

УДК 621.928.6:622.342.1
DOI 10.17513/use.38157

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПНЕВМОСЕПАРАТОРОВ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ ПО ПЛОТНОСТИ И КРУПНОСТИ

Лебедев И.Ф.

*ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук» Институт горного дела Севера
им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, e-mail: gds@ysn.ru*

В статье приводятся результаты проведенных многолетних исследований в области воздушного (сухого) способа разделения (обогащения) минералов полезных ископаемых. Даны результаты изготовленного пневматического сепаратора типа ПОС-2000, который прошел опытно-промышленные испытания в ряде золотосодержащих рудных месторождений Якутии и Амурской области. В работе описаны наработки по совершенствованию конструктивных и производственных параметров установки, где актуальным и востребованным в данное время, особенно для мобильных передвижных вариантов обогатительных установок, является уменьшение массогабаритных параметров. В статье показаны лабораторные экспериментальные работы, направленные на детализованное изучение особенностей динамики поведения многофазных сред в сложных камерах как в упрощенных ламинарных, так и в турбулентных случаях. Для более детального изучения влияния различного воздушного потока на процесс разделения различных минералов по плотности и крупности собрана экспериментальная лабораторная установка с тремя тороидальными зонами, состоящая из гибкой прозрачной пластиковой армированной трубы, изогнутой в виде винта (винтовой геликоид). Рассмотрены предельные углы подъема частиц по внутренней границе лабораторного стенда, скорости витания частиц в зависимости от плотности и размеров, предельные углы зависания и витания при разных воздушных скоростях. Проведены исследования распределения частиц в радиальном сечении на различных участках трубы (S_1 - S_3), в которых получены угловые различия по распределению из-за разного уровня соотношений центробежной и гравитационных сил, при испытанных скоростях и радиусах поворота. Показаны дальнейшие исследования, направленные на возможность модификации существующего пневмосепаратора для уменьшения массогабаритов, и разработка нового типа центробежного пневмосепаратора.

Ключевые слова: пневматический сепаратор, скорость витания, воздушный поток, аэродинамическая труба, минеральные частицы, многофазная среда, моделирование, центробежные силы

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.

THEORETICAL AND APPLIED FOUNDATIONS OF CREATION OF CENTRIFUGAL PNEUMUS SEPARATORS FOR ENRICHMENT OF PRECIOUS METALS BY DENSITY AND SIZE

Lebedev I.F.

Federal Research Center “Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” Institute of Mining of the North named after: N.V. Chersky Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: igds@ysn.ru

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 a manufactured pneumatic separator of the POS-2000 type, which passed pilot tests in a number of gold ore deposits in Yakutia and the Amur region, are presented. The work presents developments to improve the design and production parameters of the installation, where reduction of weight and size parameters is relevant and in demand at this time, especially for mobile mobile versions of enrichment plants. The article shows laboratory experimental work aimed at a detailed study of the dynamics of the behavior of multiphase media in complex chambers, both in simplified laminar and turbulent cases. For a more detailed study of the influence of different air flow on the process of separating various minerals by density and size, an experimental laboratory installation with three toroidal zones was assembled, consisting of a flexible transparent plastic reinforced pipe, bent in the form of a screw (screw helicoid). The maximum angles of rise of particles along the internal boundary of the laboratory stand, the speed of soaring of particles depending on density and size, the maximum angles of hovering and soaring at different air speeds are considered. Studies have been carried out on the distribution of particles in the radial section in different sections of the pipe (S_1 - S_3), in which angular differences in distribution were obtained due to different levels of the ratio of centrifugal and gravitational forces, at tested speeds and turning radii. Further research aimed at the possibility of modifying the existing pneumatic separator to reduce weight and size and the development of a new type of centrifugal pneumatic separator are shown.

Keywords. Pneumatic separator, soaring speed, air flow, wind tunnel, mineral particles, multiphase medium, modeling, centrifugal forces

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 0297-2021-0022 of the unified state information system for recording research, development and technological work for civil purposes No. 122011800089-2) using the equipment of the Center for Collective Use of the Federal research center «Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», grant No. 13. Center for collective use 21.0016.

Пневматические методы переработки и обогащения тонкоизмельченных полезных ископаемых высокой плотности являются более экологически чистым способом переработки в горном производстве.

Для разделения тонкоизмельченных геоматериалов по узким классам крупности наиболее эффективным является использование воздушновихревых центробежных классификаторов и ротационных пневмосепараторов.

Улучшение технологии и аппаратов пневматического обогащения тонкоизмельченных полезных ископаемых и создание новых современных и эффективных аппаратов пневматического обогащения может быть реализовано только на основе фундаментальных исследований в области гидроаэродинамики мультифазных сред.

Экспериментальные исследования в гидроаэродинамических средах и разработка физической, математической модели связаны с техническими трудностями и экономическими показателями. Более детальную информацию о физическом процессе, происходящем внутри рабочих органов пневмосепараторов, можно получить лишь при разработке математической модели. Разработка математической модели поведения воздушного и песчано-воздушного турбулентного потока в рабочей зоне пневмосепараторов позволит выявить процессы, протекающие в них, что поможет в дальнейшем разработать новые эффективные технологические способы и конструкции пневматических сепараторов для обогащения мелкодисперсных минералов не только по крупности, но и по плотности.

В лаборатории обогащения полезных ископаемых Института горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН (ИГДС СО РАН) были разработаны и апробированы технологии пневматической (безводной) сепарации, использующие центробежные, гравитационные и газодинамические силы [1]. В перспективе использование сухого метода обогащения в горнодобывающей промышленности позволит в последующем отказаться от строительства больших обогатительных фабрик, за счет отказа от применения технологической воды, строительства затратных сооружений системы водоснабжения, хвостохранилищ, обеспечивающих технологических сооружений. Особенно это актуально для безводных мелких и малоресурсных месторождений [2].

Целью исследования является совершенствование конструкционных и производствен-

ных параметров модульной передвижной рудообогатительной установки (МПРОУ), где актуальным и востребованным, особенно для мобильных вариантов, является уменьшение массогабаритных параметров.

Материалы и методы исследования

Одним из самых успешно изготовленных и апробированных пневматических сепараторов для обогащения золотоносных руд является пневмосепаратор типа ПОС-2000 (рис. 1).



Рис. 1. Пневматический сепаратор ПОС-2000

Разработанный и изготовленный пневмосепаратор ПОС-2000 прошел опытно-промышленные испытания на месторождении Одолго (Амурская обл.), руда с прожилками молочного кварца в мусковит-серицитовой слюдянистой массе, с высокой долей свободного относительно крупнофракционного золота. Пневмосепаратор ПОС-2000 испытывался в комплексе с разработанными аппаратами дробления и измельчения. При обогащении тонкоизмельченного материала класса -2 мм на ПОС-2000 достигнуто сокращение в 14-16 раз, установлена максимальная влажность до 7% обогащаемого материала, при которой производится эффективная пневмосепарация без существенной потери производительности и извлечения золота [2], достигнуто извлечение золота до 98%, что доказывает возможность применения воздушного метода разделения и обогащения полезных ископаемых.

Пневмосепаратор может работать в двух режимах. Первый режим в последовательной совместной работе с центробежными измельчителями и раздельная пневмосепарация классифицированного геоматериала после грохочения. В первом режиме работы пневмосепаратора для обработки и анализа продуктов разделения пневмосепарации

ей полученный концентрат просеивается на два класса – 1 и + 1 мм. Затем класс – 1 мм обогащается на концентрационном столе СКО-0.5 для выделения черного концентрата [3]. Концентрат стола далее обрабатывается на анализаторе Мозли для получения золотой головки. Классы крупности +1 мм и хвосты пневмосепарации также анализируются прямым пробирным методом. Во втором режиме работы, при пневмосепарации продуктов грохочения класса крупности – 1 мм, концентрат пневмосепарации также для анализа качества разделения обогащается на концентрационном столе СКО-0.5. Концентрат стола для выделения золотой головки обрабатывается на столе Мозли.

При переработке золотосодержащих руд ряда месторождений: Нежданинское; Дуэт; Сарылах; Малтан; Нагорное; Якутское; Вьюн; Мало-Тарынское (Якутия); Гурбей (Иркутская обл.), получены положительные высокие результаты извлечения, подтверждающие эффективность сухого обогащения руд со свободным золотом [2].

На данном этапе, на базе исследований по опыту использования аппаратов воздушной классификации [4-6], проведенных в ИГДС СО РАН и ГБОУ ВПО СВФУ, проводятся работы по совершенствованию конструктивных и производственных параметров установки, где актуальным и востребованным, особенно для мобильных вариантов установок, является уменьшение массогабаритных параметров. Как показывает анализ – это возможно только при интенсификации сил, воздействующих на рабочее тело с полезными материалами, когда в основном процессе обогащения (разделения полезной фракции) ключевой упор делается на пару центробежных и газодинамических сил и минимизируется вклад гравитационной силы, имеющей фундаментальное физическое ограничение. Возрастает роль точного учета особенностей газовой динамики как самой несущей среды, так и рабочей многофазной среды с полезными ископаемыми, требующая для моделирования использование современной компьютерной техники [7-9].

Для анализа вышеуказанных направлений проводятся экспериментальные работы, направленные на детализованное изучение особенностей динамики поведения многофазных сред в сложных камерах, как в упрощенных ламинарных, так и турбулентных случаях [10-12].

Для более детального изучения влияния различного воздушного потока на процесс

разделения минералов по плотности и крупности собрана экспериментальная лабораторная установка с тремя тороидальными зонами (рис. 2), состоящая из гибкой прозрачной пластиковой армированной трубы, изогнутой в виде винта (винтовой геликоид). Установка собрана из стальных труб, с хомутами для изменения положения рабочей полости в пространстве и фиксации. Для подачи воздушного потока использовался промышленный пылесос. Скорость потока регулируется сферическим воздушным краном.

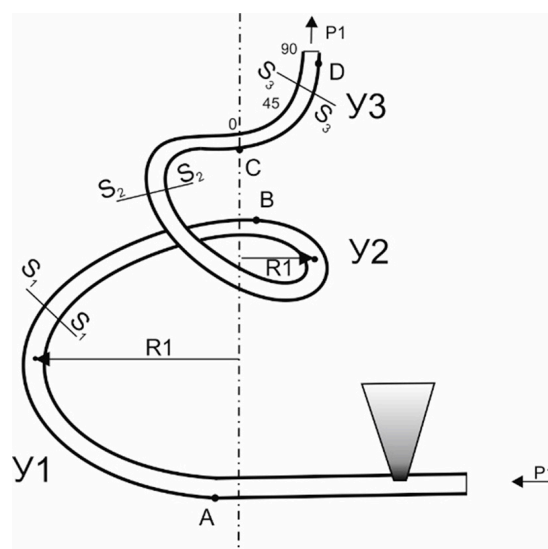


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

Для изучения поведения различного воздушного потока и его влияния на процесс разделения минералов по плотности и крупности установка разделена на 3 зоны.

1. Зона Y1 (точки А-В), с радиусом 1.5 м, без подъёма.
2. Зона Y2 (В-С), с радиусом 0.35 м, с винтовым подъёмом с углами 45-60 град.
3. Зона Y3 (С-Д) – с L-образным подъёмом, с углами от 0 до 90 град.

По результатам проведенных опытов были рассмотрены предельные углы подъёма частиц по внутренней границе трубы, скорости витания частиц в зависимости от плотности и размеров, предельные углы зависания и витания при разных воздушных скоростях.

Проведены исследования распределения частиц в радиальном сечении на различных участках трубы (S₁-S₃), в которых получены угловые различия по распределению из-за разного уровня соотношений центробежной и гравитационных сил, при испытанных скоростях и радиусах поворота (рис. 3).

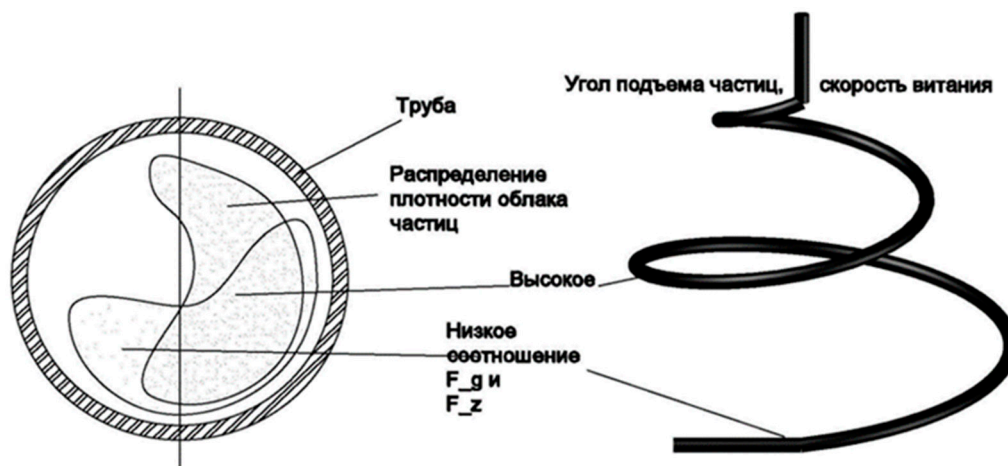


Рис. 3. Распределение частиц в разрезе аэродинамической трубы

В зависимости от радиуса кривизны пролета частиц, соответственно от соотношения центробежной силы к силе тяжести, менялось и распределение пролетающих частиц по квадрантам в поперечном сечении, которое фиксировалось в скоростной видеосъемке. Вид полученного распределения плотностей пролетающих частиц показал перспективность использования центробежных сил в дополнение гравитационным.

По проведенным исследованиям выявлены зависимости разделения минеральных частиц в воздушном потоке:

1) скорость витания частиц находится в пропорциональной зависимости от их гидравлической крупности;

2) зависимость скорости витания от гидравлической крупности частиц, которую можно выразить через плотность и толщину, что значительно упрощает расчеты;

3) миграционная способность частиц с высокой плотностью повышается при присутствии в потоке разделения мелкодисперсного геоматериала;

4) смещение частиц на определенный угол кривизны дуги при заданной скорости потока позволяет оценивать способность перемещения частиц волочением при их скорости витания;

5) изучены возможности замены гравитационных сил инерциальными (центробежными).

Результаты исследования и их обсуждение

На основе анализа публикаций ИГДС СО РАН было проведено моделирование ряда задач, направленных на выяснение особенностей движения частиц для групп

частиц и многофазных сред. Исследование велось как для простых ламинарных видов движений, так и в усложненных и приближенных к реальным процессам турбулентных многофазных потоках, используемых в камерах со сложной геометрией, с учетом закономерностей газовой динамики для выделения рабочих фракций. Итоговое движение минеральных зерен вместе с потоками газа является результатом действия всех сил, приложенных на них (в т.ч. сопротивления воздуха, который учитывается по аналогии с витанием в поле тяготения). Замена силы тяжести на центробежные обусловлена тождеством инерциальности свойств, создаваемым за счет вращения ротора системы. Таким образом, в новой установке в основу положен принцип отделения частиц на потоках газовой струи и центробежных сил. Частицы с превышением скорости витания выталкиваются центробежными силами (с кориолисовой) в специальную камеру, а имеющие меньшую скорость вдуваются в специальную полость, откуда эвакуируются внутренними потоками воздуха.

Выводы

В результате анализа опытов и применяемых в обогащении руд конструкций воздушных сепараторов разработана конструкция многоступенчатого пневмосепаратора, в котором для первых ступеней разделения по крупности используются силы центробежного механического воздействия (от единиц до долей мм), а для более мелких фракций (до 50 мкм) – отделение витающих в рабочем теле частиц в турбулентном потоке с заранее вычисленными криволиней-

ными границами в центробежном газодинамическом потоке. В новой конструкции сепаратора более точно учитываются:

1) линейные размеры, геометрия и массовая разница частиц, подлежащих сепарации и классификации;

2) модификация направлений и характера воздействия сил, действующих на частицы, путем выбора оптимальных конструктивных решений установки (геометрии деталей ступеней, направления взаимодействия сил: радиально-осевые, парные и группы комбинации сил и др.);

3) динамика и структура образования областей для разных фракций, в т.ч. в ступенях конструкции, на основе цифровой модели. Например, для первых ступеней разделения по крупности (единицы и доли мм) используется сила контактного механического воздействия, а для более мелких фракций (от 200 до 50 мкм) – отделение витающих в рабочем теле частиц в центробежном вихревом поле с заранее вычисленными криволинейными границами;

4) сопряжение характеристик потоков газопылевых смесей в условиях непрерывного потока, балансировка режимов для поддержки технических параметров (скоростей, потоков, сечений, концентраций, радиусов движения частиц и пр.).

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

1. Значительное уменьшение массогабаритных характеристик установки.

2. Обеспечение модульности, взаимозаменяемости и дополнительности узлов.

3. Увеличение диапазона крупности извлечения полезных минералов.

4. Удешевление и увеличение технологичности процессов изготовления опытного и серийного образцов.

Список литературы

1. Матвеев А.И., Филиппов В.Е., Федоров Ф.М., Григорьев А.Н., Яковлев В.Б., Еремеева Н.Г., Слепцова Е.С., Гладышев А.М., Винокуров В.П. Пневмосепаратор // Патент РФ №2167005, 7 В 07 В 7/08. 2001. Бюл. №14. Ч. 2. С. 346.

2. Матвеев А.И., Лебедев И.Ф., Винокуров В.Р., Львов Е.С. Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд полезных ископаемых // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 613-622. DOI: 10.31897/PMI.2022.90.

3. Лебедев И.Ф. Технологические исследования свинцовых руд методом пневмосепарации // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXVII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XX Уральской горнопромышленной декады (г. Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 г.). Екатеринбург: ИП Русских А.В., 2022. С. 228-233.

4. Богданов Л.Н., Бирюков А.Ю., Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Обьедков А. К., Полшошко В.А. Исследование параметров зоны воздушно-центробежной классификации в пневмоциркуляционном аппарате, существенно влияющих на процесс разделения тонкодисперсного материала // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, № 9-3. С. 21-23.

5. Филиппов В.Е. Экспериментальные исследования характера поведения минеральных частиц в гидроэродинамической среде. Новосибирск: Гео, 2013. 85 с.

6. Перепелкин М.А., Склянов В.И. Динамическое моделирование подвижности минеральной постели в центробежных концентраторах // Горная промышленность. 2021. № 2. С. 114–119.

7. Романюк Д.А., Циркунов Ю.М. Нестационарные двухфазные течения газа с частицами в решетках профилей // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2020. № 5. С. 33-45.

8. Любимов Д.А. Анализ турбулентных струйных и отрывных течений в элементах ТРД комбинированными RANS/LES-методами высокого разрешения: дис. ... докт. физ.-мат. Москва, 2014. 289 с.

9. Saxena S., Jothiprasad G., Bourassa C., Pritchard B. Numerical simulation of particulates in multistage axial compressors // J. Turbomach. March 2017. V. 139. DOI: 10.1115/1.4034982.

10. Ревизников Д.Л., Способин А.В., Сухарев Т.Ю. Численное моделирование обтекания затупленного тела сверхзвуковым полидисперсным потоком // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55, № 3. С. 418–425.

11. Зайчик Л.И., Алипченков ВМ. Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости. М.: Физматлит, 2007. 312 с.

12. Садретдинов Ш.Р., Шваб А.В., Евсеев Н.С. Исследование гидродинамики закрученного течения в вихревой камере с двумя зонами подвода газа // Вестник Пермского университета Математика. Механика. Информатика. 2011. № 5(9). С. 83-86.