

На правах рукописи



**Костюк Петр Андреевич**

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА  
ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ  
ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Екатеринбург - 2022**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО  
«Уральский государственный горный университет»

**Научный руководитель**

доктор технических наук, доцент **Потапов Валентин Яковлевич**

**Официальные оппоненты:**

**Шарапов Рашид Ризаевич**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», профессор кафедры «Механизация строительства»

**Никитин Александр Григорьевич**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», профессор кафедры «Механики и машиностроения»

**Ведущая организация** ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (г. Тверь)

Защита состоится 29 июня в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.280.03 созданного на базе ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

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

Автореферат разослан 16 мая 2022г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
профессор, д.т.н.



Хазин Марк Леонтьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Актуальным вопросом является совершенствование действующей техники для транспортирования мелкокусковых и пылевидных насыпных грузов на промышленных предприятиях горно-обогатительного комплекса. Энергосберегающие технологии относятся к числу приоритетных направлений развития горной науки, технологий и горнотранспортного комплекса. В энергетической стратегии России на период до 2030 года указывается, что одним из направлений снижения удельных затрат на использование энергоресурсов является совершенствование технологий и создание нового оборудования, сокращение потерь энергии при транспортировании насыпных грузов.

Особенности транспортирования насыпных грузов на обогатительных и агломерационных фабриках, на фабриках первичной подготовки сырья, фабриках-заводах производства цемента и переработки химического сырья и других. предприятиях связаны со свойствами этих грузов, выделениями вредных газов и пыли при транспортировании.

Поэтому, повышение эффективности комплекса оборудования горных предприятий для перемещения насыпных грузов является актуальной научной задачей, а внедрение и совершенствование существующих пневмотранспортных средств с повышенной производительностью имеет важную практическую значимость.

### **Степень разработанности темы исследования**

Определение рациональных параметров и режимов работы пневмотранспортных средств с целью повышения их энергоэффективности, всегда были объектом внимания ученых и специалистов, научно-исследовательских, проектных институтов и машиностроительных заводов. Среди них ведущее место по праву занимают Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ) имени Н. Е. Жуковского, Московский государственный горный университет, Московский энергетический институт (Технический университет), Уральский государственный горный университет, Южно-Российский государственный технический университет.

Наиболее существенный вклад в решение указанных задач внесли отечественные и зарубежные ученые: Александров А.Н., Батаногов А.П., Ушаков С.Г., Кузнецов Ю.М., Разумов И.М., Сигел В., Чандана Р., Горбис И.М., Вирт К.Е., Франкль Ф.И., Баренблатт Г.И., Лойцянской Л.Г., Горбис З.Р., Дзядзио А.М., Шваба А.В., Малевич И.П., Давыдов С.Я. и другие.

Анализ литературных источников по данному вопросу позволяет сделать вывод о том, что совершенствование конструкции пневмотранспортных средств с целью повышения энергоэффективности транспортирования остается актуальным и требует дальнейших исследований.

### **Цель темы исследования**

Повышение эффективности пневмоустановки для транспортирования измельченной горной массы за счет совершенствования узла загрузки на базе выбора его рациональных параметров.

### **Задачи темы исследований**

1. Анализ конструкций пневмоустановок для транспортирования сыпучих материалов.
2. Анализ методик расчета пневмоустановок.
3. Разработать методику расчета параметров загрузочного устройства.
4. Выполнить стендовые исследования физической модели загрузочного устройства созданного на основе математического моделирования.

### **Научная новизна**

- установлены функциональные недостатки, отражающиеся на аэродинамических параметрах пневмотранспортных систем;
- разработана математическая модель и алгоритм расчета загрузочного устройства пневмотранспортных установок;

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке имитационной модели рабочего процесса загрузочного устройства пневмоустановок для транспортирования измельченных пород и других материалов, обосновании конструктивных и энергетических параметров, обеспечивающих необходимую производительность и снижение энергозатрат.

**Практическая значимость работы** заключается в: разработке и изготовлении полупромышленной установки с загрузочным устройством нового типа, позволяющая существенно снизить энергоемкость процесса загрузки измельченного материала; подтверждена шестью патентами РФ.

**Методология и методы исследования:** общелогические методы (анализ и обобщение научно-технической и патентной информации, индукция, синтез и т. д.), теория подобия, методы математического и физического моделирования, математическая статистика при проведении экспериментальных исследований на физической модели, теория машин и механизмов

### **Реализация результатов исследования:**

Результаты диссертационной работы, а именно методики определения абразивного износа и исследование коэффициентов трения различных материалов на стальных поверхностях были получены при выполнении НИР по государственному заданию «Исследование узлов трения горных машин и разработка металлматричных композиционных материалов триботехнического назначения (FEUU-2020-0007)».

### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Снижение энергоемкости работы пневмоустановки достигается путем изменения скорости подачи материала в загрузочное устройство, что обеспечивается совершенствованием конструкции узла загрузки.
2. Параметры загрузочного устройства, обеспечивающего безвыбросный режим работы пневмоустановки определяются свойствами материала: коэффициентом трения, плотностью, скоростью витания.

3. Подача материала в пневмосистему должна осуществляться таким образом, чтобы при сходе частиц с криволинейного трамплина в начале камеры смешения их скорость была близка к скорости витания.

#### **Степень достоверности**

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: корректным использованием методов теории вероятности и математической статистики, а также удовлетворительной сходимостью теоретических результатов с результатами исследований на физической модели (расхождение между теоретическими и экспериментальными данными не превышает 15 % при доверительной вероятности 0,85 – 0,95).

#### **Апробация результатов работы**

Результаты работы, ее основные положения были доложены, обсуждены и одобрены на международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (г. Москва, 2015, 2017, 2018, 2020, 2022 гг.); на международных научно-практических конференциях «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (г. Екатеринбург, 2014, 2016, 2020, 2021 гг.); Уральской горнопромышленной декаде (г. Екатеринбург, 2014-2021 гг.); международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека (г. Екатеринбург, 2020г.); Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (г. Екатеринбург, 2014, 2016, 2018, 2020 гг.); научно-технической конференции «Математическое моделирование механических явлений» (г. Екатеринбург, 2015, 2019 гг.);

**Личный вклад соискателя** состоит в подготовке публикации, выполненных в соавторстве, в определении и формулировке направлений исследований, проектировании и реализации новых конструкций элементов пневмосистем, постановке задач, разработке методик исследований, организации и непосредственном участии в выполнении исследований и испытаний, анализе и обобщении полученных результатов, разработке рекомендаций, внедрении результатов исследований в практику и в публичных докладах.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 22 работах, в том числе в 6 научных рецензируемых журналах ВАК, 1 работе из рецензируемых журналов SCOPUS и 6 патентах на полезную модель.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 105 страниц машинописного текста, 74 рисунков, 18 таблиц, библиографический список из 106 наименований и 7 приложений.

Автор выражает глубокую благодарность преподавателям и сотрудникам кафедр горной механики, технической механики и лично д.т.н. Давыдову С.Я. и Афанасьеву А.И. за ценные советы и оказанную помощь при выполнении работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** посвящено обоснованию актуальности работы, выбору объекта исследования, формулировке цели, идеи и научных положений, краткой характеристике практической ценности работы.

**В первой главе** выполнен анализ современного состояния и определены перспективы развития систем пневмотранспортирования для сыпучих материалов. В главе представлены достоинства и недостатки существующих устройств и конструкций для пневмотранспортирования сыпучих материалов. Проведен обзор существующих методик расчета пневмотранспортных систем. Определены задачи дальнейших исследований.

**Во второй главе** рассмотрен гранулометрический состав транспортируемого материала, экспериментальным путем определены коэффициенты трения материала. В главе рассмотрен вопрос абразивного влияния транспортируемого материала на части загрузочного устройства, транспортные трубопроводы и местные сопротивления. Представлена методика расчета абразивного износа трубопроводов пневмотранспортных установок. Проведен анализ движения частиц материала в потоке воздуха, экспериментальным путем определены скорости витания транспортируемых материалов.

**В третьей главе** проведено обоснование конструкции загрузочного устройства, снижающего энергоемкость процесса транспортирования, которое включает в себя криволинейный трамплин. Разработана математическая модель рабочего процесса питателя пневмотранспортной установки и алгоритм расчета скорости воздуха и частиц горной породы. На основании этого были обоснованы наиболее рациональные параметры загрузочного устройства. В главе проведено сравнение конечных скоростей движения материала и потерь давления аэросмеси в горизонтальных и вертикальных трубопроводах.

**В четвертой главе** на основании проведенных исследований разработан пневмоподъемник сыпучих материалов, позволяющий достичь энергоэффективного и без выбросного режима работы. Рассмотрены применяемые в системах пневмотранспорта воздуходувные машины и их работа в сетях пневмотранспорта. В главе приведены закономерности движения мелкодисперсных аэросмесей по участкам пневмотранспорта, исследовано поведение частиц в псевдооживленном слое.

**В заключении** приводятся основные выводы и рекомендации, полученные в результате выполнения диссертационной работы.

## ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**1. Снижение энергоемкости работы пневмоустановки достигается совершенствованием конструкции узла загрузки, что обеспечивает изменение скорости подачи материала в загрузочное устройство.**

По функциональному назначению системы пневматического транспорта подразделяются на устройства для транспортирования по трубопроводам или

пневматическим желобам и на устройства для разгрузки бункеров и гомогенизации.

По компоновке системы пневматического транспорта подразделяются на открытые и закрытые.

### **Открытые системы: Нагнетательная и всасывающая транспортные системы**

В нагнетательной транспортной системе транспортирующий газ засасывается воздуходувной машиной, сжимается ею, а затем направляется по распределительной сети транспортирующего газа в смеситель, в который через соответствующий питатель одновременно подается транспортируемый материал. Смесь материала с транспортирующим газом транспортируется по транспортным трубопроводам до места назначения, где она поступает в отделительное устройство. Транспортирующий газ, очищенный от материала, выпускается в атмосферу, а материал падает в бункер.

Во всасывающей пневмотранспортной системе транспортирующий газ засасывается непосредственно в смеситель, куда одновременно подается транспортируемый материал. Образуется смесь газа с материалом, которая дальше идет по транспортным трубопроводам в отделительное устройство. Транспортирующий газ, очищенный от материала, идет затем по распределительной сети в воздуходувную машину, где он сжимается до давления, близкого к атмосферному, и выдувается в атмосферу. Материал из отделительного устройства подается питателем в бункер.

### **Закрытые и полужакрытые системы.**

В закрытых системах транспортирующий газ непрерывно циркулирует, т.е. непрерывно вступает в контакт с новым материалом, и одновременно все время проходит через воздуходувную машину. Достоинством закрытой системы является то, что при транспортировании не сильно абразивных материалов нет надобности в очень эффективном отделительном устройстве, поскольку загрязненный транспортирующий газ не выпускается в атмосферу. Недостатком этой системы является то, что при непрерывном соприкосновении с материалом транспортирующий газ воспринимает от материала влагу, а это ухудшает эффективность транспортирования.

Общими недостатками данных систем являются необходимость создания повышенного давления в смесителе, а также необходимость разгона транспортируемого материала до транспортной скорости, что требует затрат энергии. В данных транспортных системах материал поступает в камеру смешения с определенной скоростью  $v_{\text{п}}$ , которую можно определить используя закон сохранения энергии

$$v_{\text{п}} = \sqrt{2(gH_{\text{п}} - fl(\cos\beta g))} \quad (1)$$

где  $H_{\text{п}}$  – высота подачи (рис. 1), м;

$f$  – коэффициент трения материала о поверхность загрузочного патрубка;

$\beta$  – угол наклона загрузочного патрубка к горизонту, град;

$l$  – длина наклонной части загрузочного патрубка, м.

Эта скорость направлена навстречу движению материала в смесителе, поэтому необходимо затормозить материал и разогнать его в конце камеры смесителя до транспортной скорости.

Согласно закону сохранения энергии, потери давления и удельный расход энергии, необходимый для разгона материала от нуля до скорости транспортирования находятся из формул

$$\Delta p = 0.5\rho v^2, \text{ Па} \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность транспортируемой массы, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость транспортирования, м/с.

$$E_k = m(v + v_n)^2 * 0.5, \text{ Дж} \quad (3)$$

где  $m$  – величина разгоняемой массы кг.

Если изменить направление скорости материала в начале смесительной камеры в направлении скорости транспортирования, то удельный расход энергии, необходимый для разгона материала от нуля до скорости транспортирования ( $v = -v_n$ ) будет равен нулю  $E_k = 0$ , (см. формулу 2), что можно достичь путем совершенствования конструкции узла загрузки.

**Этим доказано первое научное положение.**

## **2. Параметры загрузочного устройства, обеспечивающего безвыбросный режим работы пневмоустановки определяются свойствами материала: коэффициентом трения, плотностью, скоростью витания.**

На процесс транспортировки влияют различные свойства порошкообразных материалов: размер частиц, плотность, насыпная плотность, коэффициент внутреннего трения, коэффициенты трения о твердые несущие поверхности, угол естественного откоса, влажность, подвижность и связность частиц, слеживаемость, абразивность, форма частиц, скорость витания.

Для пневмотранспортировки применяются, как правило, полидисперсные материалы с максимальным размером ( $d$ ) частиц, не превышающим 10 мм.

Одной из характеристик твердых частиц, влияющей на параметры пневмотранспортировки, является плотность, которая определяется пикнометрическим способом по ГОСТ 15053-69.

Коэффициенты трения монофаз асбестосодержащих продуктов изучались в ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (табл. 1).

### **Результаты определения фрикционных характеристик исследуемых материалов на стальной поверхности**

Таблица 1

Продукт	Коэффициенты	
	статического трения, $f$	кинетического трения, $f_{ск}$
Асбест: сталь	0,96	0,79
Порода: сталь	0,38 – 0,53	0,23 – 0,41
Уголь: сталь	0,52	0,34
Порода: сталь	0,46	0,31
Глина: сталь	0,74	0,62
Кварц: сталь	0,46	0,37
Слюда: сталь	0,63	0,56
Гранат: сталь	0,45	0,32



Величины коэффициентов трения необходимы для математического моделирования поведения транспортирования продукта в проектируемых аппаратах.

### **Исследование скорости витания волокна антофиллит асбеста в воздушной среде**

При выводе формул скоростей витания различных материалов, имеющих неправильную форму (пластинчатую, продолговатую, кубическую) частицу чаще всего приводят к равновеликому шару с эквивалентным диаметром. При этом частица обычно имеет более или менее пропорциональные размеры (длину, ширину, высоту). В таких случаях расхождения в величине скорости витания по расчету и эксперименту находятся в допустимых пределах.

В результате экспериментов установлено:

- что в вертикальном воздушном потоке асбестовое волокно ориентируется по отношению к потоку своим наибольшим сечением, т.е. образующей цилиндра;
- скорость витания волокна в воздухе при диаметре больше 5 мм не зависит от длины. Определение скорости витания по эквивалентному диаметру дает значительную погрешность;
- коэффициент воздушного сопротивления волокна антофиллит-асбеста, благодаря сильно шероховатой, неровной поверхности, выше, чем у хризотил-асбеста, вследствие чего скорость витания антофиллита ниже.

### **Обоснование конструкции загрузочного патрубка**

Работа пневмосистемы, находящейся под избыточным по отношению к атмосфере давлением, затруднена в следствии неравномерности подачи материала из подающего трубопровода. Неравномерность подачи приводит к изменению высоты столба сыпучего материала в подающем трубопроводе. Если высота столба материала уменьшается ниже критической, то результирующая сила давления воздуха в транспортном трубопроводе становится больше силы тяжести столба. При этом происходит выброс сыпучего материала по подающему трубопроводу в накопительную емкость и загрязнение воздуха в помещении. Для предотвращения этого явления предлагается система регулирования высоты столба сыпучего материала в подающем трубопроводе (см. рис. 1).

Загрузочное устройство (а) (общий вид) содержит смесительную камеру 1, вертикальный загрузочный трубопровод 2, наклонный загрузочный патрубок 3, запорное устройство 4 и пористую перегородку 5;

Схема запорного устройства (б) включает в себя пружину привода 1, защитный кожух 2, заслонку 3 и ось привода 4.

При подаче материала в загрузочный патрубок высота столба материала возрастает от нуля до  $H_0$ , при котором заслонка начинает открываться. Условие открывания заслонки записывается в виде:

$$M_y \leq 0,5H_0 g \rho_m a^3 \quad (4)$$

где  $\rho_m$  - плотность сыпучего материала, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $M_y$  - упругий (запирающий) момент действующий со стороны пружины на заслонку, Н\*м;  $a$  – ширина и длина заслонки, м;  $H_0$  – высота столба материала в загрузочном патрубке, м.

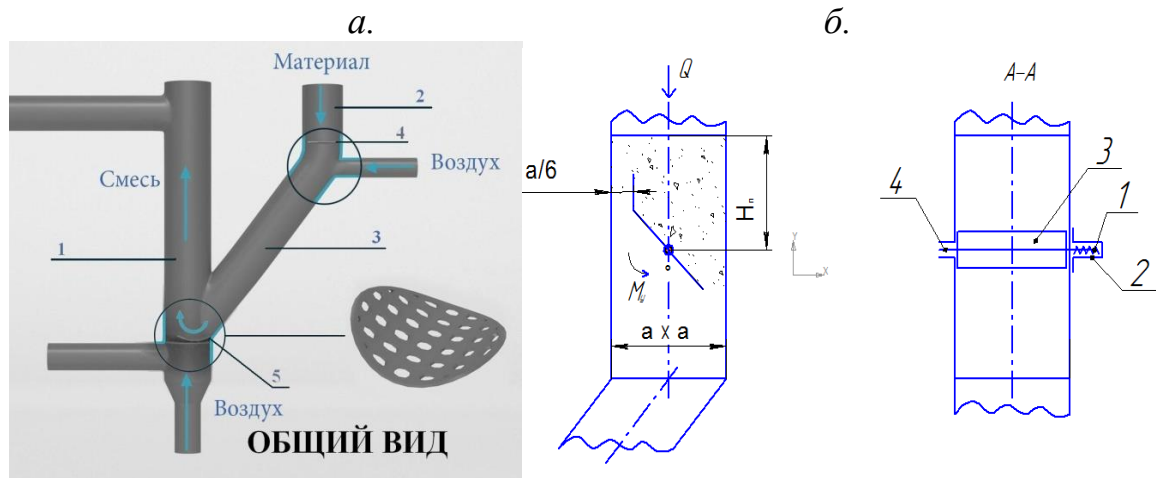


Рис.1. Принципиальная схема загрузочного устройства с запирающим устройством

При постоянной величине подачи ( $Q_m$ ) заслонка поворачивается на угол  $\alpha$  и начинается заполнение материалом нижней части загрузочного патрубка. Высота заполнения ( $H_3$ ) загрузочного патрубка должна обеспечивать такое давление, которое больше, чем давление воздуха ( $p_v$ ). В этом случае обратный выброс материала через загрузочный патрубок в бункер исключается. Высота заполнения загрузочного патрубка зависит от давления воздуха и плотности материала

$$H_3 = p_v / (g\rho_m) \quad (5)$$

Величина подачи сыпучего материала в установившемся режиме ( $Q_m = Q_y$ ) может быть найдена из формулы:

$$Q_m = a^2(1 - \cos\alpha)[(2g(H_T + a\sin\alpha))]^{0,5} \quad (6)$$

где  $H_T$  – текущая высота столба материала в загрузочном патрубке, м.

Величина максимальной подачи сыпучего материала может быть найдена из формулы:

$$Q_{\max} = a^2(1 - \cos\alpha_{\max})[2g(H_{\max} + a\sin\alpha_{\max})]^{0,5} \quad (7)$$

Если подача материала уменьшится, то высота его столба в загрузочном патрубке станет меньше  $H_0$ , условие (4) не будет выполняться и заслонка закроется. **Этим доказано второе научное положение.**

**3. Подача материала в пневмосистему должна осуществляться таким образом, чтобы при сходе частиц с криволинейного трамплина в начале камеры смешения их скорость была близка к скорости витания.**

В загрузочном устройстве материал разгоняется до определенной скорости. Для этого необходимо чтобы сила давления воздуха на частицу была больше суммы силы тяжести и инерции. Как показывают расчеты эта скорость практически в два раза превышает скорость витания, что требует значительных энергетических затрат. Для уменьшения энергозатрат при разгоне частицы предлагается использовать её кинетическую энергию, которую она

приобретает в конце загрузочного патрубка (см. рис. 1, а.). Далее частицы попадают на трамплин (рис. 2).

Для реализации этого предложения нами было предложено снабдить загрузочный патрубок криволинейным трамплином, который изменяет направление движения материала. При этом скорость материала в смесительную камеру направлена практически вертикально и равна скорости транспортирования в вертикальном трубопроводе.

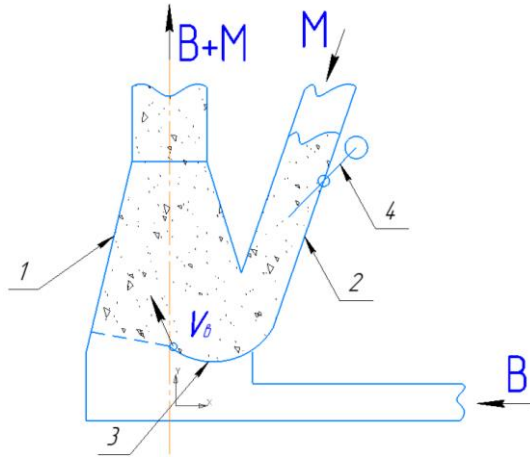


Рис. 2. Смесительная камера пневмоподъемника

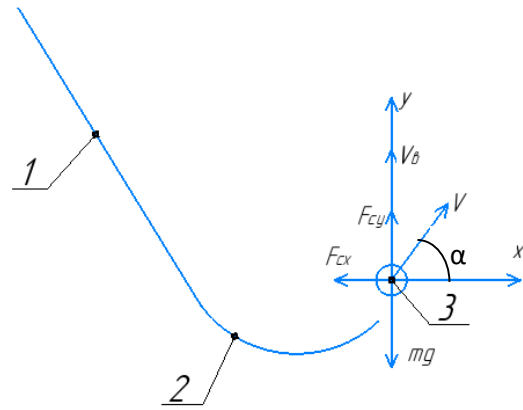


Рис. 3. Схема действия сил на частицу: 1- разгонная плоскость, 2- трамплин, 3- частица.

Смесительная камера состоит из вертикальной трубы 1, в которую «врезан» загрузочный патрубок 2 с запорным устройством 4. В нижней части загрузочного патрубка установлен криволинейный трамплин 3, который изменяет направление скорости материала. Материал попадает в смесительную камеру имея практически вертикальную скорость. Таким образом, исключаются затраты энергии на сообщение материалу вертикальной скорости.

На рис.3 представлена расчетная схема движения частицы в воздушном потоке при сходе её с криволинейного трамплина.

При движении частицы в подвижной воздушной среде, то на нее действует сила тяжести ( $m\vec{g}$ ) и сила давления воздуха  $\vec{F}_C$ .

Согласно закону Ньютона векторную силу давления воздуха на частицу горной породы по оси  $X$  можно представить в виде:

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

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 (при нормальной температуре и атмосферном давлении,  $\rho_B = 1,22 \text{ кг/м}^3$ ),  $\alpha$  –угол наклона скорости частицы при сходе с трамплина к оси  $OX$ , град;  $V_B$ – скорость воздуха, поступающего от вентилятора, м/с.

Векторная сила давления воздуха на частицу горной породы по оси  $Y$  равна

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

где  $V_B$  – скорость воздуха, м/с.

Движение частицы под действием указанных сил в осях ХУ описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = -a(V\cos\alpha)^2 \\ m\ddot{y} = -mg + a(-V\sin\alpha + V_B)^2 \end{cases} \quad (10)$$

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

Ось  $x$  – горизонтальна,  $y$  -направлена вертикально вверх.

В первом приближении примем, что частица имеет сферическую форму. Масса шарообразной частицы

$$m = \rho_m \cdot \frac{\pi d^3}{6}, \quad (11)$$

где  $\rho_m$  – плотность материала частицы, кг/м<sup>3</sup>.

Так как скорость схода частицы с трамплина значительно меньше скорости воздуха, подаваемого вентилятором, то система уравнений 10 приобретает вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} + k_1\dot{x} = 0 \\ \ddot{y} + k_3\dot{y} = k_4 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{где: } k_1 = \frac{3c \rho_B}{d \rho_M} V_B \cos\beta \cos\alpha; \quad \begin{cases} k_3 = \frac{3c \rho_B}{d \rho_M} V_B \sin\alpha \\ k_4 = \frac{1,5c \rho_B}{d \rho_M} V_B^2 + g \end{cases}$$

Интегрируя первое уравнение системы (9) получим:

$$\begin{cases} x = A_1 + A_2 e^{-k_1 t} \\ \dot{x} = -A_2 k_1 e^{-k_1 t} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} y = A_3 + A_4 e^{-k_3 t} + \frac{k_4}{k_3} t \\ \dot{y} = -A_4 k_3 e^{-k_3 t} + \frac{k_4}{k_3} \end{cases} \quad (14)$$

где  $A_1, A_2, A_3, A_4$  – константы интегрирования, определяемые из начальных условий: при  $t = 0$   $\dot{x} = V_{0x} = V_H \cos\alpha$  и  $x = 0. A_1 + A_2 = 0$ ;  $\dot{y} = V_H \sin\beta$  и  $y = 0. A_3 + A_4 = 0$

Выразив  $\dot{x}$  и  $\dot{y}$  из уравнений (13 и 14) с учетом начальных условий, получим

$$A_1 = (V_H \cos\alpha) k_1^{-1} \quad (15)$$

$$A_2 = -(V_H \cos\alpha) k_1^{-1} \quad (16)$$

$$A_3 = (V_H \sin\alpha + \frac{k_4}{k_3}) k_3^{-1} \quad (17)$$

$$A_4 = -(V_H \sin\alpha + \frac{k_4}{k_3}) k_3^{-1} \quad (18)$$

Подставим эти уравнения в (13), (14) и получим:

$$\begin{cases} x = ((V_H \cos\alpha) k_1^{-1})(1 - e^{-k_1 t}) \\ \dot{x} = (V_H \cos\alpha) e^{-k_1 t} \\ y = ((V_H \sin\alpha + \frac{k_4}{k_3}) k_3^{-1})(1 - e^{-k_3 t}) + \frac{k_4}{k_3} t \\ \dot{y} = (V_H \sin\alpha - \frac{k_4}{k_3}) e^{-k_3 t} + \frac{k_4}{k_3} \end{cases} \quad (19)$$

В вышеприведенных уравнениях имеются переменные, которые являются случайными величинами. Это: 1. Начальная скорость частицы при сходе её с трамплина –  $V_H$ , м/с. Она зависит от коэффициентов трения частицы о разгонную плоскость и криволинейный трамплин. 2. Плотность частицы -  $\rho_m$ , кг/м<sup>3</sup>. 3. Размеры частицы –  $d$ , м.

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

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

Вывод: 1. Использование криволинейного трамплина в загрузочном устройстве позволяет изменить направление скорости частиц при входе в вертикальный трубопровод. Вертикальная составляющая скорости частицы в точке схода с трамплина может быть найдена из формулы

$$V_g = V * \sin \alpha \quad (20)$$

В результате исследований разработан алгоритм расчета пневмосистемы с загрузочным устройством в виде криволинейного трамплина (рис.4).

1. Первый блок алгоритма содержит исходные данные для расчета.

2. Второй блок. После ввода исходных данных включается генератор случайных равномерно распределенных чисел и моделируются законы распределения диаметров частиц:

$$d = 0,5(d_2 + d_1) + 1,42 * (d_2 - d_1)(SV-3)/6 \quad (21)$$

где  $d_2$ ,  $d_1$  - соответственно, максимальный и минимальный эквивалентные диаметры частиц горной породы, м;  $SV$  - сумма шести равномерно распределенных в интервале от нуля до единицы чисел.

Моделируется закон распределения коэффициентов трения частиц:

$$f_t = 0,5(f_2 + f_1) + 1,42 * (f_2 - f_1)(SV-3)/6 \quad (22)$$

где  $f_2$ ,  $f_1$  - соответственно, максимальный и минимальный коэффициенты трения частиц горной породы о трубу подачи материала.

Находится скорость частиц при входе их на криволинейный трамплин (см. рис. 2):

$$V_H = (2L_{пг} * \sin \alpha_{п} - f_t * \cos \alpha_{п})^{0,5} \quad (23)$$

Определяется скорость частицы при сходе с трамплина, а также координаты точки схода.

$$V_B^2 = V_H^2 e^{-2f(\pi-\beta-\alpha)} - \frac{2gr e^{-2f(\pi-\beta-\alpha)}}{1+4f^2} [3f \cos \alpha + (1-2f^2) \sin \alpha] + \frac{2gr}{1+4f^2} [(1-2f^2) \sin \beta - 3f \cos \beta]. \quad (24)$$

где  $f$  - коэффициент трения частиц горной породы о криволинейный трамплин (также являющийся случайной величиной).

Так как в уравнения движения частиц по криволинейному трамплину входят изменяющиеся случайным образом переменные, то их решение производится методом Эйлера на компьютере.

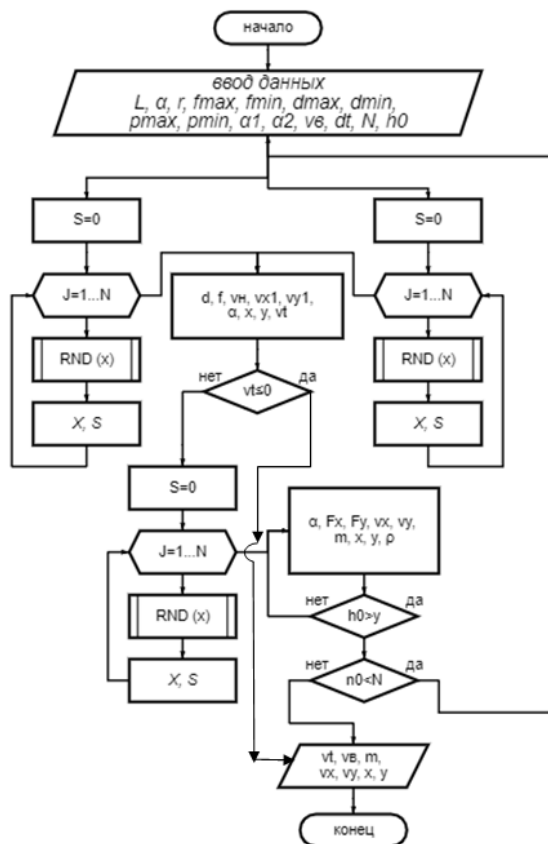


Рис.4. Алгоритм расчета скорости транспортирования частиц горной породы

3. Третий блок. Производится сравнение скорости схода частицы с трамплина с нулем. Если она меньше или равна нулю, то расчет заканчивается. В противном случае расчет продолжается.

4. Четвертый блок. Включается генератор случайных равномерно распределенных чисел и моделируется закон распределения плотности частиц. Определяется масса частицы, горизонтальная и вертикальная составляющая силы давления воздуха, составляющие скорости частицы и её координаты.

5. Пятый блок. Производится сравнение вертикальной координаты частицы с высотой смесительной камеры. Если она меньше, то расчет повторяется, начиная с четвертого блока, если больше, то производится сравнение текущего числа частиц с заданным. Если оно меньше заданного, то расчет повторяется, начиная со второго блока.

6. Результаты расчета - скорости, размеры, координаты и массы частиц выводятся на печать.

Пример расчета согласно разработанному алгоритму приведен на рис. 5.

Уравнения 19 и алгоритм (рис.4) позволяют определить по заданным свойствам материала (плотности, диаметру частиц, коэффициентам трения, скорости витания) параметры загрузочного устройства (длину загрузочного патрубку, его угол наклона и диаметр, радиус трамплина).

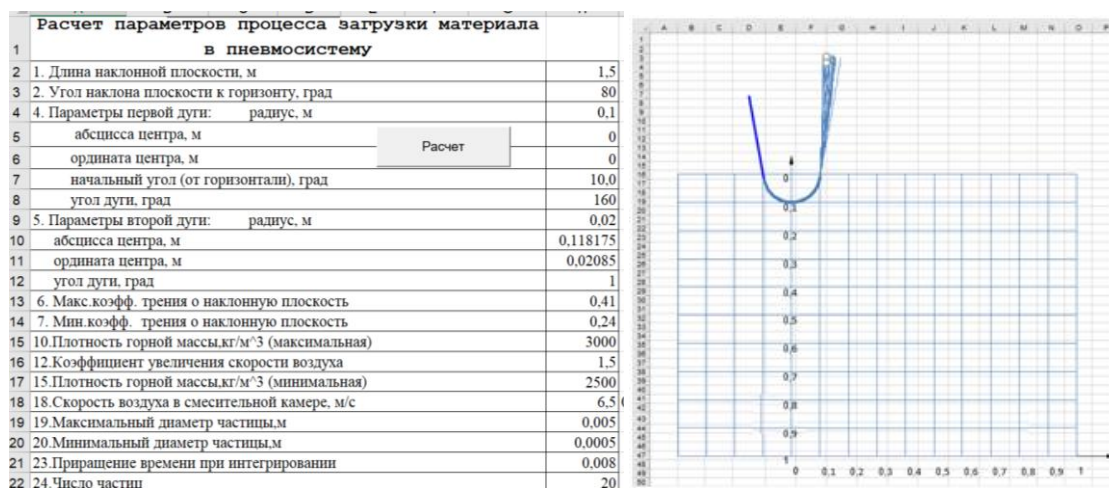


Рис. 5. Результаты расчета процесса загрузки сыпучего материала в пневмосистему (скорость воздуха 6,5 м/с)

**Этим доказано третье научное положение.**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнены обоснование методов и разработка новых технических решений для повышения эффективности пневмотранспортных комплексов, позволяющих повысить эксплуатационную эффективность пневмотранспорта сыпучих грузов.

Основные научные выводы и практические результаты выполненных исследований:

1. Разработана математическая модель и алгоритм расчета загрузочного устройства пневмотранспортных установок, обеспечивающая предотвращение выброса материала из загрузочного трубопровода. Основные результаты работы использованы при проектировании пневмосистемы. Расчетный экономический эффект при использовании загрузочного одного устройства составляет 150 тыс. руб. в год.

2. Обоснован вероятностный алгоритм расчета нагнетательной пневмосистемы с трамплином, изменяющим направления скорости движения материала в смесительной камере под углом 10-15 градусов. Это позволяет уменьшить скорость подачи воздуха в смесительную камеру и, соответственно, затраты энергии на разгон материала.

3. Представлена имитационная модель процесса загрузки измельченного материала в смесительную камеру, позволяющая обосновать её рациональные конструктивные параметры, которые определяются свойствами материала, имеющими случайный характер: коэффициентом трения, плотностью, средним диаметром частиц, скоростью витания. Для исключения «зависания» материала минимальная скорость подачи воздуха должна обеспечивать транспортирование максимальных по диаметру частиц.

4. Спроектирована и изготовлена полупромышленная установка с загрузочным устройством нового типа – криволинейным трамплином,

обеспечивающего снижение потери давления и, соответственно, энергозатрат на 10...15%.

5. Предложенные технические решения по совершенствованию пневмотранспортной установки, в частности узла загрузки, защищены 6 патентами РФ.

6. Основные результаты работы и практические рекомендации использованы при разработке загрузочного устройства нагнетательной пневмосистемы с трамплином для транспортирования сыпучих материалов: асбеста, слюды и других сыпучих горных пород. В частности, при реконструкции цеха дробильно-сортировочного комплекса комбината «Уралсасбест». Расчетный экономический эффект при использовании одного загрузочного устройства в условиях предприятия ООО «Сухоложскцемент» составил 125 тысяч рублей.

7. Результаты исследований внедрены в учебный процесс при подготовке дипломированных специалистов по направлению «Горное дело» Уральского государственного горного университета, г. Екатеринбург.

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

*В рецензируемых журналах и изданиях по группе научных специальностей 05.05.00 – Транспортное, горное и строительное машиностроение:*

1. Давыдов С.Я., Потапов В.Я., Костюк П.А. Элементы расчета контейнерного пневмотранспорта // Известия УГГУ. -2013. -№ 2 (30). -С. 43-49

2. Афанасьев А.И., Потапов В.Я., Костюк П.А. Основы расчета пневматических устройств (ПУ) для транспортирования сыпучих смесей // Фундаментальные исследования. -2015. -№ 10-1. -С. 9-11.

3. Афанасьев А.И., Потапов В.Я., Костюк П.А., Макаров В.А. Краткий обзор пневматических устройств для транспортирования сыпучих смесей и процессов внутри них // Известия УГГУ. -2015. -№ 3 (39). -С. 28-38.

4. Макаров Н.В., Костюк П.А., Патракеева И.Ю. Динамика вентиляционных режимов вентиляторов местного проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2016. -№ 4. -С. 62-67.

5. Потапов В.Я., Макаров В.Н., Анохин П.М., Потапов В.В., Костюк П.А., Степаненков Д.Д. Изучение аэродинамических характеристик частиц, обладающих парусностью с целью создания пневмотранспортных систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2017. -№ 5. -С. 139-144.

6. Костюк П.А., Афанасьев А.И., Потапов В.Я., Потапов В.В. Имитационная модель пневмоподъемника // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2019. -№ S9. -С. 78-84.

**В других рецензируемых научных журналах и изданиях:**

7. Davydov S.Y., Apakashev R.A., Valiev N.G., Kostyuk P.A. New developments in pneumatic delivery of building material binders and inert additives // Refractories and Industrial Ceramics. -2021. -Т. 61. -№ 6. -С. 626-630.

**Работы, опубликованные в других изданиях:**

8. Потапов В.Я., Потапов В.В., Семериков Л.А., Костюк П.А. Закономерности движения сыпучих материалов в воздушном потоке разделительного аппарата //



Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник статей XIII Международной науч.-техн. конф. -2015. -С. 199-207.

9. Потапов В.Я., Потапов В.В., Костюк П.А., Анохин П.М., Семёнов А.В. Использование пневматических устройств (ПУ) для транспортирования сыпучих смесей после предварительного разделения материалов // Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья. Материалы науч.-техн. конф., проводимой в рамках VI Уральского горнопромышленного форума. -2015. -С. 229-232.

10. Афанасьев А.И., Потапов В.Я., Костюк П.А. Основы расчета пневматических устройств (ПУ) для транспортирования сыпучих смесей // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник статей XIII Международной науч.-техн. конф. - 2015. -С. 385-388.

11. Костюк П.А., Кодаков Н.А. Разработка устройства для пневмотранспортировки сыпучих материалов // Уральская горная школа - регионам. Сборник докладов Международной науч.-практ. конф. -2016. -С. 211-212.

12. Макаров Н.В., Костюк П.А., Патракеева И.Ю. Модификация концепции проектирования вентиляторов местного проветривания // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. сборник трудов XIV Международной науч.-техн. конф.. - 2016. -С. 272-279.

13. Холодников Ю.В., Боярских Г.А., Костюк П.А., Ислентьев А.О. Применение композитов для ремонта горного оборудования // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. сборник трудов XIV Международной науч.-техн. конф. -2016. -С. 392-397.

14. Афанасьев А.И., Потапов В.Я., Костюк П.А., Свиридов К.К. Математическая модель движения частиц внутри фрикционно-воздушного сепаратора // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XV Международной науч.-техн. конф. -2017. -С. 140-144.

15. Потапов В.Я., Костюк П.А., Степаненков Д.Д., Лукьянов А.Е., Абитов Д.А. Исследование скорости витания руд, обладающих парусностью // Уральская горная школа - регионам. сборник докладов XV Международной науч.-практ. конф. -2017. -С. 189-190.

16. Потапов В.Я., Костюк П.А., Степаненков Д.Д., Лукьянов А.Е., Захарова А.А. Исследование поведения асбестового волокна в вертикальном воздушном потоке // Уральская горная школа - регионам. Сборник докладов XV Международной науч.-практ. конф. -2017. -С. 241-242.

17. Потапов В.Я., Костюк П.А., Адам В.Е., Семенов А.В., Горшкова Э.М., Шестаков Е.В. Разработка аэродинамически-активного сепаратора для разделения сыпучих материалов // Уральская горная школа - регионам. Сборник докладов XVI Международной науч.-практ. конф. - 2018. -С. 203-204.

18. Костюк П.А., Афанасьев А.И., Потапов В.Я., Лукьянов А.Е. Математическая модель пневмоподъемника для транспортировки материала // Уральская горная школа - регионам. Сборник докладов XVI Международной науч.-практ. конф. -2018. -С. 205-206.

19. Костюк П.А., Афанасьев А.И., Потапов В.Я., Потапов В.В., Адам В.Е. Имитационная модель пневмоподъемника // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Материалы XXIII Международной науч.-техн. конф., проводимой в рамках XVI Уральской горнопромышленной декады. -2018. -С. 443-448.

20. Аванесян А.Э., Костюк П.А., Захаров И.С., Горшкова Э.М. Пневмотранспорт будущего // Международная науч.-практ. конф. "Уральская горная школа - регионам". Уральская горнопромышленная декада: материалы конференции. 2019. С. 182.

21. Костюк П.А., Афанасьев А.И., Потапов В.Я., Потапов В.В., Адам В.Е. Имитационная модель пневмоподъемника // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XVII Международной науч.-техн. конф. - 2019. -С. 192-196.

22. Костюк П.А., Потапов В.В., Белоногова В.А., Степаненков Д.Д. Определение скорости витания волокна асбеста в воздушной среде // В сборнике: Международная научно-практическая конференция «Уральская горная школа - регионам». материалы Международной науч.-практ. конф. Екатеринбург, -2021. -С. 112-113.

#### **Патенты и авторские свидетельства:**

1. Давыдов С.Я., Косарев Н.П., Валиев Н.Г., Симисинов Д.И., Потапов В.Я., Костюк П.А. Камерный питатель пневмотранспортной установки // Патент на изобретение RU 2537368 С1. 2015. Бюл. №1.

2. Потапов В.Я., Цыпин Е.Ф., Потапов В.В., Семериков Л.А., Овчинникова Т.Ю., Шестаков В.С., Потапов О.В., Степаненков Д.Д., Костюк П.А. Каскадный сепаратор для разделения материалов по трению и упругости // Патент на полезную модель RU 162146 U1. 2016. Бюл. № 15.

3. Давыдов С.Я., Черемисина Т.Н., Костюк П.А. Транспортное средство высокой проходимости // Патент на изобретение RU 2613751 С. 2017. Бюл. № 9.

4. Потапов В.Я., Потапов В.В., Степаненков Д.Д., Шестаков Е.В., Макаров В.Н., Макаров Н.В., Костюк П.А., Афанасьев А.И., Стожков Д.С. Воздушный сепаратор // Патент на полезную модель RU 179269 U1. 2018. Бюл. № 13.

5. Потапов В.Я., Потапов В.В., Костюк П.А., Афанасьев А.И., Угольников А.В., Казаков Ю.М., Лукьянов А.Е. Сепаратор для разделения сыпучих материалов по фрикционно-магнитным характеристикам // Патент на полезную модель RU 187553 U1. 2019. Бюл. № 8.

6. Костюк П.А., Давыдов С.Я., Евсеев Н.А., Шамына М.М. Устройство для подъема материалогазовой смеси. Патент на полезную модель 204694 U1. 2021. Бюл. № 16.

Подписано в печать 25.04.2022 г. Печать на ризографе.  
Бумага писчая. Формат 60x84 1/16. Гарнитура Times New Roman.  
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 37  
Издательство УГГУ  
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»  
Отпечатано с оригинал-макета  
в лаборатории множительной техники издательства УГГУ.