

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ / MINERAL PROCESSING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.88>

**РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ СХЕМ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПНЕВМОСЕПАРАТОРОВ ЗА СЧЕТ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ МИНЕРАЛОВ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ И КРУПНОСТИ**

Научная статья

**Осипов Д.А.<sup>1,\*</sup>, Лебедев И.Ф.<sup>2</sup>, Павлов А.Ю.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0003-0022-2765;

<sup>2</sup>ORCID : 0000-0003-1116-8872;

<sup>1,2,3</sup> Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (brelick[at]list.ru)

**Аннотация**

В статье приводятся результаты многолетних исследований в области воздушного (сухого) способа разделения (обогащения) минералов полезных ископаемых. Приводятся результаты изготовленного пневмосепаратора ПОС-2000, который прошел опытно-промышленные испытания в ряде золотосодержащих рудных месторождений Якутии и Амурской области. Показаны дальнейшие исследования направленные на возможность модификации существующего пневмосепаратора для уменьшения массогабаритов и разработка нового типа центробежного пневмосепаратора. Приводятся результаты исследований влияния различного воздушного потока на процесс разделения минералов по плотности и крупности, в изготовленной аэродинамической трубе из прозрачной пластиковой армированной трубы, изогнутой в виде винтового геликоида.

**Ключевые слова:** пневматический сепаратор, скорость витания, воздушный поток, аэродинамическая труба, минеральные частицы, центробежные силы.

**DEVELOPMENT OF PERSPECTIVE SCHEMES OF CENTRIFUGAL PNEUMATIC SEPARATORS DUE TO INTENSIFICATION OF CENTRIFUGAL FORCES AT SEPARATION OF MINERALS OF DIFFERENT DENSITY AND COARSENESS**

Research article

**Osipov D.A.<sup>1,\*</sup>, Lebedev I.F.<sup>2</sup>, Pavlov A.Y.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0003-0022-2765;

<sup>2</sup>ORCID : 0000-0003-1116-8872;

<sup>1,2,3</sup> N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russian Federation

\* Corresponding author (brelick[at]list.ru)

**Abstract**

The article presents the results of many years of research in the field of air (dry) method of separation (enrichment) of minerals. The results of the manufactured pneumoseparator POS-2000, which passed pilot tests in a number of gold-bearing ore deposits of Yakutia and Amur Oblast, are given. Further researches directed on possibility of modification of the existing pneumoseparator for reduction of mass dimensions and development of a new type of centrifugal pneumoseparator are demonstrated. Results of researches of influence of different air flow on the process of separation of minerals on density and coarseness, in the made aerodynamic tube from a transparent plastic reinforced tube, bent in the form of a helical helicoid are given.

**Keywords:** pneumatic separator, vortex velocity, air flow, wind tunnel, mineral particles, centrifugal forces.

**Введение**

В современном мире остро стоит вопрос экологической безопасности горнодобывающей промышленности и высокие требования к сфере недропользователей, в т.ч. при добыче золота. Сухие методы переработки и обогащения полезных ископаемых являются более экологичными, так как не используют в технологической схеме воду для переработки рудных материалов. Воздух, наиболее подходит для применения в регионах с дефицитом воды. Кроме этого, воздух обладает низкой вязкостью, и, следовательно, высокой способностью транспортировки минералов по плотности. Применение пневмосепараторов подходит, также, в регионах с продолжительными отрицательными температурами.

Во многих золотодобывающих предприятиях последней операцией по очистке шлихового золота от примесей является отдувка. При этом применяются очень низкие скорости воздушного потока, что сдерживает повышение производительности. При увеличении скорости воздушного потока образуется аэропесчаная суспензия, с высокой транспортирующей способностью, которая практически полностью исключает эффект пневматической сепарации. Объясняется тем, что возрастание скорости воздуха увеличивает в квадратичной пропорциональности транспортирующую способность потока. Увеличение пропускной способности оборудования за счет площади рабочего пространства приводят к затруднению регулирования аэродинамического потока. Становится практически невозможной регулировка песчаных «завалов», где прекращается перемещение минеральной смеси и коридоров «пробоя» между ними, по которым интенсивно выносятся полезный компонент и крупные обломки. В связи с этим

перед исследователями ставится задача, как управлять газодинамической средой и уменьшить массогабариты пневмоустановок.

В лаборатории «Обогащение полезных ископаемых» ИГДС СО РАН на протяжении многих лет разрабатывались технологии сухой (безводной) пневмосепарации, использующие гравитационные, центробежные и аэродинамические силы [1], [2], [3]. Внедрение пневматического обогащения в горном производстве является очень востребованным и актуальным. Внедрение сухих технологий позволит внедрить небольшие обогатительные предприятия вместо огромных фабрик, вследствие частичного использования воды, постройки гидротехнических сооружений, водозаборов, хранилищ хвостов обогащения и других инженерных зданий. Это наиболее подходит, с экономической точки зрения, для мелких малообъемных месторождений полезных ископаемых. Применение современного оборудования и технологий, перспективных для эффективного использования в области обогащения различных видов минерального сырья является актуальной проблемой [4].

Основной целью работы является усовершенствование конструктивных и технологических параметров новых модульных обогатительных оборудований, где одним из наиболее востребованных и перспективных, для мобильных аппаратов, является уменьшение массогабарита.

### Основные результаты

Из применяемых на практике установок интерес представляет пневматический аппарат ПОС-2000, в том числе в мобильном варианте исполнения, в составе, модульной передвижной рудообогатительной установки (МПРОУ) (см. рис. 1), который прошел успешные испытания в натуральных условиях при переработке руд в горнодобывающей отрасли Республики Саха (Якутия) [2], [6].

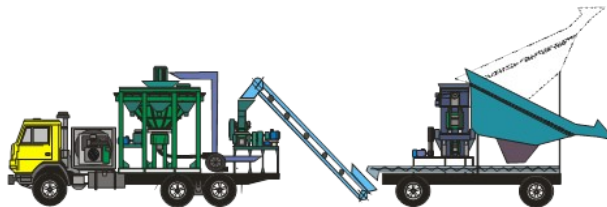


Рисунок 1 - Общий вид установки  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.88.1>

Эта установка предназначена для переработки и обогащения золотосодержащих руд и небольших месторождений, которые в настоящее время не осваиваются из-за нерентабельности производства. Установка рассчитана для применения технологии двух стадийного дробления на роторной дробилке многократного динамического воздействия среднего дробления (РД-МДВ-900) (см. рис. 2) и дробилке комбинированного действия (ДКД-300) (см. рис. 3), измельчения на центробежном измельчителе встречного удара (ЦМВУ-800) (см. рис. 4) и обогащения на пневматическом сепараторе (ПОС-2000) (см. рис. 5).

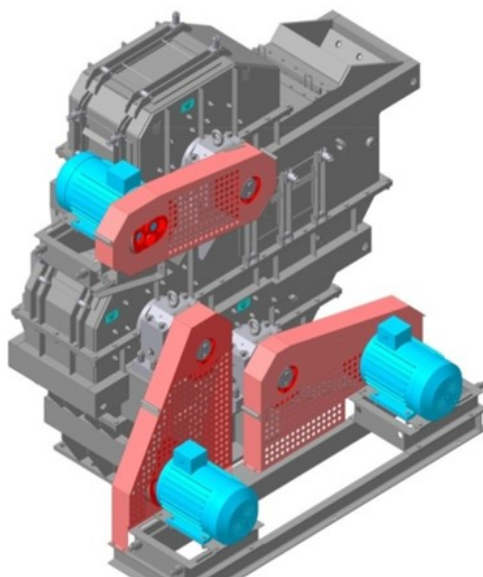


Рисунок 2 - Роторная дробилка многократного динамического воздействия  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.88.2>

Краткая техническая характеристика РД-МДВ-900. Производительность до 120 т/ч, диаметр бил 1000 мм, исходное питания -450 мм, энергопотребление 150 кВт, крупность продукта на выходе -16 мм, масса 12 т



Рисунок 3 - Дробилка комбинированного действия  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.88.3>

*Примечание: ДКД-300*

Краткая техническая характеристика дробилки. Производительность 6-15 т/ч, мощность двигателя 15 кВт, крупность питания до 150 мм, крупность готового продукта 2 мм, диаметр роторов 300 мм, масса 1,5 т.



Рисунок 4 - Центробежная мельница встречного удара  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.88.4>

*Примечание: ЦМВУ-800*

Краткая техническая характеристика измельчителя. Производительность 6 т/ч, мощность электродвигателя 7 кВт, диаметр роторов 790 мм и 820 мм, крупность питания -2 мм, масса 0,9 т.



Рисунок 5 - Пневмосепаратор  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.88.5>

*Примечание: ПОС-2000*

Краткая техническая характеристика пневматического сепаратора. Производительность до 6 т/ч, мощность 7,5 кВт, сокращение материала до 16 раз, масса 2 т.

Производственные испытания пневмосепаратора ПОС-2000 проведены на одном из золотосодержащих месторождений Амурской области, рудное месторождение состояло в основной массе из серицит-мусковитовых сланцев в них присутствовало относительно свободное крупное золото. Испытания сепаратора ПОС-2000 проводились наряду с изготовленными установками дробления и измельчения. При сепарации измельченного геоматериала крупностью менее двух миллиметров на ПОС-2000 сокращение составило 14-16 раз, при влажности до 7% измельченного материала достигается наилучшее разделение в рабочей зоне сепаратора без снижения производственной мощности и извлечения полезного компонента, извлечение составило до 98% полезного компонента, что подтверждает возможность внедрения в горное производство пневматических методов обогащения драгоценных металлов.

Пневмосепаратор так же испытывался при сегрегации геоматериалов средней плотности. Для технологических исследований возможности сухого обогащения флюоритовых руд использовалась руда доставленная из месторождения средней Азии с разным содержанием флюорита с общим весом 0,65 т. Крупность рудных кусков примерно варьировалась в пределах 250-300 мм. Руда состояла из прокварцованного и брекчированного песчаника охристо-светлосерого цвета. С мелкими обломками аргиллита со следами скольжения на поверхности. С видимыми признаками тонких (0,2 -1,0 мм) и тончайших прожилков кварца и опала (20-30 мк) с флюоритом и охристым материалом. В некоторых рудах присутствовали чистые линзы и шлифы флюорита размером до 2×4 см. Мелкообломочная масса руды состояла из гидроокиси железа и глинистых материалов (10-12%). В составе которого виднелись небольшие минералы монтмориллонита. В целом, состав руды отражает брекчированное штокверковое месторождение, подвергнутое выветриванию до гётит-монтмориллонитового состава.

На рисунке 6 представлен график извлечения флюорита в зависимости от ее содержания.

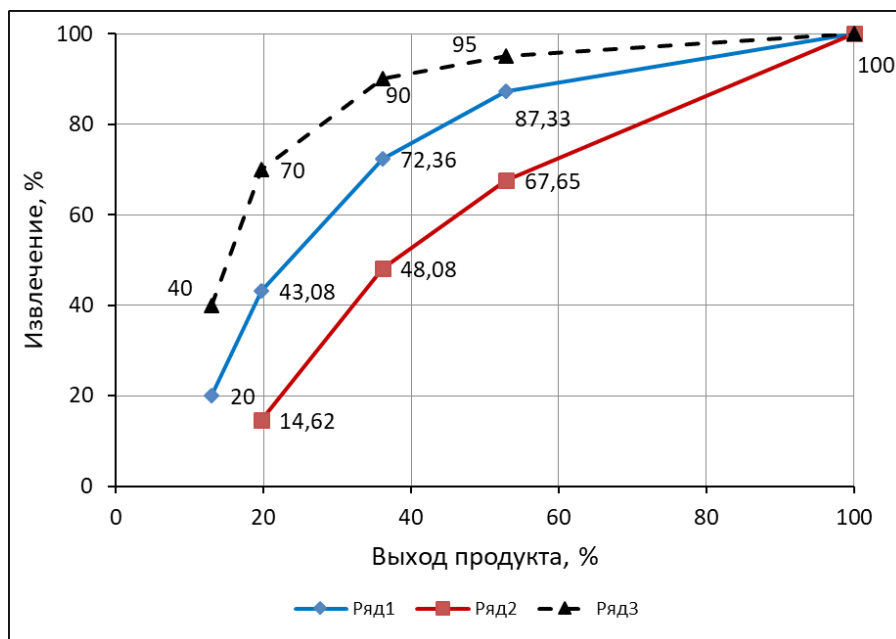


Рисунок 6 - График извлечения флюорита от выхода продукта при разных содержаниях:  
 1 – при содержании до 3,5%; 2 – расчетное извлечение при содержании <1%; 3 – при содержании 9,8%  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.88.6>

Опытно-промышленные испытания показали, что пневмосепаратор громоздкий для транспортировки по гористой местности.

Как показывает проведенный инженерный анализ, уменьшение массогабарита пневмосепаратора ПОС-2000 достигается только при повышении сил, действующих на процесс разделения, когда для разделения геоматериалов в аэродинамической среде используются центробежные и газодинамические силы.

Модификация при этом состоит в том, что сводится к минимуму действие гравитационных сил, имеющих физическое ограничение. При этом повышается точность учета газодинамической несущей и рабочей многофазовой среды с минералами, для которой необходимо моделирование при помощи современных компьютерных программ [7], [8], [9], [10], [11].

Проводятся лабораторные экспериментальные изучения особенностей поведения газоминеральных взвесей в многокомпонентных средах, в ламинарных, и вихревых потоках [12], [13], [14], [15], [16].

Для проведения этих исследований изготовлена аэродинамическая труба из прозрачной полиуретановой гибкой трубы, изогнутая в виде спирали. (см. рис. 7). Лабораторная модель трубы включает в себя металлические стержни, с возможностью регулирования рабочей полости для изменения высоты, угла и шага витка. Воздушный поток подавался при помощи промышленного компрессора. Регулировка скорости воздуха осуществлялась ручным затвором.

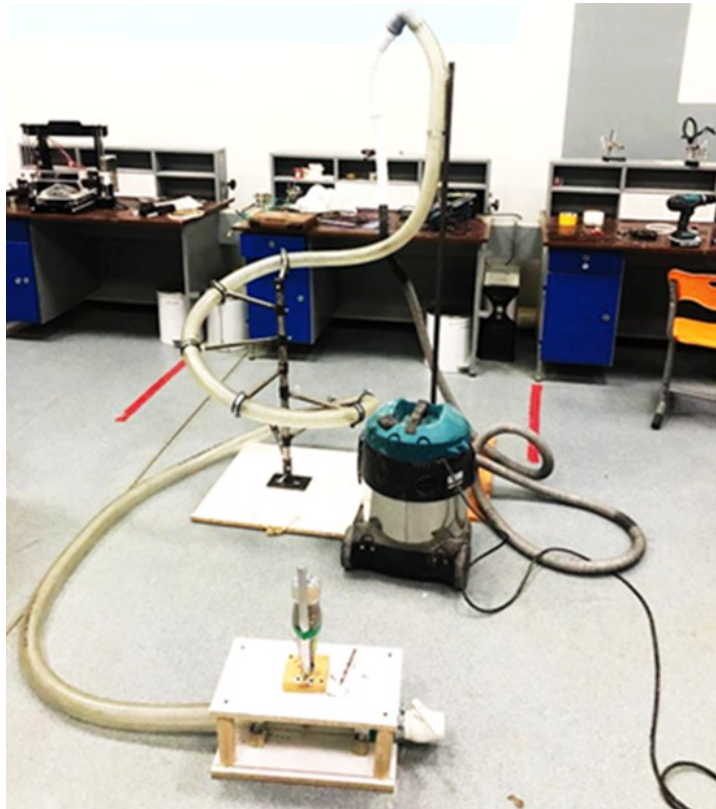


Рисунок 7 - Общий вид лабораторной установки  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.88.7>

На рисунке 8 представлена схема аэродинамической трубы с распределением зон движения измельченных геоматериалов различной плотности в разрезе.

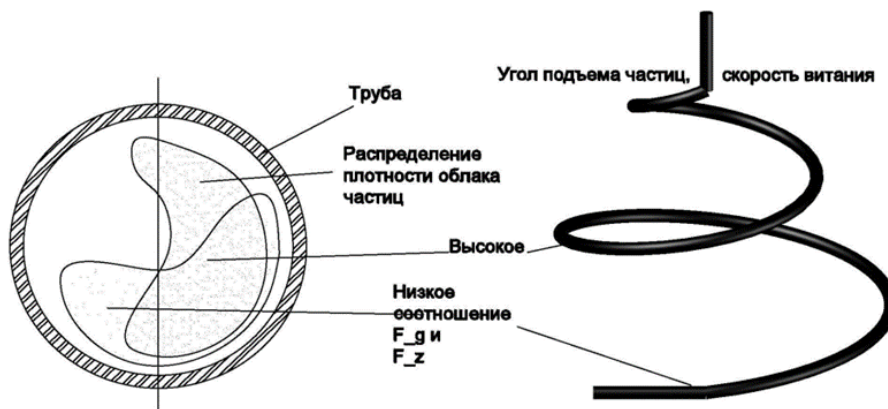


Рисунок 8 - Схема аэродинамической трубы с распределением зон движения измельченных геоматериалов  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.88.8>

По проведенным исследованиям, выявлены максимальные углы подъёма разных материалов по рабочей поверхности аэродинамической трубы, скорости страгивания и витания частиц в зависимости от плотности и размеров, максимальные углы зависания и витания частиц в зависимости от разной скорости нагнетающего воздуха.

Наблюдения за распределением измельчённого геоматериала в радиальном сечении аэродинамической трубы на различных участках, показали разные угловые зависимости распределения частичек в зависимости от соотношений центробежной и гравитационных сил, при разных скоростях воздуха и кривизны загиба трубы.

Исходя из соотношения центробежной силы к силе тяжести, изменялось и распределение движение минеральных частиц по квадрантам в поперечном сечении трубы, которое фиксировалось видео, фотосъёмкой. Результаты наблюдений доказали высокую эффективность применения центробежной силы в дополнение гравитационным.

По проведенными экспериментальными лабораторными исследованиями определены зависимости разделения минеральных частиц в несущей воздушной среде:

- скорость витания и гидравлическая крупность частиц находятся в прямой зависимости;
- скорость витания и гидравлическая крупность частиц можно выразить через плотность и толщину, что значительно упрощает расчеты;
- наличие в несущем потоке воздуха мелкообломочных песчаных частиц существенно повышает миграционную способность частиц с высокой плотностью;
- смещение частиц на определенный угол подъема по аэродинамической трубе при разных скоростях потока воздуха позволяет оценивать их способность волочением при меньших скоростях их витания.
- гравитационных силы можно заменить инерциальными (центробежными).

Дальнейшие исследования были направлены на выявление детализованной картины обтекания быстро вращающихся объектов плотных газопылевых смесей. Исследованы характеристики областей, в т.ч. в квазиравновесных, приповерхностных и турбулизованных областях. Большое внимание уделено опытным установкам и данным от них.

В пневмосепараторах, в отличие от известных воздушных классификаторов, применяемых в отраслях горной промышленности, используется не только эффект разделения по крупности (линейным размерам) частиц, но и по плотности. Более того, весьма значимым является так же и геометрия мелких частиц. Аэродинамическое сопротивление микрочастиц так же, как и макроскопические тела, зависит от характерных чисел, учитывающих форму. Особенно это важно при моделировании в областях сгущения частиц, когда размерами частиц уже нельзя пренебречь, и лагранжев формализм уже неточно работает.

В разрабатываемой установке пневмосепарации, кроме того, должны учитываться не только траектории движения частиц в зонах камеры, но и характер – виды самого движения – в том числе переходные завихренные области, с замкнутыми линиями тока, на границах которых могут наблюдаться интенсивные турбулентные явления, переходные процессы и прочие.

Особое внимание должно быть уделено приповерхностным областям быстро вращающихся рабочих элементов, содержащих в том числе криволинейные грани и поверхности.

В отечественной и зарубежной научной литературе к сожалению, по этим явлениям не находятся развитых теорий, за исключением отдельных частных случаев теоретических предпосылок в начальном состоянии.

При расчете турбулизованных потоков, как и отмечается в специальной литературе приходится учитывать свойства континуальности, нерегулярности, нелинейности вихревой природы, диссипативности, диффузионности [17], [18], [19]. Теории многофазных систем, пока разработаны для нужд двигателестроения, фильтрации взвесей и аэрозолей и т.д., но нет исследований по гетерогенным взвесям из геоматериалов разной плотности и фактуры микрочастиц. Особенно, актуальным является разработка теории и методов математического моделирования для отделения частиц с высокой плотностью для стружковидной, мелкожильной структуры, для благородных металлов штокверкового типа.

Несмотря на интенсивное развитие в последнее время средств компьютерного моделирования, для моделирования многофазных смесей ведущими методами изучения явлений пневмосепарации остаются экспериментальные методы.

Конструктивно пневмосепараторы по известной классификации Р.Нагеля могут быть реализованы на нескольких различных типов. Центробежные пневмосепараторы в свою очередь разделены на три группы: с вращающейся и с неподвижной зоной сепарации; с вращающимися тарелками. По принципу действия современные центробежные классифицирующие устройства делятся на две группы:

- а) воздушно-проходные классификаторы;
- б) воздушно-замкнутые (циркуляционные) классификаторы.

В результате проведенного литературного анализа опытов пневмосепарации и применяемых в технологическом процессе обогащения полезных ископаемых конструкций пневматических аппаратов, нами разработана конструкция нового модифицированного многоступенчатого пневматического сепаратора, в котором более точно учитываются:

- 1) физические размеры геоматериалов подлежащих разделению и классификации в несущей воздушной среде;
- 2) оптимизация действующих на частицы сил, путем подбора наиболее лучших конструктивных параметров аппарата (форма рабочих деталей, направления действующих физических сил и т.д.);
- 3) динамика и структура образования областей для разных фракций, в т.ч. в ступенях конструкции, на основе физико-математической модели.
- 4) характер динамики поведения пылевых и газопылевых смесей в условиях непрерывного потока, подбор технических режимов для поддержания скоростей несущих воздушных потоков, рабочих сечений и кривизны движения частиц.

На рисунках 9, 10 представлена схема разработанного усовершенствованного центробежного пневмосепаратора. В ходе проведения исследований на новой модифицированной установке будут проведены различные вычисления (гидромеханики, механики газа, газовая динамика и т.д.) и корректировки установки [20], [21], [22], [23].

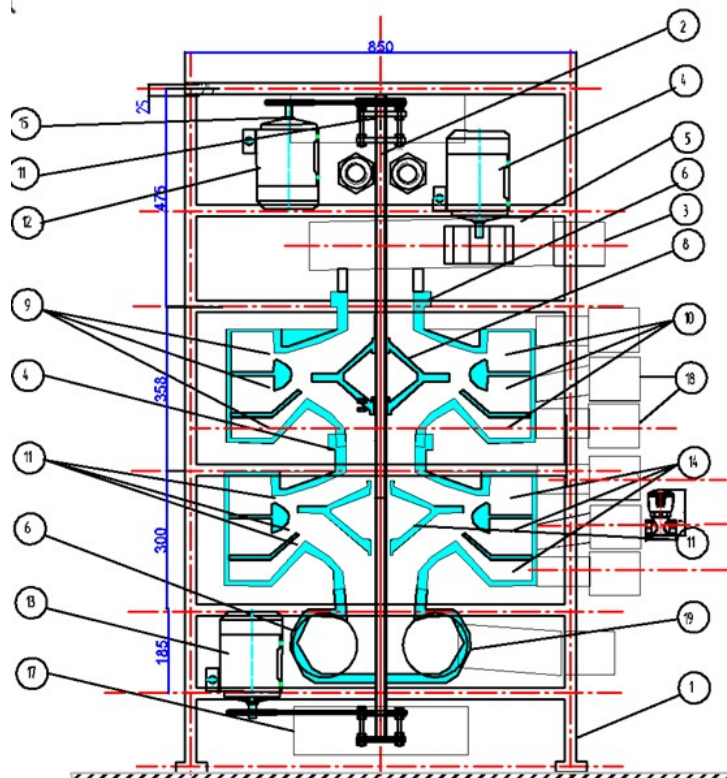


Рисунок 9 - Схема лабораторной установки модифицированного пневмосепаратора:  
 1 - основание шасси; 2 - ось ротора; 3 - входной патрубок; 4 - электродвигатель грубого очистителя; 5 - центробежный очиститель крупных фракций; 6 - статор с камерой 1-ступени; 7 - электродвигатель 1-ступени; 8 - ротор 1-1 ступени; 9 - щелевидные каналы 1-й ступени; 10 - камеры 1-а ступени; 11 - регулятор высоты ротора 1-й ступени; 12 - каналы 2-й ступени; 13 - электродвигатель 2-ступени; 14 - камеры 2 - 2 ступени; 15 - ротор 2 - 2 ступени; 16 - центробежный очиститель крупных фракций; 17 - регулятор высоты ротора 2-й ступени; 18 - выходные патрубки по фракциям; 19 - тороидальный эвакуатор остаточной газопылевой смеси  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.88.9>

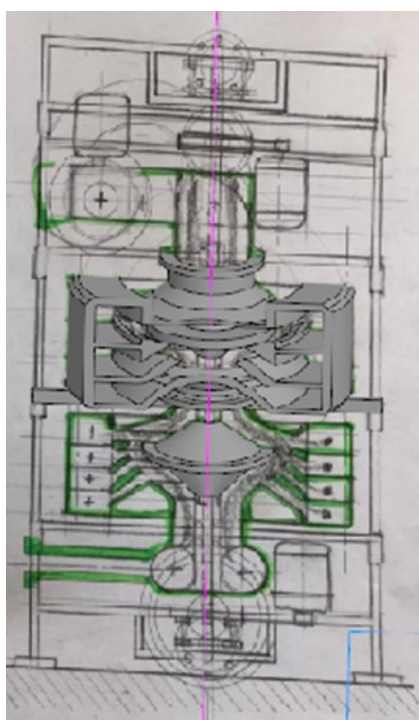


Рисунок 10 - Разрез лабораторной установки модифицированного пневмосепаратора  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.88.10>



## Обсуждение

В разработанном и изготовленном модифицированном лабораторном центробежном пневмосепараторе будут проведены исследования многофазного течения мелкоструктурированных потоков в камерах с криволинейными объемами и поверхностями с использованием цифровых и математических моделей. На основе экспериментальных исследований создается физико-математическая модель, описывающая турбулентные потоки воздушной среды в рабочем пространстве пневматических центробежных сепараторов, физико-математическое моделирование движения минеральных частиц и процессы разделения тонкодисперсных порошкообразных материалов в турбулентном пылевоздушном потоке в рабочих элементах центробежных сепараторов. Проведенные научные исследования позволят выявить основные физические параметры и критерии, воздействующие на процесс разделения полезных минералов по размерам и плотностям. Разработанная физико-математическая модель поведения различных минералов турбулентном песчано-воздушном потоке, позволит разработать новые модели центробежных пневматических сепараторов с высокой эффективностью процесса обогащения и классификации минеральных частиц по необходимым размерам и плотностям. Что в свою очередь позволит разработать и внедрить инженерные методики для расчета граничного размера разделяемого тонкоизмельченного геоматериала и определения кривой разделения мелкодисперсных частиц по размерам и плотностям в рабочих органах центробежных пневмосепараторов [24], [25], [26], [27], [28], а также внедрить в горнодобывающее производство новые высокотехнологичные и современные оборудования с высокой эффективностью извлечения полезных ископаемых.

## Заключение

В результате изготовления модифицированного пневмосепаратора ожидается достижение следующих целей и решение задач:

- 1) уменьшение массогабаритных и технических характеристик аппаратов;
- 2) обеспечение модульности, взаимозаменяемости и дополнительности узлов;
- 3) значительное повышение эффективности извлечения полезных минералов по диапазону крупности;
- 4) уменьшение себестоимости и увеличение технологичности процессов изготовления пневматических сепараторов.

## Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0022, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800089-2) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН грант №13.ЦКП.21.0016.

## Конфликт интересов

Не указан.

## Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

## Funding

The work was done within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0297-2021-0022, EGISU Research and Development Centre No. 122011800089-2) using the equipment of the CKP of FIC YaSC SB RAS grant No. 13.FRC.21.0016.

## Conflict of Interest

None declared.

## Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

## Список литературы / References

1. Пат. 2185889 Российская Федерация, МКИ В03В9/00,7/00. Рудообогатительный передвижной модульный комплекс / Матвеев А.И., Гладышев А.М., Григорьев А.Н. [и др.] — 2002, Бюл. №21.
2. Пат. 2167005 Российская Федерация, 7 В 07 В 7/08. Пневмосепаратор / Матвеев А И, Филиппов В.Е., Федоров Ф.М. [и др.] — 2001, Бюл. №14.
3. Филиппов В.Е. Воздушная сепарация / В.Е. Филиппов, А.И. Матвеев, И.Ф. Лебедев // Драгоценные металлы и камни — проблемы добычи и извлечения из руд, песков и вторичного сырья. — М: Иргиредмет, 2001. — С. 56-58.
4. Курков А.В. Информационно-аналитические материалы: Мировые достижения развития методов, техники и технологий переработки минерального сырья. Серия: Обогащение минерального сырья / А.В. Курков, С.И. Ануфриева [и др.] — М.: ВИМС, 2020. — 52 с.
5. Филиппов В.Е. Экспериментальные исследования характера поведения минеральных частиц в гидроаэродинамической среде / В.Е. Филиппов [и др.]; отв. ред. А.И. Матвеев. — Новосибирск: СО РАН, 2013.
6. Пат. 2407601 Российская Федерация, ПК В07В7/083. Способ воздушно-центробежной классификации порошков и устройство для его осуществления / Зятиков П.Н., Росляк А.Т., Васенин И.М. [и др.] — 2010, Бюл. №36.
7. Шваб А.В. Моделирование процесса разделения частиц при турбулентном режиме течения в воздушно-центробежном классификаторе / А.В. Шваб, Е.Ю. Воронцова, Ш.Р. Садретдинов // Известия ВУЗов. Физика. — 2008. — Т. 51 — № 8/2. — С. 271-276.
8. Вараксин А.Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами / А.Ю. Вараксин. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 192 с.
9. Вараксин А.Ю. Столкновения в потоках газа с твердыми частицами / А.Ю. Вараксин. — М. Физматлит, 2008. — 312 с.

10. Зайчик Л.И. Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости / Л.И. Зайчик, В.М. Алипченков. — М.: Физматлит. 2007. — 312 с.
11. Богданов Л.Н. Исследование параметров зоны воздушно-центробежной классификации в пневмоциркуляционном аппарате, существенно влияющих на процесс разделения тонкодисперсного материала / Л.Н. Богданов, А.Ю. Бирюков, С.А. Афанасьева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2013. — Т. 56. — № 9-3. — С. 21-23.
12. Садретдинов Ш.Р. Исследование гидродинамики закрученного течения в вихревой камере с двумя зонами подвода газа / Ш.Р. Садретдинов, А.В. Шваб, Н.С. Евсеев // Вестник Пермского университета Математика. Механика. Информатика — 2011. — Т. 5(9). — С. 83-86.
13. Стрелец К.И. Численное решение уравнений турбулентной диффузии в закрученном потоке газа / К.И. Стрелец // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2010. — Т. 5. — № 108. — С. 156-159.
14. Шваб А.В. Моделирование процесса фракционного разделения частиц в воздушно-центробежном классификаторе / А.В. Шваб, П.Н. Зятнков, Ш.Р. Садретдинов [и др.] // Теоретические основы химической технологии. — 2010. — Т. 44. — № 6. — С. 641-650.
15. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей / К. Флетчер. — М.: Мир, 1991. — Т. 2. — 552 с.
16. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон. — М.: Мир, 1990. — Т. 1. — 384 с.
17. Любимов Д.А. Анализ турбулентных струйных и отрывных течений в элементах ТРД комбинированными RANS/LES-методами высокого разрешения: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук / Д.А. Любимов. — Москва, 2014. — 289 с.
18. Романюк Д.А. Нестационарные двухфазные течения газа с частицами в решетках профилей / Д.А. Романюк, Ю.М. Циркунов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. — 2020. — № 5. — С. 33-45.
19. Перепелкин М.А. Динамическое моделирование подвижности минеральной постели в центробежных концентраторах / М.А. Перепелкин, В.И. Склянов // Горная промышленность. — 2021. — С. 114-119.
20. Волков К.Н. Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. — М.: Физматлит. 2012. — 466 с.
21. Самарский А.А. Разностные методы задач газовой динамики / А.А. Самарский, Ю.П. Попов. — М.: Наука. 1992. — 424 с.
22. Spalart P. A One-equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows: Technical Report AIAA-92-0439 / P. Spalart, S. Allmaras. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992.
23. Orszag S.A. Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations / S.A. Orszag, V. Yakhot, W.S. Flannery [et al.] // International Conference on NearWall Turbulent Flows. — Tempe, 1993.
24. Gavrilieva U. Generalized Multiscale Finite Element Method for Elastic Wave Propagation in the Frequency Domain / U. Gavrilieva, M. Vasilyeva, E. Chung // Computation. — 2020. — Vol. 8. — № 3. — P. 63.
25. Rybdylova O. A Model for Multi-component Droplet Heating and Evaporation and Its Implementation into ANSYS Fluent / O. Rybdylova // Heat and Mass Transfer. — 2018. — № 90. — P. 29-33.
26. Chung E. Computational Multiscale Methods for First-order Wave Equation Using Mixed CEM-GMsFEM / E. Chung, C.M. Pun // Journal of Computational Physics. — 2020. — P. 109359.
27. Tyrylgina A. Embedded Fracture Model in Numerical Simulation of the Fluid Flow and Geo-mechanics Using Generalized Multiscale Finite Element Method / A. Tyrylgina, M. Vasilyeva, E.T. Chung [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing. 2019. — Vol. 1392. — P. 012075.
28. Chung E.T. Constrained Energy Minimization Based Upscaling for Coupled Flow and Mechanics / E.T. Chung, M. Vasilyeva // Journal of Computational Physics. — 2019. — № 376. — P. 660-674.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Pat. 2185889 Rossijskaja Federacija, MKI V03V9/00,7/00. Rudoobogatitel'nyj peredvizhnoj modul'nyj kompleks [Pat. 2185889 Russian Federation, MKI B03B9/00,7/00. Ore processing mobile modular complex] / Matveev A.I., Gladyshev A.M., Grigor'ev A.N. [et al.] — 2002, Bul. №21. [in Russian]
2. Pat. 2167005 Rossijskaja Federacija, 7 V 07 V 7/08. Pnevmoseparator [Pat. 2167005 Russian Federation, 7 B 07 B 7/08. Pneumatic separator] / Matveev A I, Filippov V.E., Fedorov F.M. [et al.] — 2001, Bul. №14. [in Russian]
3. Filippov V.E. Vozdushnaja separacija [Air Separation] / V.E. Filippov, A.I. Matveev, I.F. Lebedev // Dragocennye metally i kamni — problemy dobychi i izvlechenija iz rud, peskov i vtorichnogo syr'ja [Precious Metals and Stones - Problems of Mining and Extraction from Ores, Sands and Secondary Raw Materials]. — M: Irgiredmet, 2001. — P. 56-58. [in Russian]
4. Kurkov A.V. Informacionno-analiticheskie materialy: Mirovye dostizhenija razvitija metodov, tehniki i tehnologij pererabotki mineral'nogo syr'ja. Serija: Obogashhenie mineral'nogo syr'ja [Information and Analytical Materials: World Achievements of Development of Methods, Techniques and Technologies of Mineral Raw Material Processing. Series: Enrichment of Mineral Raw Materials] / A.V. Kurkov, S.I. Anufrieva [et al.] — M.: VIMS, 2020. — 52 p. [in Russian]
5. Filippov V.E. Jeksperimental'nye issledovanija haraktera povedenija mineral'nyh chastic v gidroaerodinamicheskoj srede [Experimental Studies of the Behaviour of Mineral Particles in a Hydroaerodynamic Medium] / V.E. Filippov [et al.]; chief ed. A.I. Matveev. — Novosibirsk: SB RAS, 2013. [in Russian]
6. Pat. 2407601 Rossijskaja Federacija, PK V07V7/083. Sposob vozdušno-centrobeznoj klassifikacii poroshkov i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija [Pat. 2407601 Russian Federation, PK B07B7/083. Method of Air-centrifugal Classification of Powders and a Device for its Realization] / Zjaticov P.N., Rosljak A.T., Vasenin I.M. [et al.] — 2010, Bul. №36. [in Russian]
7. Shvab A.V. Modelirovanie processa razdelenija chastic pri turbulentnom rezhime techenija v vozdušno-centrobeznom klassifikatore [Modelling of Particle Separation Process at Turbulent Flow Mode in Air-Centrifugal Classifier] / A.V. Shvab,

- E.Ju Voroncova, Sh.R. Sadretdinov // *Izvestija VUZov. Fizika* [Proceedings of Universities. Physics]. — 2008. — Vol. 51 — № 8/2. — P. 271-276. [in Russian]
8. Varaksin A.Ju. Turbulentnye techenija gaza s tverdymi chasticami [Turbulent Flows of Gas with Solid Particles] / A.Ju. Varaksin. — M.: FIZMATLIT, 2003. — 192 p. [in Russian]
9. Varaksin A.Ju. Stolknovenija v potokah gaza s tverdymi chasticami [Collisions in Gas Flows with Solid Particles] / A.Ju. Varaksin. — M. Fizmatlit, 2008. — 312 p. [in Russian]
10. Zajchik L.I. Statisticheskie modeli dvizhenija chastic v turbulentnoj zhidkosti [Statistical Models of Particle Motion in Turbulent Fluid] / L.I. Zajchik, V.M. Alipchenkov. — M.: Fizmatlit, 2007. — 312 p. [in Russian]
11. Bogdanov L.N. Issledovanie parametrov zony vozdušno-centrobezchnoj klassifikacii v pnevmocirkulacionnom apparate, sushhestvenno vlijajushhij na process razdelenija tonkodispersnogo materiala [A Study of the Parameters of the Air-Centrifugal Classification Zone in a Pneumocirculation Apparatus Significantly Influencing the Process of Separation of Fine-Dispersed Material] / L.N. Bogdanov, A.Ju. Birjukov, S.A. Afanas'eva [et al.] // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika* [Proceedings of Universities. Physics]. — 2013. — Vol. 56. — № 9-3. — P. 21-23. [in Russian]
12. Sadretdinov Sh.R. Issledovanie gidrodinamiki zakruchennogo techenija v vihrevoj kamere s dvumja zonami podvoda gaza [A Study of the Hydrodynamics of the Swirling Flow in a Vortex Chamber with Two Gas Supply Zones] / Sh.R. Sadretdinov, A.V. Shvab, N.S. Evseev // *Vestnik Permskogo universiteta Matematika. Informatika* [Bulletin of Perm University Mathematics. Mechanics. Informatics] — 2011. — Vol. 5(9). — P. 83-86. [in Russian]
13. Strelec K.I. Chislennoe reshenie uravnenij turbulentnoj diffuzii v zakruchennom potoke gaza [Numerical Solution of Turbulent Diffusion Equations in a Swirling Gas Flow] / K.I. Strelec // *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. Informatika. Telekomunikacii. Upravlenie* [Scientific and Technical Bulletins of Saint-Petersburg State Polytechnic University. Informatics. Telecommunications. Management]. — 2010. — Vol. 5. — № 108. — P. 156-159. [in Russian]
14. Shvab A.V. Modelirovanie processa frakcionnogo razdelenija chastic v vozdušno-centrobezchnom klassifikatore [Modelling of the Fractional Particle Separation Process in an Air Centrifugal Classifier] / A.V. Shvab, P.N. Zjatnikov, Sh.R. Sadretdinov [et al.] // *Teoreticheskie osnovy himicheskoj tehnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology]. — 2010. — Vol. 44. — № 6. — P. 641-650. [in Russian]
15. Fletcher K. Vychislitel'nye metody v dinamike zhidkostej [Computational Methods in Fluid Dynamics] / K. Fletcher. — M.:Mir, 1991. — Vol. 2. — 552 p. [in Russian]
16. Anderson D. Vychislitel'naja gidromehanika i teploobmen [Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer] / D. Anderson. — M.: Mir, 1990. — Vol. 1. — 384 p. [in Russian]
17. Ljubimov D.A. Analiz turbulentnyh strujnyh i otrvnyh techenij v jelementah TRD kombinirovannymi RANS/LES-metodami vysokogo razreshenija [An Analysis of Turbulent Jet and Detachment Currents in the Elements of TRD by Combined High-Resolution RANS/LES Methods]: diss. ... Physic-mat. Sciences / D.A. Ljubimov. — Moscow, 2014. — 289 p. [in Russian]
18. Romanjuk D.A. Nestacionarnye dvuhfaznye techenija gaza s chasticami v reshetkah profilej [Unsteady Two-Phase Flow of Gas with Particles in Lattice Profiles] / D.A. Romanjuk, Ju.M. Cirkunov // *Izvestija RAN. Mehanika zhidkosti i gaza* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Fluid and Gas Mechanics]. — 2020. — № 5. — P. 33-45. [in Russian]
19. Perepelkin M.A. Dinamicheskoe modelirovanie podvizhnosti mineral'noj posteli v centrobezchnyh koncentratorah [Dynamic Modelling of Mineral Bed Mobility in Centrifugal Concentrators] / M.A. Perepelkin, V.I. Skljanov // *Gornaja promyshlennost'* [Mining Industry]. — 2021. — P. 114-119. [in Russian]
20. Volkov K.N. Vychislitel'nye tehnologii v zadachah mehaniki zhidkosti i gaza [Computational Technologies in Problems of Fluid and Gas Mechanics] / K.N. Volkov, V.N. Emel'janov. — M.: Fizmatlit, 2012. — 466 p. [in Russian]
21. Samarskij A.A. Raznostnye metody zadach gazovoj dinamiki [Difference Methods for Gas Dynamics Problems] / A.A. Samarskij, Ju.P. Popov. — M.: Nauka, 1992. — 424 p. [in Russian]
22. Spalart P. A One-equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows: Technical Report AIAA-92-0439 / P. Spalart, S. Allmaras. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992.
23. Orszag S.A. Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations / S.A. Orszag, V. Yakhot, W.S. Flannery [et al.] // *International Conference on NearWall Turbulent Flows*. — Tempe, 1993.
24. Gavrilieva U. Generalized Multiscale Finite Element Method for Elastic Wave Propagation in the Frequency Domain / U. Gavrilieva, M. Vasilyeva, E. Chung // *Computation*. — 2020. — Vol. 8. — № 3. — P. 63.
25. Rybdylova O. A Model for Multi-component Droplet Heating and Evaporation and Its Implementation into ANSYS Fluent / O. Rybdylova // *Heat and Mass Transfer*. — 2018. — № 90. — P. 29-33.
26. Chung E. Computational Multiscale Methods for First-order Wave Equation Using Mixed CEM-GMsFEM / E. Chung, C.M. Pun // *Journal of Computational Physics*. — 2020. — P. 109359.
27. Tyrylgina A. Embedded Fracture Model in Numerical Simulation of the Fluid Flow and Geo-mechanics Using Generalized Multiscale Finite Element Method / A. Tyrylgina, M. Vasilyeva, E.T. Chung [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2019. — Vol. 1392. — P. 012075.
28. Chung E.T. Constrained Energy Minimization Based Upscaling for Coupled Flow and Mechanics / E.T. Chung, M. Vasilyeva // *Journal of Computational Physics*. — 2019. — № 376. — P. 660-674.