр. XIV Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека» в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2016. С. 419-422.

13. Результаты разделений асбестосодержащих руд на магнитно – фрикционных аппаратах / В. Я. Потапов, В. В. Потапов, Л. А. Семериков, П. М. Анохин // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. тр. XIII Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека». Екатеринбург, 2015, С. 195-199.

Подписано в печать .2018 г.

Бумага офсетная. Гарнитура TimesNewRoman. Формат 60 × 84 1/16.

Печать на ризографе. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ

Уральский государственный горный университет  
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 30.

Отпечатано с оригинал-макета  
в лаборатории множительной техники издательства УГГУ