ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin,2022;(12-2):5–16
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.926.88 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_5

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ СТРУЙНОЙ ПРОТИВОТОЧНОЙ МЕЛЬНИЦЫ ДЛЯ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С. И. Анциферов[1], С. Б. Булгаков[1], А. В. Карачевцева[1], М. В. Тимашев[1]

[1] Белгородский Государственный Технологический Университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия

Аннотация: Рассмотрена принципиальная схема струйной противоточной мельницы, используемой на предприятиях горной промышленности и работающей по замкнутому циклу измельчения для обогащения полезных ископаемых, и пути повышения экономической эффективности процесса измельчения. Для разработки математической модели аэродинамического процесса, протекающего в разгонной трубке, был использован цифровой двойник блока помола усовершенствованной конструкции струйной противоточной мельницы, разработанный в CAD/CAM/CAE-системе NX. Усовершенствованная конструкция струйной противоточной мельницы направлена на повышение удельной поверхности и снижение удельных энергозатрат за счет создания повышенной концентрации материала в ограниченном объеме. При движении энергоносителя с частицами рудного материала происходит сужение основного потока и материал приобретает дополнительное ускорение, а также исключается расширение двухфазного потока в виде факела. На основе сформулированных академиком Л. И. Седовым законов сохранения энергии были выведены формулы, позволяющие рассчитать траекторию движения частицы в камере помола струйной противоточной мельницы и определить характеристики аэродинамического процесса, такие как скорость частицы и энергоносителя, давление и плотность. Полученные выражения позволяют подобрать рациональные режимы работы струйной мельницы, используемой для измельчения и обогащения полезных ископаемых.

Ключевые слова: струйная мельница, CAD/CAM/CAE-система NX, горная промышленность, расчет мельниц, математическая модель, цифровой двойник, аэродинамические процессы, кольцевым подводом энергоносителя.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Для цитирования: *Анциферов С. И., Булгаков С. Б., Карачевцева А. В., Тимашев М. В.* Усовершенствованная конструкция струйной противоточной мельницы для горнорудной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12–2. — С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_5.

Advanced design of the countercurrent jet mill for the mining industry

S. I. Anciferov[1], S. B. Bulgakov[1], A. V. Karachevceva[1], M. V. Timashev[1]

[1] Belgorod State Technological University named after. V. G. Shukhova, Belgorod, Russia

Abstract: This article discusses a schematic diagram of a jet countercurrent mill used in the mining industry and operating in a closed grinding cycle for mineral processing, and ways to

© С. И. Анциферов, С. Б. Булгаков, А. В. Карачевцева, М. В. Тимашев. 2022

increase the economic efficiency of the grinding process. To develop a mathematical model of the aerodynamic process occurring in an accelerating tube, a digital twin of the grinding block of an improved design of a jet countercurrent mill, developed in the NX CAD/CAM/CAE system, was used. The improved design of the jet countercurrent mill is aimed at increasing the specific surface and reducing the specific energy consumption by creating an increased concentration of the material in a limited volume. When the energy carrier with particles of ore material moves, the main flow narrows and the material acquires additional acceleration, and the expansion of the two-phase flow in the form of a torch is also excluded. Based on the formulas formulated by Academician L. I. Sedov of the laws of conservation of energy, formulas were derived that make it possible to calculate the trajectory of a particle in the grinding chamber of a jet countercurrent mill and determine the characteristics of an aerodynamic process such as particle and energy carrier velocity, pressure and density. The obtained expressions make it possible to choose rational modes of operation of a jet mill used for grinding and beneficiation of minerals.

Key words: Jet mill, NX CAD/CAM/CAE system, mining, mill calculation, mathematical model, digital twin, aerodynamic processes, annular energy supply.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the implementation of the federal university support program «Priority 2030» using equipment based on the Center for High Technologies of V. G. Shukhov BSTU.

For citation: Anciferov S. I., Bulgakov S. B., Karachevceva A. V., Timashev M. V. Advanced design of the countercurrent jet mill for the mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):5–16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_5.

1. Введение

В горной промышленности большое внимание уделяется комплексу процессов по обогащению полезных ископаемых, направленных на отделение полезных ископаемых от пустой породы и вредных примесей. Одним из основных процессов, применяемых при обогащении полезных ископаемых, является измельчение, которое направлено на разделение частиц руды на куски, протекающее по сечениям, проходящим через границы раздела двух фаз. Для получения сверхтонких порошков применяются различные типы мельниц: шаровые, вибрационные, бисерные, молотковые, роторные и центробежно-ударные [1].

Интенсивность и эффективность большинства технологических процессов, использующих материал в порошкообразном состоянии, увеличивается с ростом величины удельной поверхности порошка. Струйные мельницы являются основным помольным агрегатом для получения сверхтонких порошков [2]. Для сверхтонкого измельчения и обогащения полезных ископаемых в горной промышленности большое внимание уделяется мельницам ударного действия и струйным мельницам [3,4]. Основные требования, которые предъявляют к данным типам мельниц — малая металлоемкость, большая удельная производительность и относительно низкие удельные затраты [5,6].

Одним из преимуществ использования струйных мельниц в горнорудной промышленности является объединение стадии измельчения и классификации частиц рудного материала, контроль крупности выходящего продукта и возможность получения сухих смесей [7–10]. Также в мельницах отсутствуют мелющие тела, что позволяет получать тонкодисперсный материал с низким или даже нулевым содержанием

продуктов износа [11]. Известно, что струйные мельницы позволяют получить высокую чистоту химического состава готового продукта.

Измельчение материала в струйной мельнице для рудных пород представляет собой непрерывный процесс с кратной циркуляцией основного материала при постоянном добавлении исходного материала из бункера [12,13]. Измельчение частиц рудных материалов осуществляется преимущественно за счет их соударении друг с другом и частично в результате истирания [14]. Энергия, необходимая для измельчения, сообщается частицам материала при помощи сжатого воздуха, перегретого пара или газа — энергоносителя.

Известные конструкции струйных мельниц обладают и недостатками, к которым относятся высокая стоимость измельчения, удельные энергозатраты, износ камер помола и футеровки.

В настоящее время ведутся исследования путей и возможностей создания новых методов измельчения и соответствующих конструкций мельниц. Исходя из этого, способы повышения экономической эффективности процессов измельчения следующие:

- подбор рациональных конструктивных и технологических параметров струйных мельниц;
- снижение удельных энергозатрат и их стоимости;
- автоматизация установления и поддержания оптимальных режимов эксплуатации измельчителей.

Цель: исследование процессов и аэродинамических характеристик усовершенствованной конструкции струйной противоточной мельницы на основе цифрового двойника.

2. Материал и методы исследования

Известна принципиальная схема струйной противоточной мельницы (рис. 1), работающей по замкнутому циклу измельчения для обогащения полезных ископаемых горной промышленности. Струйная мельница состоит из приемного бункера *7*, соединенного с питателем *6*, через который материал поступает в течку *4*, связанную с эжекторной камерой *2*. Эжекторная камера снабжена соплом *3* и соединена с помоль-

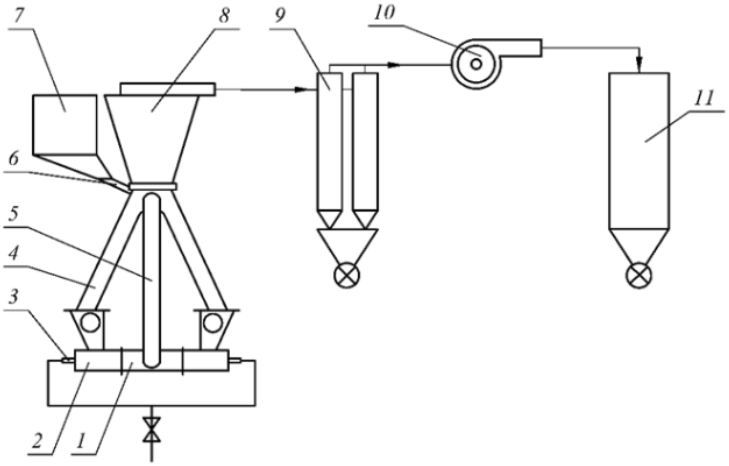

Рис. 1. Принципиальная схема противоточной струйной мельницы
Fig. 1. Schematic diagram of a countercurrent jet mill

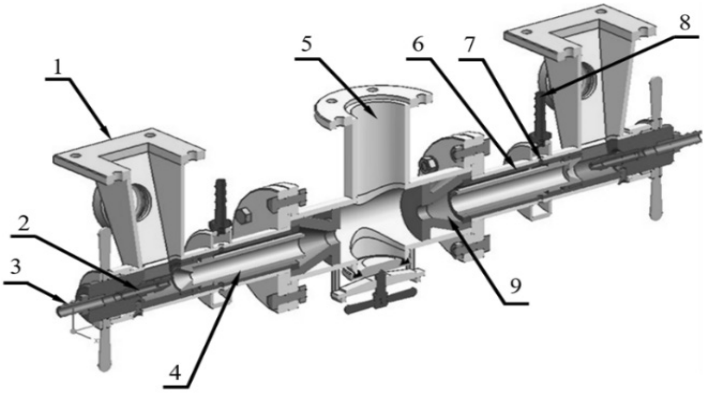

Рис. 2. Цифровой двойник помольного блока, снабженного системой ДКПЭ
Fig. 2. Digital twin of the grinding unit equipped with the ARSEC system

ной камерой *1*, образуя блок помола, в котором происходит измельчение материала. Измельченный материал по стояку *5* поступает в сепаратор *8*, необходимый для классификации материала.

Вентилятор *10* создает разряжение в циклонах *9*, в которые поступает классифицированный материал. Загрязненный воздух поступает на очистку и в фильтр *11*.

С целью исследования процессов и аэродинамических характеристик был использован цифровой двойник блока помола усовершенствованной конструкции струйной противоточной мельницы, используемой для измельчения и обогащения рудного материала в горной промышленности, которая в свою очередь оснащена дополнительным кольцевым подводом энергоносителя (далее ДКПЭ). Цифровой двойник — это виртуальный прототип реального физического изделия. Цифровой двойник мельницы был разработан в CAD/CAM/CAE-системе NX.

Цифровой двойник помольного блока струйной противоточной мельницы (рис. 2) состоит из двух бункеров *1*, входящих в камеру перед соплами *2* эжекторов, выполняющих подачу основного энергоносителя, поступающего в мельницу через штуцер *3*. Энергоноситель через сопла эжекторов направляется в разгонные трубки *4*, выходной конец которых направлен в камеру помола *5*.

Подпорные трубки *6* установлены соосно с разгонными трубками. Отверстия *7*, которые выполнены в подпорной трубке, предназначены для подачи дополнительного энергоносителя через сопло *8*. Перед входом в помольную камеру установлены конфузоры *9*, жестко закрепленные в камере помола.

Цифровой двойник позволяет организовать обобщенную производственную систему на базе производственных систем отдельных ремонтных организаций, а также обеспечить получение информации о состоянии производственной системы в любой момент времени с учетом различных событий, происходящих в ней [15, 16].

Цифровая форма изделия [17, 18] позволяет разрабатывать и создавать продукты в электронном виде, что является необходимым условием для использования на практике технологий моделирования и виртуализации бизнес-процессов компании.

Ввиду того, что процесс тонкого измельчения является одним из самых

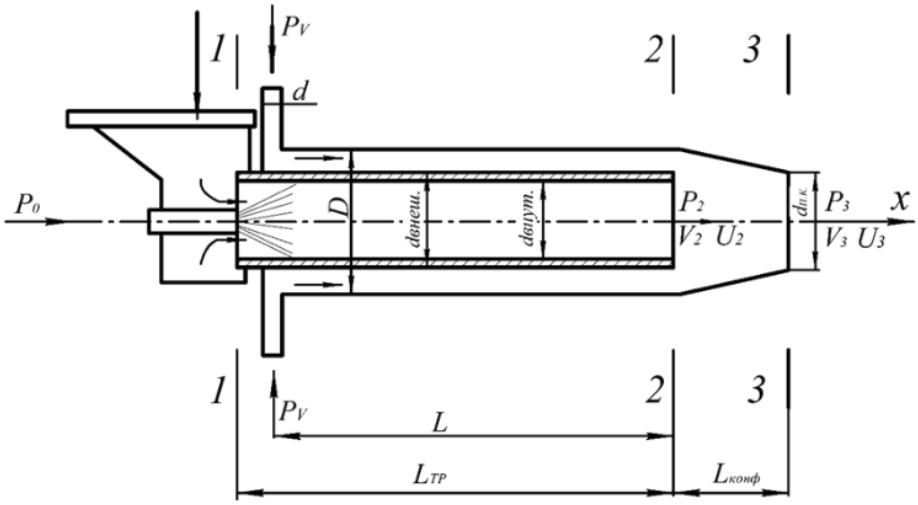

Рис. 3. Схема разгонного узла струйной противоточной мельницы: P_0 — наружное давление, Па; P_V — давление на входе, Па; P_2 — давление на выходе из разгонной трубки, Па; P_3 — давление на выходе из конфузора, Па; U_2, U_3 — скорость частицы в потоке энергоносителя, м/с; V_2, V_3 — скорость воздуха, м/с; *D* — внутренний диаметр подпорной трубки, м; *d*внеш — внешний диаметр разгонной трубки, м; *d*внут — внутренний диаметр разгонной трубки, м; *d* – диаметр входного сопла, м; *d*ПК – диаметр правого конфузора, м, *L* — расстояние от центра входного сопла до края разгонной трубки, м; *LТР* — длина разгонной трубки, м; $L_{конф}$ — длина конфузора, м; *x* – ось

Fig. 3. Scheme of the accelerating unit of a jet countercurrent mill: P_0 — external pressure, Pa; P_V — inlet pressure, Pa; P_2 — pressure at the outlet of the accelerating tube, Pa; P_3 — pressure at the outlet of the confuser, Pa; U_2, U_3 — particle velocity in the energy carrier flow, m/s; V_2, V_3 — air speed, m/s; *D* — internal diameter of the retaining pipe, m; dout — outer diameter of the accelerating tube, m; din — internal diameter of the accelerating tube, m; *d* — diameter of the inlet nozzle, m; *dRC* — diameter of the right confuser, m; *L* — distance from the center of the inlet nozzle to the edge of the accelerating tube, m; *LTU* — length of the accelerating tube, m; Lconf — confuser length m, *x* — axis

энергоемких в производстве цемента, ведутся разработки, направленные на повышение эффективности струйных мельниц [19, 20].

3. Результаты исследований

Разработка математической модели разгонного узла струйной мельницы для обогащения полезных ископаемых горнорудной промышленности основана на теоретической гипотезе об отсутствии смешения потоков, то есть конфузор оказывает воздействие лишь на энергоноситель, подаваемый дополнительно. На рис. 3 показана разработанная схема системы разгона частиц.

С целью описания аэродинамических процессов, протекающих в зоне эжектора, находящейся между сечениями 1–1 и 2–2, и в устройстве ДКПЭ, принято предположение, что эти процессы являются независимыми друг от друга. То есть их можно рассматривать отдельно.

Также стоит учесть, что в зоне между сечениями 2–2 и 3–3 происходит обмен энергий основного потока энергоносителя с частицами рудного материала с энергией дополнительного потока энергоносителя.

С учетом преобразований изменение кинетической энергии при отсутствии тепло-массообмена для горной промышленности имеет вид

$$G\left(\frac{\vartheta_4^2}{2}-\frac{\vartheta_3^2}{2}\right)=G\left[\frac{P_3}{\rho_3}-\frac{P_4}{\rho_4}-\int_{x_3}^{x^4}\lambda\cdot\frac{\vartheta^2}{2}\cdot\frac{dx}{D}\right]- \quad (1)$$

$$-G\int_{x_3}^{x_4} n\cdot\psi\frac{F_m}{2}\cdot\left|\vec{\vartheta}-\vec{U}\right|(\vec{\vartheta}-\vec{U})dx$$

где ϑ_3, ϑ_4 — скорости в соответствующих сечениях, м/с; P_3, P_4 — статическое давление в соответствующих сечениях, Па; ρ_3, ρ_4 — плотность потока в соответствующих сечениях, кг/м^3; λ — коэффициент гидравлического трения; ϑ – скорость воздуха, м/с; D — внутренний диаметр разгонной трубки, м; G — массовый расход рудного материала, кг/с; n — количество частиц рудного материала в единице объема, 1/м^3; ψ — коэффициент, учитывающий лобовое сопротивление движущейся частицы рудного материала; U — скорость частицы в потоке энергоносителя, м/с; x– координата вдоль оси; x_3, x_4 — координаты по оси x в местах соответствующих сечений. F_m — площадь наибольшего поперечного сечения тела, м^2, определяемая по формуле

$$F_m=\frac{\pi d_э^2}{4}, \quad (2)$$

где $d_э$ – эквивалентный диаметр, м; π – математическая постоянная, равная 3,14 м.

Согласно уравнению динамики одинарной частицы, изменение скорости частицы материала по длине разгонной трубки в проекции на ось OX (рис. 5) имеет следующий вид:

$$mU\frac{dU}{dx}=R_X, \quad (3)$$

где m – масса частиц, кг; U — скорость частицы в потоке энергоносителя, м/с; R – вектор силы динамического воздействия воздуха на частицу в проекции на ось x, Н; x – ось.

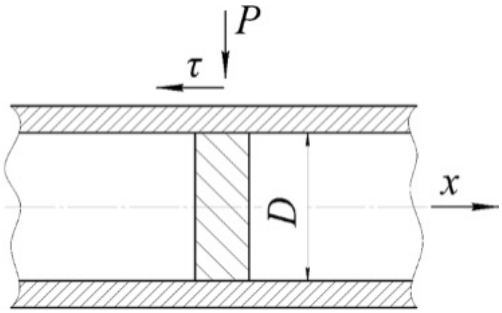

Рис. 5. К определению изменения давления в разгонной трубке: P — внешнее давление, Па; *D* — внутренний диаметр разгонной трубки, м, τ – коэффициент гидравлического трения; *x* – ось

Fig. 5. To determine the change in pressure in the accelerating tube: P — external pressure, Pa, *D* – internal diameter of the accelerating tube, m, τ — coefficient of hydraulic friction; *x* — axis

Для определения массы частицы воспользуемся формулой

$$m=\frac{\pi d_э^3}{6}\rho_m, \quad (4)$$

ρ_m – плотность частицы материала, кг/м^3; π – математическая постоянная, равная 3,14 м; $d_э$ – диаметр эжектора, м.

Учитывая, что в разгонном узле трубки объемная концентрация материала связана с расходом, выразим число частиц, находящихся в потоке энергоносителя единичного объема, через массовый расход частиц:

$$n=\frac{G_m}{\rho_m\cdot S_{тр}\cdot U\cdot V_m}, \quad (5)$$

где n – количество частиц рудного материала в единице объема, 1/м^3; G_m — массовый расход материала, кг/с; $S_{тр}$ – поверхность выделенного объема трубки, м^2; V_m – выделенный объем, м^3.

После преобразования выражения (3) получено уравнение, описывающее процесс изменения давления в трубке на участке сечений 1–1 и 2–2:

$$\left(\frac{P_3}{\rho_3}+\frac{\vartheta_3^2}{2}\right)-\left(\frac{P_4}{\rho_4}+\frac{\vartheta_4^2}{2}\right)=\int_{x_3}^{x_4}\lambda\cdot\frac{\vartheta^2}{2}\cdot\frac{dx}{D}+\int_{x_3}^{x_4}n\cdot\psi\cdot\frac{F_m}{2}\cdot\left|\vec{\vartheta}-\vec{U}\right|\left(\vec{\vartheta}-\vec{U}\right)dx\,. \qquad (6)$$

Образуем систему уравнений, позволяющую описать адиабатный процесс движения энергоносителя с частицами материала в разгонной трубке:

$$\begin{cases}\left(\frac{P_3}{\rho_3}+\frac{\vartheta_3^2}{2}\right)-\left(\frac{P_4}{\rho_4}+\frac{\vartheta_4^2}{2}\right)=\int_{x_3}^{x_4}\lambda\cdot\frac{\vartheta^2}{2}\cdot\frac{dx}{D}+\int_{x_3}^{x_4}n\cdot\psi\cdot\frac{F_m}{2}\cdot\left|\vec{\vartheta}-\vec{U}\right|\left(\vec{\vartheta}-\vec{U}\right)dx\,;\\ mU\frac{dU}{dx}=R_X\,;\\ \left(\frac{P_3}{\rho_3}\right)^k=\left(\frac{P_4}{\rho_4}\right)^k;\\ G=\rho\vartheta S_{mp}=const\quad или\quad d(\rho\vartheta S_{mp})=0\end{cases} \qquad (7)$$

где k — показатель адиабаты; G — расход материала, кг/с; ρ — плотность потока, кг/м^3.

Запишем процесс изменения характеристик энергоносителя (скорость частиц и энергоносителя, давление и плотность) в виде дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases}mU\frac{dU}{dx}=\psi F_m\frac{(\vartheta-U)|\vartheta-U|}{2}\rho,\\ -\left(dP+\rho d\frac{\vartheta^2}{2}\right)=\lambda\frac{dx}{D}\cdot\frac{\rho\upsilon^2}{2}+n\psi\frac{F_m}{2}(\vartheta-U)|\vartheta-U|\rho dx.\end{cases} \qquad (8)$$

где P — давление, Па; d — внутренний диаметр, м.

Путем преобразований, задав давление и плотность как функцию от скорости, (8) можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases}\frac{d\vartheta}{dx}=-\frac{1}{B\vartheta^{-k-1}+\rho_0\vartheta_0}\left[\lambda\frac{1}{D}\cdot\frac{\rho\vartheta^2}{2}+n\psi\frac{F_m}{2}(\vartheta-U)|\vartheta-U|\rho\right],\\ \frac{dU}{dx}=\frac{6}{\pi d_э^3\rho_m U}\psi F_m\frac{(\vartheta-U)|\vartheta-U|}{2}\rho,\end{cases} \qquad (9)$$

где ϑ_0 — скорость воздуха наружная, м/с; ρ_0 — плотность газа, кг/м^3; $d_э$ – диаметр эжектора, м.

$$B=-P_0\vartheta_0^k k\,, \qquad (10)$$

где B — функция, зависящая от параметров потока; P_0 — наружное давление, Па; ϑ_0 — скорость воздуха наружная, м/с.

$$\vartheta_0\rho_0=\frac{G}{S_{mp}}\,, \qquad (11)$$

где S_{mp} –поверхность выделенного объема трубки, м^2;

$$\rho=\rho_0\frac{\vartheta_0}{\vartheta}\,. \qquad (12)$$

Допустим, что истечение энергоносителя осуществляется из отверстия, не влияющего на форму струи, путем преобразований системы уравнений (9), тогда скорость воздуха можно определить из выражения

$$\vartheta_0 = \phi\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_0}}, \qquad (13)$$

где ϕ — коэффициент, учитывающий потери энергии и равный для горной промышленности ϕ=0,668; P_1 — расчетное давление в сопле, Па; P_2 — расчетное наружное давление, Па.

Получена система уравнений, которая, в отличие от известных формул, позволяет определить основные характеристики аэродинамического процесса, протекающего в зоне разгонной трубки, применительно к конструкции струйной противоточной мельницы, оснащенной устройством дополнительного кольцевого подвода энергоносителя. Полученные выражения позволяют определить скорость энергоносителя и частицы материала горной породы, а также статическое давление по длине разгонного узла.

Выводы

В ходе работы рассмотрена принципиальная схема устройства струйной противоточной мельницы, используемой при обогащении полезных ископаемых на предприятиях горной промышленности. Подробно описана конструкция цифрового двойника помольного блока с устройством дополнительного кольцевого подвода энергоносителя, позволяющим повысить площадь удельной поверхности и снизить удельные энергозатраты за счет создания повышенной концентрации материала в ограниченном объеме. На основе цифрового двойника помольной камеры струйной противоточной мельницы с устройством ДКПЭ и законов сохранения энергии, сформулированных для механики сплошных сред академиком Л. И. Седовым, была разработана математическая модель аэродинамического процесса. Математическая модель была получена для аэродинамического процесса, протекающего в зоне эжектора, которая находится между сечениями 1–1 и 2–2, и устройстве ДКПЭ при движении смеси, состоящей из энергоносителя и частиц рудного материала. Выведены выражения, которые, в отличие от известных формул, позволяют определить поведение частицы рудного материала, рассчитать траекторию движения частицы в камере помола усовершенствованной конструкции струйной противоточной мельницы и определить основные характеристики аэродинамического процесса, в частности скорость частицы рудного материала и энергоносителя, статическое давление по длине разгонного узла. Полученные выражения учитывают обмен энергий основного потока энергоносителя с частицами рудного материала с энергией дополнительного потока энергоносителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Benedikt K.*, *Christian S.*, *Stefan R.*, *Alfred P.* Weber Karl-*Ernst W.* Classifier performance during dynamic fine grinding in fluidized bed opposed jet mills // Advanced Powder Technology. 2019, vol. 30, iss. 8, pp. 1678–1686. DOI: 10.1016/j.apt.2019.05.018.

2. *Дмитриенко В. Г.*, *Шеметов Е. Г.*, *Шеметова О. М.* Исследование поведения частиц в камере помола торообразной формы струйной мельницы // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2021. — № 8. — С. 232–238. DOI: 10.24412/2071_6168_2021_8_232_238.

3. *Hong Woon Lee, Sinae Song, Hee Taik Kim*. Improvement of pulverization efficiency for micro-sized particles grinding by uncooled high-temperature air jet mill using a computational simulation // Chemical Engineering Science. 2019, vol. 207 (3), pp. 1140–1147. DOI: 10.1016/j.ces.2019.07.025.

4. *Köninger B., Hensler, T., Romeis, S., Peukert, W., Wirth, K.-E*. Dynamics of fine grinding in a fluidized bed opposed jet mill // Powder Technology. 2018, vol. 327, pp. 346–357. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.12.084.

5. *Strobel A.*, *Köninger B.*, *Romeis S.*, *Schott F.*, *Wirth K.*-E., *Peukert W.* Assessing stress conditions and impact velocities in fluidized bed opposed jet mills // Particuology. 2020, vol. 53, pp. 12–22. DOI: 10.1016/j.partic.2020.02.006.

6. *Rodnianski V.*, *Levy A.*, *Kalman H*. A new method for simulation of comminution process in jet mills // Powder Technology. 2019, vol. 343, iss. 2, pp. 867–879. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.021.

7. *Scott L.*, *Borissova A.*, *Burns A.*, *Ghadiri M.* Effect of grinding nozzles pressure on particle and fluid flow patterns in a spiral jet mill // Powder Technology. 2021, vol 30, pp. 439–447. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.07.090.

8. *Protonotariou S.*, *Ritzoulis C.*, *Mandala I*. Jet milling conditions impact on wheat flour particle size // Journal of Food Engineering. April 2021, vol. 294,110418, pp.1–7. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110418.

9. *Bnà S.*, *Ponzini R.*, *Cestari M.*, *Cavazzoni C.*, *Cottini C.*, *Benassi A.* Investigation of particle dynamics and classification mechanism in a spiral jet mill through computational fluid dynamics and discrete element methods // Powder Technology. 2020, vol. 364, pp. 746–773. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.02.029.

10. *Strobel A.*, *Köninger B.*, *Romeis S.*, *Schott F.*, *Wirth K.*-E., *Peukert W.* Assessing stress conditions and impact velocities in fluidized bed opposed jet mills // Particuology. 2020, vol. 53, pp. 12–22. DOI: 10.1016/j.partic.2020.02.006.

11. *Постникова И. В.*, *Блиничев В. Н.* Струйные мельницы // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. — 2015. — № 2 (42). — С. 144–151.

12. *Batista J. N.* M., *Santos D. A.*, *Béttega R.* Determination of the physical and interaction properties of sorghum grains: Application to computational fluid dynamics–discrete element method simulation of the fluid dynamics of a conical spouted bed // Particuology. 2021, vol. 54, pp. 91–101. DOI: 10.1016/j.partic.2020.04.005.

13. *Бараковских Д. С.*, *Шишкин С. Ф.* Движение двухфазного потока в разгонной трубке струйной мельницы // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2017. — № 5. — С. 82–88. DOI: 10.12737/article_590878fb0c7798.56722718.

14. *Блиничев В. Н.*, *Постникова И. В.*, *Воробьев С. В.*, *Колобов М. Ю.*, *Зуева Г. А.* Интенсификация процесса разрушения поликомпонентных материалов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. — 2022. — № 1. — С. 109–115. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6357.

15. *Бутко А. О.*, *Кузнецов П. М.*, *Хорошко Л. Л.* Организация цифрового двойника процессов восстановления дробильно-измельчительного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 8. — С. 130–144. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0–130–144.

16. *Zakoldaev D. A.*, *Korobeynikov A. G.*, *Shukalov A. V.*, *Zharinov I. O.* Digital forms of describing Industry 4.0 objects // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019, vol. 656 (1), pp. 1–6. DOI:10.1088/1757–899X/656/1/012057.

17. *Zakoldaev D. A.*, *Shukalov A. V.*, *Zharinov I. O.*, *Zharinov O. O.* Designing technologies for the interaction of cyber-physical systems in smart factories of the Industry 4.0 // Journal of Physics Conference Series. 2020, vol. 1515 (2), pp. 1–6. DOI:10.1088/1742–6596/1515/2/022008.

18. *Zakoldaev D. A.*, *Shukalov A. V.*, *Zharinov I. O.*, *Zharinov O. O.* Realization of project procedures in the item designing companies of the Industry 3.0 and Industry 4.0 // Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1333 (7), pp. 1–6. DOI:10.1088/1742–6596/1333/7/072030.

19. *Romanovich A.*, Enayatullahian Amini, *Apukhtina I.*, *Pahomov E.* The grinding clinker pressure process study // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019, vol. 698 (6), pp. 1–5. DOI:10.1088/1757–899X/698/6/066038.

20. *Винокуров В. Р.* Применение мельницы сухого многократного ударного действия при измельчении золотосодержащих руд месторождения «Малый Тарын» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 12-1. — С. 48–58. DOI:10.25018/0236_1493_2021_121_0_48. ГИАБ

REFERENCES

1. Benedikt K., Christian S., Stefan R., Alfred P. Weber, Karl-Ernst W. Classifier performance during dynamic fine grinding in fluidized bed opposed jet mills. *Advanced Powder Technology*. 2019, vol. 30, iss. 8, pp. 1678–1686. DOI: 10.1016/j.apt.2019.05.018.

2. Dmitrienko V. G., Shemetov E. G., Shemetova O. M. Investigation of the behavior of particles in the ignition of the grinding of a toroidal shape of jet furniture. *News of TulGU. Technical science*. 2021, no. 8, pp. 232–238. [In Russ]. DOI: 10.24412/2071_6168_2021_8_232_238.

3. Hong Woon Lee, Sinae Song, Hee Taik Kim. Improvement of pulverization efficiency for micro-sized particles grinding by uncooled high-temperature air jet mill using a computational simulation. *Chemical Engineering Science*. 2019, vol. 207 (3), pp. 1140–1147. DOI: 10.1016/j.ces.2019.07.025.

4. Köninger B., Hensler, T., Romeis, S., Peukert, W., Wirth, K.-E. Dynamics of fine grinding in a fluidized bed opposed jet mill. *Powder Technology*. 2018, vol. 327, pp. 346–357. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.12.084.

5. Strobel A., Köninger B., Romeis S., Schott F., Wirth K.-E., Peukert W. Assessing stress conditions and impact velocities in fluidized bed opposed jet mills. *Particuology*. 2020, vol. 53, pp. 12–22. DOI: 10.1016/j.partic.2020.02.006.

6. Rodnianski V., Levy A., Kalman H. A new method for simulation of comminution process in jet mills. *Powder Technology*. 2019, vol. 343, iss. 2, pp. 867–879. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.021.

7. Scott L., Borissova A., Burns A., Ghadiri M. Effect of grinding nozzles pressure on particle and fluid flow patterns in a spiral jet mill. *Powder Technology*. 2021, vol 30, pp. 439–447. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.07.090.

8. Protonotariou S., Ritzoulis C., Mandala I. Jet milling conditions impact on wheat flour particle size. *Journal of Food Engineering*. 2021, vol. 294,110418, pp.1–7. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110418.

9. Bnà S., Ponzini R., Cestari M., Cavazzoni C., Cottini C., Benassi A. Investigation of particle dynamics and classification mechanism in a spiral jet mill through computational fluid dynamics and discrete element methods. *Powder Technology*. 2020, vol. 364, pp. 746–773. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.02.029.

10. Strobel A., Köninger B., Romeis S., Schott F., Wirth K.-E., Peukert W. Assessing stress conditions and impact velocities in fluidized bed opposed jet mills. *Particuology*. 2020, vol. 53. pp. 12–22. DOI: 10.1016/j.partic.2020.02.006.

11. Postnikova I. V., Blinichev V. N., Kravchik Ya. Jet mills. Modern high technology. *Regional application*. 2015, no. 2 (42), pp. 144–151. [In Russ].

12. Batista J. N. M., Santos D. A., Béttega R. Determination of the physical and interaction properties of sorghum grains: Application to computational fluid dynamics–discrete element

method simulation of the fluid dynamics of a conical spouted bed. *Particuology*. 2021, vol. 54, pp. 91–101. DOI: 10.1016/j.partic.2020.04.005.

13. Barakovskikh D. S., Shishkin S. F. Movement of a two-phase flow in the accelerating tube of a jet mill. *Vestnik BSTU im. V. G. Shukhov*. 2017, no. 5, pp. 82–88. [In Russ]. DOI: 10.12737/article_590878fb0c7798.56722718.

14. Blinichev V. N., Postnikova I. V., Vorobyov S. V., Kolobov M. Yu., Zueva G. A. Intensification of the process of destruction of polycomponent materials. *Izv. Universities. Chemistry and chemical technology*. 2022, no. 1, pp. 109–115. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6357.

15. Butko A. O., Kuznetsov P. M., Khoroshko L. L. Organization of a digital twin of the processes of restoration of crushing and grinding equipment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 8, pp. 130–144. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0–130–144.

16. Zakoldaev D. A., Korobeynikov A. G., Shukalov A. V., Zharinov I. O. Digital forms of describing Industry 4.0 objects. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 656 (1), pp. 1–6. DOI:10.1088/1757–899X/656/1/012057.

17. Zakoldaev D. A., Shukalov A. V., Zharinov I. O., Zharinov O. O. Designing technologies for the interaction of cyber-physical systems in smart factories of the Industry 4.0. *Journal of Physics Conference Series*. 2020, vol. 1515 (2), pp. 1–6. DOI:10.1088/1742–6596/1515/2/022008.

18. Zakoldaev D. A., Shukalov A. V., Zharinov I. O., Zharinov O. O. Realization of project procedures in the item designing companies of the Industry 3.0 and Industry 4.0. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1333 (7), pp. 1–6. DOI:10.1088/1742–6596/1333/7/072030.

19. Romanovich A., Enayatullahian Amini, Apukhtina I., Pahomov E. The grinding clinker pressure process study. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 698 (6), pp. 1–5. DOI:10.1088/1757–899X/698/6/066038.

20. Vinokurov V. R. Dry impact milling of Maly Taryn gold ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12–1):48 — 58. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_48.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анциферов Сергей Игоревич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Механическое оборудование», http://orcid.org/0000-0002-4210-3185, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова),308012, Белгород, улица Костюкова, д. 46, Россия, e-mail: anciferov.sergey@gmail.com;

Булгаков Сергей Борисович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Механическое оборудование», директор института организации и управления набором», http://orcid.org/0000-0002-8656-8443, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова) 308012, Белгород, улица Костюкова, д. 46, Россия, e-mail: bulgakov_s_b@mail.ru;

Карачевцева Анастасия Владимировна — аспирант кафедры «Механическое оборудование», http://orcid.org/0000-0002-8656-8443, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова) 308012, Белгород, улица Костюкова, д. 46, Россия, e-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com;

Тимашев Максим Викторович — аспирант кафедры «Механическое оборудование», начальник учебной части, заместитель начальника военного учебного центра при БГТУ им. В. Г. Шухова, http://orcid.org/0000-0002-3486-0733, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова) 308012, Белгород, улица Костюкова, д. 46, Россия, e-mail: tmv1975@mail.ru;

Для контактов: *Анциферов Сергей Игоревич*, e-mail: anciferov.sergey@gmail.com.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anciferov S. I., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mechanical Equipment Department, http://orcid.org/0000-0002-4210-3185, Belgorod State Technological University named after V. I. V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov),308012, Belgorod, Kostyukova street,46, Russia, e-mail: anciferov.sergey@gmail.com;
Bulgakov S. B., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Equipment, Director of the Institute for the Organization and Management of Recruitment, http://orcid.org/0000-0002-8656-8443, Belgorod State Technological University. V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov) 308012, Belgorod, Kostyukova street,46, Russia, e-mail: bulgakov_s_b@mail.ru;
Karachevceva A. V., postgraduate student of the Mechanical Equipment Department, http://orcid.org/0000-0002-8656-8443, Belgorod State Technological University named after V. I. V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov) 308012, Belgorod, Kostyukova street,46, Russia, e-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com;
Timashev Maksim Viktorovich, postgraduate student of the department "Mechanical equipment", head of the educational unit, deputy head of the military training center at BSTU named after A. I. V. G. Shukhov, http://orcid.org/0000-0002-3486-0733, Belgorod State Technological University. V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov) 308012, Belgorod, Kostyukova street,46, Russia, e-mail: tmv1975@mail.ru.
For contacts: *Anciferov Sergej Igorevich*, e-mail: anciferov.sergey@gmail.com
No conflict of interest.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.