ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОМОЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С СЕПАРАТОРОМ КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ

В. С. Севостьянов¹, В. И. Уральский¹,
И. П. Бойчук², Р. А. Ермилов¹

*Кафедра технологических комплексов, машин и механизмов (1),
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический
университет им. В. Г. Шухова», ermilov.rodion@gmail.com; г. Белгород, Россия;
кафедра эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики (2),
ФГБОУ ВО «Государственный морской университет
имени адмирала Ф. Ф. Ушакова», г. Новороссийск, Краснодарский край, Россия*

Ключевые слова: воздушный сепаратор комбинированного действия; поэтапное измельчение; пресс-валковый измельчитель; технологический комплекс; тонкодисперсный продукт; центробежный помольно-смесительный агрегат.

Аннотация: Разработан технологический комплекс для тонкого измельчения материалов с различными физико-механическими характеристиками. Предложена математическая модель замкнутого цикла с воздушным сепаратором комбинированного действия. Получены интегральные функции разделения воздушного сепаратора. Сделан вывод о достаточно высокой степени точности приближенного аналитического решения.

Введение

Актуальность получения высокодисперсных материалов из природного и техногенного сырья обусловлена большой значимостью экологической и экономической целесообразности использования различных отходов промышленности. Одним из данных направлений является комплексная переработка отходов горнодобывающего производства, в частности, использование железосодержащих хвостов мокрой магнитной сепарации в качестве сырья для получения железоксидных пигментов-наполнителей в производстве лакокрасочных материалов [1 – 3].

Эффективным способом повышения степени дисперсности измельчаемых материалов является организация и совершенствование замкнутого цикла измельчения в помольных агрегатах повышенной энергоемкости и селективного измельчения.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности процесса измельчения является организация постадийного помола материалов с обеспечением микродефектной структуры на первых стадиях, что может быть достигнуто за счет создания специальных агрегатов селективного помола и повышенной энергонапряженности. Измельчение частиц с микродефектной структурой, а также реализация возможности избирательного помола (изменение величины ударного, ударно-истирающего или истирающего воздействия) в помольном агрегате вибрационно-центробежного типа, работающего в открытом или замкнутом цикле, обеспечивает снижение энергозатрат до 20 – 30 % и повышает качество измельченного продукта [4].

Методология

Для получения высокодисперсных порошков необходимо осуществлять комплексный подход. При его реализации, а также создании техники селективного измельчения материалов необходимо использовать следующие механо-технологические приемы:

- организация постадийных процессов измельчения с реализацией объемно-сдвигового деформирования материала и обеспечением его микродефектной структуры;
- осуществление внутреннего или внешнего рецикла измельченных материалов;
- обеспечение возможности изменения характера динамического воздействия мелющей среды на измельчаемый материал и режимов работы помольного агрегата;
- использование механо-химических способов интенсификации процессов разрушения частиц, особенно на микроуровне;
- реализация открытого или замкнутого цикла помола измельченных частиц на последней стадии.

Основная часть

В направлении создания технологического комплекса для получения высокодисперсных материалов выполнены научно-технические разработки и проведен ряд исследований. За последние несколько лет разработаны машины, предназначенные для предразрушения материалов: пресс-валковые измельчители (ПВИ); центробежные помольно-смесительные агрегаты (ЦПСА), реализующие комплекс динамических нагружений, способствующие эффективному получению высокодисперсных и ультрадисперсных порошков и др.

Разработанные агрегаты используются в технологической линии, состоящей из ПВИ, ЦПСА, воздушного сепаратора комбинированного действия и др. (рис. 1).

Рис. 1. Технологическая линия для производства высокодисперсных материалов

Исходный материал поступает в приемный бункер 1, из которого ячейковым питателем подается в ПВИ 2, где происходит предварительное разрушение материала с обеспечением его микродефектной структуры. Далее материал ленточным питателем 3 и элеватором 4 подается в ЦПСА 5, в котором осуществляется избирательный тонкий помол предварительно измельченного материала. Измельченный материал поступает в трубопровод, где подхватывается потоком сжатого воздуха, создаваемым вентилятором 6, и направляется в воздушный сепаратор-гранулятор комбинированного действия 7. В последнем происходит поэтапное разделение тонкоизмельченного материала на фракции. Пройдя через сепаратор, грубая фракция материала возвращается на доизмельчение в ЦПСА, а тонкая – осаждается в выносных элементах и циклоне 8. Усредненный продукт сепаратора подается в торообразные камеры, в которых, при необходимости, осуществляется гранулирование материала. Осажденный материал в циклоне 8 и выносных элементах сепаратора является готовым продуктом.

На первой стадии измельчения для предварительного разрушения материала используется ПВИ. Эффективность использования предварительного измельчения материала в ПВИ [5], перед его помолом в мельнице, обусловлена не только рациональным способом реализации энергозатрат при непосредственном раздавливающе-сдвиговом воздействии рабочих органов (валков) на разрушаемый материал, но и обеспечением микродефектной структуры частиц, снижающей удельный расход электроэнергии при окончательном домоле материала в мельнице, в том числе в ЦПСА [6].

Отличительной особенностью ЦПСА является реализация в одной технологической машине стадий грубого, тонкого и сверхтонкого измельчения, что обеспечивается различными траекториями движения помольных камер для реализации соответствующих режимов работы мелющей загрузки: для грубого помола – интенсивная ударная нагрузка; тонкого – ударно-истирающее воздействие; сверхтонкого – интенсивное истирание. Принцип работы агрегата заключается в следующем. Исходный материал через загрузочный патрубок и ограничительную решетку поступает в верхнюю помольную камеру, осуществляющую возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости. В результате этого мелющими телам сообщается высокая энергия, способствующая их интенсивному ударному воздействию на материал.

Продольное перемещение материала внутри помольной камеры обеспечивается за счет естественного подпора загружаемым материалом. В результате чего измельчаемый материал через ограничительную решетку, удерживающую мелющие тела внутри помольной камеры, поступает в разгрузочный патрубок, и затем в среднюю помольную камеру, внутри которой имеются также мелющие тела. В средней помольной камере материал вместе с мелющими телами движется по эллипсовидной траектории. Материал измельчается и через специальную ограничительную решетку поступает в нижнюю помольную камеру, где под действием мелющих тел при круговом движении камеры подвергается интенсивному истиранию. Дисперсность готового продукта во многом определяется истирающим воздействием в нижней камере [6].

Одним из эффективных технологических способов повышения процесса измельчения является организация замкнутого цикла помола с применением сепараторов [7], для чего в технологическом модуле используется воздушный сепаратор-гранулятор комбинированного действия [8] (см. рис. 1).

Сепаратор-гранулятор работает следующим образом. Газоматериальный поток, включающий в себя исходный материал и энергоноситель, поступает тангенциально в нижний усеченный конус по загрузочному патрубку. Поднимаясь по

спирали по восходящей линии, наиболее крупные частицы смеси отбрасываются под действием центробежных сил к внутренней поверхности усеченных конусов, при этом теряют свою скорость, ввиду увеличивающегося сечения сепаратора. В дальнейшем выпадают в желобообразный канал усеченного конуса и разгружаются через выгрузочный патрубок. Степень сепарации смеси может регулироваться за счет изменения ряда конструктивно-технологических параметров. Для обеспечения свободного истечения частиц через выгрузочный патрубок угол его наклона к вертикальной оси должен быть больше угла естественного откоса материала. При несоблюдении данного условия процесс самопроизвольной выгрузки частиц затруднен. За счет изменения технологической компоновки приемного конуса и шиберных заслонок имеется возможность варьирования аэродинамических характеристик аппарата (скорости прохождения газоматериального потока, гидравлического сопротивления) [8].

Теоретические исследования.

Моделирование разделения материала в сепараторе

Для получения расчетных характеристик центробежного аппарата необходимо описать происходящие в нем процессы. В общем случае при построении математических моделей учитывается, что на частицу, движущуюся в воздушном потоке, действует целый комплекс внешних сил. В том случае, когда камера сепаратора представляется в виде конуса (рис. 2), внешними силами можно пренебречь по сравнению с силой аэродинамического и гравитационного сопротивления. Поэтому уравнение движения твердой частицы представляется в виде системы дифференциальных уравнений [9]:

$$\begin{cases} m \frac{d\vec{V}}{dt} = C_j S \frac{\rho \vec{U} |\vec{U}|}{2} + m \vec{g}; \\ \alpha^+ = \arctg \left[\operatorname{tg} \alpha^- - \frac{f(k_y + 1)}{k_y} \right]; \\ V(0) = V_0, \quad r(0) = r_0, \end{cases} \quad (1)$$

где m – масса частицы; $\vec{V}$ – вектор скорости частицы; $\vec{U} = \vec{V} - \vec{W}$ – относительная скорость обтекания частицы газовым потоком ($\vec{W}$ – поле скоростей несущего газа); ρ – плотность газа; C_j – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы; S – площадь поперечного (миделева) сечения частицы; α^+ , α^- – углы между вектором скорости частицы и нормалью к поверхности, проведенной в точке соударения частицы со стенкой аппарата; f – коэффициент трения частицы о поверхность; k_y – коэффициент восстановления скорости частицы. Второе уравнение описывает взаимодействие частиц со стенками аппарата.

Поле скоростей закрученного потока в центробежном сепараторе имеет вид:

$$\vec{W} = \{W_\varphi, W_r, W_z\},$$

где W_φ, W_r, W_z – соответственно тангенциальная, радиальная, осевая составляющие скорости.

Рис. 2. Геометрическая модель для определения поля скоростей энергоносителя в сепараторе

Тангенциальная составляющая скорости W_φ определяет главным образом распределение потока и может быть определена из следующего выражения [10]

$$W_\varphi = W_{\varphi 0} \frac{r/r_{\varphi 0}}{(r/r_{\varphi 0})^2 - (r/r_{\varphi 0}) + 1}. \quad (2)$$

Пусть поток в направлении z перемещается со скоростью

$$W_z = \frac{Q}{\pi \left(R_H + z \frac{R_B - R_H}{H_K} \right)^2} k = \frac{Qk}{\pi (a + zb)^2}, \quad (3)$$

где Q – расход через верхнее сечение конуса, $\text{м}^3/\text{ч}$; $a = R_H$, $b = \frac{R_B - R_H}{H_K}$, k – эмпирические коэффициенты; R_H , R_B – нижний и верхний радиусы усеченного конуса, м; H_K – высота усеченного конуса, м; z – текущая координата, м.

Подставив (2), (3) в уравнение неразрывности, получим выражение для радиальной скорости

$$W_r(r, z) = \frac{r^2 Q b k + \pi C_1(r) C_2(z)}{\pi r (a + zb)^3}. \quad (4)$$

Константы C_1 , C_2 определяются из граничных условий $W_r(a, z)$ и $W_r(r, 0)$:

$$W_r(a, z) = \frac{a^2 Q b k + \pi C_1(r) C_2(z)}{\pi a (a + zb)^3}; \quad (5)$$

$$W_r(r, 0) = \frac{r^2 Q b k + \pi C_1(r) C_2(z)}{\pi r a^3}. \quad (6)$$

Таким образом, поле скоростей в конической части сепаратора представим следующими выражениями:

$$W_\varphi = W_{\varphi 0} \frac{r/r_{\varphi 0}}{(r/r_{\varphi 0})^2 - (r/r_{\varphi 0}) + 1}; \quad (7)$$

$$W_z = \frac{Qk}{\pi(a + zb)^2}; \quad (8)$$

$$W_r = \frac{r^2 Qbk + \pi C_1 C_2}{\pi r (a + zb)^3}. \quad (9)$$

На рисунке 3 представлены графики зависимостей по выражениям (7) и (8). Эпюра вектора радиальной скорости $W_r(r, z)$ приведена на рис. 4.

Анализ теоретических зависимостей показывает, что окружная составляющая скорости имеет максимум в точке ввода газовой воздушного потока в камеру сепаратора. Вертикальная компонента скорости из-за наличия сил тяжести убывает с высотой. Радиальная компонента вектора скорости зависит и от высоты, и от расстояния до стенки. С увеличением высоты радиальная скорость уменьшается. В направлении оси r радиальная скорость имеет минимум при $r = r_0$.

Таким образом, система уравнений (1) совместно с уравнениями (7) – (9) является математической моделью для нахождения движения твердой частицы в системе «газ – твердая взвесь».

Рис. 3. Графики зависимостей функций W_ϕ (а) и W_z (б)

Рис. 4. Эпюра вектора скорости $W_r(r, z)$

Математическая модель разделения материала в замкнутом цикле

В целях получения математической модели технологической системы измельчения (ТСИ) принимаем схему движения материала, представленную на рис. 5.

Измельчаемый материал из бункера 5, предварительно смешиваясь с потоком возврата из сепаратора 2, подается в ЦПСА для помола. Измельченный материал пневмотранспортом подается в сепаратор 2, который разделяет его на тонкий продукт (готовый порошок) и грубый продукт (возврат). Готовый продукт выделяют из воздушного потока в системе пылеулавливания 3, а возврат поступает на вход в ЦПСА для доизмельчения. Гранулометрический состав $R_1(\delta)$ и массопоток B_1 продукта ЦПСА зависят от исходной гранулометрии материала $R_C(\delta)$ и его массопотока B_C , а также от указанных характеристик ($R_2(\delta)$, B_2) возврата.

Рис. 5. Схема замкнутого цикла измельчения:

1 – ЦПСА; 2 – сепаратор; 3 – система улавливания готового порошка; 4 – вентилятор; 5 – бункер; 6 – узел смешения

Предположим, что в ТСИ процесс является установившимся и $Q = \text{const}$. Пусть также известны математические модели преобразования гранулометрического состава материала в основных агрегатах системы. Тогда математическая модель замкнутого цикла измельчения состоит из следующей системы уравнений:

$$R_1(\delta) = F_M(R_0(\delta), B_1, Q, P_i); \quad (14)$$

$$\varphi_\delta = \varphi_\delta(\delta, B_1, Q, q_i); \quad (15)$$

$$\bar{\varphi} = \int_0^1 \varphi_\delta(\delta) dR_1; \quad (16)$$

$$R_3(\delta) = \frac{1}{\bar{\varphi}} \int_0^{R_1} \varphi_\delta(\delta) dR_1; \quad (17)$$

$$R_2(\delta) = \frac{1}{1 - \bar{\varphi}} \int_0^{R_1} (1 - \varphi_\delta(\delta)) dR_1; \quad (18)$$

$$B_3 = B_1 \bar{\varphi}; \quad (19)$$

$$B_2 = B_1(1 - \bar{\varphi}); \quad (20)$$

$$R_0(\delta) = R_C(\delta) \bar{\varphi} + R_2(\delta)(1 - \bar{\varphi}); \quad (21)$$

$$B_1 = B_C + B_2; \quad (22)$$

$$B_C = B_3; \quad (23)$$

$$\sum \Delta p_i(B_i, Q) = H_B(Q), \quad (24)$$

где φ_δ – кривая разделения сепаратора; F_M – символическая запись какого-либо уравнения кинетики измельчения; P_i – вектор параметров, управляющих процессом измельчения; q_i – вектор параметров, управляющих процессом сепарации; Δp_i – потери давления на различных участках ТСИ; H_B – напор вентилятора. В данной системе уравнение (14) описывает преобразование гранулометрического состава материала в ЦПСА; (15) – (19) – изменение гранулометрического состава материала при разделении в сепараторе; (21) – (23) – изменение гранулометрического состава при смешении потоков сырья и возврата. Уравнение (24) представляет процесс пневмотранспорта материала в ТСИ.

Функция разделения процесса сепарации в сепараторе из ЦПСА представлена на рис. 6.

Для описания кривой разделения процесса сепарации в сепараторе воспользуемся однопараметрической зависимостью [11]

$$\varphi_\delta \left(\frac{\delta}{\delta_{\text{гр}}} \right) = \left(1 + \exp \left(s \left\{ \left(\frac{\delta}{\delta_{\text{гр}}} \right)^2 - 1 \right\} \right) \right)^{-1}, \quad (25)$$

где δ – размер частиц; $\delta_{\text{гр}}$ – граничный размер разделения; s – свободный параметр.

Поскольку аналитического решения задачи (14) – (24) совместно с условием (25) получить затруднительно, заданные уравнения решались методом последовательных приближений. При этом для сравнения с экспериментом выбирался гранулометрический состав грубого и тонкого продукта после сепаратора. На рисунке 7 представлены интегральные функции разделения R_1, R_2, R_3 .

Рис. 6. График зависимости теоретической кривой разделения процесса сепарации от размера частиц

Рис. 7. Графики зависимостей экспериментальных кривых разделения процесса сепарации от размера частиц:
 $1 - R_1$; $2 - R_2$; $3 - R_3$

Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований использованы хвосты обогащения железистых кварцитов (ХОЖК), гранулометрический состав которых представлен ниже.

Размеры отверстий сит, мм	3	2	1	0,5	0,25	0,08
Остаток на сите, %	10,2	35,1	38,9	7,1	3,6	0,6

После проведения экспериментальных исследований технологического модуля отобранные пробы были подвергнуты гранулометрическому анализу, результаты которого показаны на рис. 8.

Сравнение расчетного и экспериментального значения R_3 приведено на рис. 9, что подтверждает значительную сходимость результатов проведенных исследований (25).

Рис. 8. Графики гранулометрических анализов (начало):
 a – продукт возврата

Рис. 8. Продолжение:
б – измельченный продукт

Рис. 9. Сравнение интегральных зависимостей разделения материала в сепараторе по измельченному продукту:
1 – расчетная R_3 ; 2 – экспериментальная R_4

Выводы

Проведенные конструкторско-технологические разработки патентозащищенных агрегатов, их теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать технологический комплекс для тонкого измельчения материалов с различными физико-механическими характеристиками. Предложена математическая модель замкнутого цикла с воздушным сепаратором комбинированного действия. В рамках модели получены интегральные функции разделения воздушного сепаратора. Анализ сравнения расчетного и экспериментального значений интегральных функций разделения в воздушном сепараторе позволяет сделать вывод о достаточно высокой степени точности приближенного аналитического решения.

Список литературы

1. Технологический комплекс и агрегаты для получения высокодисперсных и ультрадисперсных материалов / С. В. Севостьянов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 680 – 687. doi: 10.17277/vestnik.2017.07.pp.680-687
2. Тарасова, Г. И. Разработка способа утилизации хвостов обогащения железистых кварцитов / Г. И. Тарасова // Экология – образование, наука и промышленность : сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф., – Белгород, 2002. – Ч. 3. – С. 236 – 239.
3. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
4. Шишкин, С. Ф. Расчет процесса измельчения в замкнутом цикле / С. Ф. Шишкин, С. М. Техов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и хим. технология. – 1991. – Т. 34, № 3. – С. 117 – 119.
5. Пат. 2340398 Российская Федерация, МПК В02С 4/00. Пресс-валковый агрегат / А. М. Гридчин, В. С. Севостьянов, В. С. Лесовик, А. А. Романович, Г. М. Редькин, А. В. Колесников ; заявитель и патентообладатель : ГОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – № 2007112760/03 ; заявл. 05.04.2007 ; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34. – 10 с.
6. Пат. 2277973 Российская Федерация, МПК В02С 17/08. Помольно-смесительный агрегат / А. М. Гридчин, В. С. Лесовик, В. С. Севостьянов, В. И. Уральский, Е. В. Сеница ; заявитель и патентообладатель : Общество с ограниченной ответственностью «Технологический комплекс РЕЦИКЛ». – № 2005118705/03 ; заявл. 24.06.2005 ; опубл. 20.06.2006, Бюл. № 17. – 9 с.
7. Повышение эффективности центробежных сепараторов / В. А. Уваров [и др.] // Механизация строительства. – 2015. – № 8 (854). – С. 34 – 36.
8. Пат. 2678279 Российская Федерация, МПК В07В 7/08, В01J 2/28, С22В 1/14. Воздушный сепаратор-гранулятор комбинированного действия / В. С. Севостьянов, И. П. Бойчук, М. В. Севостьянов, Д. Н. Перелыгин, Р. А. Ермилов, П. Ю. Горягин ; заявитель и патентообладатель : ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – № 2018102629; заявл. 23.01.2018 ; опубл. 24.01.2019, Бюл. № 3. – 11 с.
9. Мизонов, В. Е. Аэродинамическая классификация порошков / В. Е. Мизонов, С. Г. Ушаков. – М. : Химия, 1989. – 160 с.
10. Зубков, Д. Э. Экспериментальные исследования аппарата для комбинированной сепарации тонкодисперсных материалов / Д. Э. Зубков, С. П. Нечаев // Вестн. Белгор. гос. технол. ун-та им. В. Г. Шухова. – 2003. – № 6. – С. 303 – 306.
11. Molerus, O. Stochastisches Modell der Gleichgewicht Sichtung / O. Molerus // Chemie-Ingenieur-Technik. – 1967. – Bd. 39, No. 13. – P. 792 – 796.

Theoretical and Experimental Studies of the Grinding Facility with a Combined Separator

V. S. Sevostyanov¹, V. I. Uralsky¹, I. P. Boychuk², R. A. Ermilov¹

*Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms (1),
Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov,
ermilov.rodion@gmail.com, Belgorod, Russia;*

*Department of Operation of Marine Electrical Equipment and Automation Means (2),
Admiral Ushakov Maritime State University,
Novorossiysk, Krasnodar Territory, Russia*

Keywords: combined air separator; stage-by-stage grinding; press roller grinder; technological complex; fine product; centrifugal grinding and mixing unit.

Abstract: A technological complex is developed for fine grinding of materials with various physical and mechanical characteristics. A mathematical model of a closed cycle with a combined air separator is proposed. The integral separation functions of the air separator are obtained. The conclusion about a rather high degree of accuracy of the approximate analytical solution is drawn.

References

1. Sevost'yanov V.S., Ural'skiy V.I., Boychuk I.P., Perelygin D.N., Yermilov R.A. [Technological complex and aggregates for producing highly dispersed and ultrafine materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 680-687, doi: 10.17277/vestnik.2017.07.pp.680-687 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Tarasova G.I. *Ekologiya – obrazovaniye, nauka i promyshlennost': sbornik докладов Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Ecology - Education, Science and Industry: Collection of Reports of the International Scientific-Practical Conference], Belgorod, 2002, part. 3, pp. 236-239. (In Russ.)
3. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnyye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, properties, application], Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 320 p. (In Russ.)
4. Shishkin S.F., Tekhov S.M. [Calculation of the grinding process in a closed cycle], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology], 1991, vol. 34, no. 3, pp. 117-119. (In Russ.)
5. Gridchin A.M., Sevost'yanov V.S., Lesovik V.S., Romanovich A.A., Red'kin G.M., Kolesnikov A.V. *Press-valkovyy agregat* [Press roller aggregate], Russian Federation, 2008, Pat. 2340398. (In Russ.)
6. Gridchin A.M., Lesovik V.S., Sevost'yanov V.S., Ural'skiy V.I., Sinita Ye.V. *Pomol'no-smesitel'nyy agregat* [Grinding and mixing unit], Russian Federation, 2006, Pat. 2277973. (In Russ.)
7. Uvarov V.A., Kharlamov Ye.V., Sharapov R.R., Bagatyrev I.V. [Increasing the efficiency of centrifugal separators], *Mekhanizatsiya stroitel'stva* [Mechanization of construction], 2015, no. 8 (854), pp. 34-36. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Sevost'yanov V.S., Boychuk I.P., Sevost'yanov M.V., Perelygin D.N., Yermilov R. A., Goryagin P.Yu. *Vozdushnyy separator-granulyator kombinirovannogo deystviya* [Combined action air separator-granulator], Russian Federation, 2019, Pat. 2678279. (In Russ.)
9. Mizonov V.Ye., Ushakov S.G. *Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov* [Aerodynamic classification of powders], Moscow: Khimiya, 1989, 160 p. (In Russ.)
10. Zubkov D.E., Nechayev S.P. [Experimental studies of the apparatus for the combined separation of fine materials], *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University V. G. Shukhov], 2003, no. 6, pp. 303-306. (In Russ.)
11. Molerus O. Stochastisches Modell der Gleichgewicht Sichtung, *Chemie-Ingenieur-Technik*, 1967, bd. 39, no. 13, pp. 792-796.

Theoretische und experimentelle Forschung der Mahlanlage mit dem Abscheider der kombinierten Aktion

Zusammenfassung: Es ist ein Technologiekomplex für Feinschleifen der Werkstoffe mit verschiedenen physikalisch-mechanischen Eigenschaften entwickelt. Ein mathematisches Modell des geschlossenen Kreislaufs mit dem kombinierten

Luftabscheider ist vorgeschlagen. Es sind die integralen Trennungsfunktionen des Luftabscheiders erhalten. Die Schlussfolgerung über einen ziemlich hohen Grad der Genauigkeit der annähernden analytischen Lösung ist gezogen.

Études théoriques et expérimentales d'une unité de broyage avec un séparateur à action combinée

Résumé: Est élaboré un complexe technologique pour le broyage fin des matériaux présentant des caractéristiques physiques et mécaniques différentes. Est proposé un modèle mathématique de cycle fermé avec un séparateur d'air à action combiné. Sont obtenues les fonctions intégrales de séparation du séparateur d'air. Est faite une conclusion sur un degré suffisamment élevé de la précision de la solution analytique approximative.

Авторы: *Севостьянов Владимир Семенович* – доктор технических наук, профессор кафедры технологических комплексов, машин и механизмов; *Уральский Владимир Иванович* – кандидат технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия; *Бойчук Игорь Петрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова», г. Новороссийск, Краснодарский край, Россия; *Ермилов Родион Андреевич* – аспирант кафедры технологических комплексов, машин и механизмов, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.

Рецензент: *Уваров Валерий Анатольевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.