

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ СУШКИ РУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Макаров В.Н.¹, Ахметов Р.Г.², Макаров Н.В.¹, Бельских А.М.¹
¹Уральский государственный горный университет, Екатеринбург;
²Костанайские минералы, Житикара, Республика Казахстан

Ключевые слова: аэрация, сепарация, экологическая эффективность, аэрозоль, входной коллектор, сила Стокса, Архимеда, медианный диаметр.

Аннотация. На базе гипотезы о доминантном влиянии на экологическую эффективность сушильных печей концентрации, медианного размера, дисперсии, температуры и влажности частиц пыли на выходе из сушила, предложено устройство термоаэрационной сепарации пыли. Анализ математического моделирования аэротермодинамических процессов в двухфазной среде «асбестовая пыль–газовый поток» подтвердил выводы промышленных экспериментальных исследований о существенном влиянии на температуру и влажность асбестовой пыли в пневмосушиле параметров прямого тока. Вследствие неадекватного соотношения аэродинамических и инерционных сил, действующих на асбестовую пыль в прямомотоке и противотоке, в пневмосушило поступает значительно большее количество влажной асбестовой пыли с низкой температурной из прямого тока по отношению к более сухой, высокотемпературной пыли из противотока. На базе принципа аддитивности классификации построена математическая модель аэроционной сепарации частиц пыли непосредственно в сушиле шахтной печи в зависимости от параметров теплоносителя и предлагаемого устройства. Использование предложенного устройства термоаэроционной сепарации, интегрированное в сушило позволяет в одноступенчатой системе пылегазоочистке и в составе циклона СК–ЦН–22 добиться концентрации пыли в аэрозоле не более 25 мг/м³, снизив эксплуатационные затраты не менее чем на 30 %.

IMPROVING THE ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF VERTICAL SHAFT FURNACES FOR DRYING REFRACTORY AND BUILDING MATERIALS

Makarov V.N.¹, Akhmetov R.G.², Makarov N.V.¹, Belskikh A.M.¹
¹Ural State Mining University, Yekaterinburg;
²Kostanay Minerals, Zhitikara, Republic of Kazakhstan

Keywords: aeration, separation, environmental efficiency, aerosol, inlet collector, Stokes force, Archimedes, median diameter.

Abstract. Based on the hypothesis of the dominant effect on the environmental efficiency of drying kilns concentration, median size, dispersion, temperature and humidity of dust particles at the outlet of the dryer, a device for thermal aeration separation of dust is proposed. The analysis of mathematical modeling of aerothermodynamic processes in the two-phase medium "asbestos dust – gas flow" confirmed the conclusions of industrial experimental studies on the significant effect of the parameters of the direct flow on the temperature and humidity of asbestos dust in the pneumatic dryer. Due to the inadequate ratio of aerodynamic and inertial forces acting on asbestos dust in the forward and countercurrent flow, a significantly larger amount of wet asbestos dust with a low temperature from the forward flow enters the pneumatic dryer in relation to the drier, high-temperature dust from the countercurrent. On the basis of the classification additivity principle, a mathematical model of air separation of dust particles directly in the dryer of a shaft furnace was constructed depending on the parameters of the coolant and the proposed device. The use of the proposed device for thermal and air separation integrated into the dryer makes it possible to achieve a dust concentration in the aerosol of no more than 25 mg/m³ in a single-stage dust and gas cleaning system and as part of the TsN–22 cyclone, reducing operating costs by at least 30%.

Введение. Снижение концентрации пыли на выходе из сушильной печи, оптимизация ее гранулометрического состава и физических параметров, определяемых максимальной эффективностью газоочистного оборудования, повышают эффективность вертикальных шахтных сушильных печей (ВШСП), снижают экологическую нагрузку на себестоимость продукции, повышают конкурентоспособность предприятий горно-металлургического комплекса РФ [1-3]. При этом повышение эффективности улавливания пыли не должно влиять на качество сушки материала.

Предметом исследования данной статьи является сушильная печь типа ВШСП 2х2х18. Объект исследования – совокупность физических процессов, происходящих в локальной замкнутой аэротермодинамической системе сушила, в части пылеобразования в шахтной печи и эффективности её улавливания.

Методы исследований. Базируются на научно-обоснованной гипотезе о доминанте экологической эффективности ВШСП в виде идентифицированной генеральной совокупности параметров аэрозоля: концентрация, медианный размер, дисперсия, температура и влажность пыли на выходе из печи, зависящей от технологического процесса сушки, состояния руды и определяющей качество пылеулавливания.

Парадигма предлагаемого подхода к исследованию экологической эффективности ВШСП заключается в том, что генеральная совокупность параметров очищаемого аэрозоля, соответствующая оптимальной эффективности пылеулавливания, должна достигаться за счет рационального проектирования сушила шахтной печи путем инерционной, центробежной и аэрационной сепарации пыли, ее сушки в псевдокипящем слое в процессе динамического осаждения витанием [4-5].

Результаты исследования. На вынос аспирируемого аэрозоля в процессе пылевыделения из ВШСП и как следствие на эффективность пылеулавливания в ней, концентрацию пылевых частиц на выходе в газодух существенное влияние оказывают влажность и температура пылевых частиц, определяющие их аутогезионное сцепление, высота свободного ускоренного падения исходной руды, схема расположения, конструкция колосников и проточной части сушила, определяющие совместно с термодинамическими параметрами скорость движения потока и интенсивность динамического взаимодействия пылевых частиц с теплоносителем, включая его температуру и влажность, механизм инерционной, центробежной сепарации, динамического витания [6-7].

В статье основной акцент сделан на исследовании влияния на экологическую эффективность ВШСП гранулометрического состава исходной руды и геометрии входного коллектора газоотводящих каналов по результатам экспериментов в цехе ДиСхр АО «Костанайские минералы».

Для оценки влияния пыли, выходящей из печи, на экологическую эффективность пылеулавливающего оборудования, принят коэффициент пылевыделения ВШСП, равный отношению концентрации пыли фракции –500 мкм на выходе из печи к секунднему приходу её через загрузочное устройство с исходной рудой:

$$k_{nb} = \frac{z_{\tau 3} + z_{\tau 1}}{z_{\tau 4}}. \quad (1)$$

На рисунке 1 приведены результаты экспериментальных исследований влияния медианного диаметра, дисперсии взвешенных частиц исходной руды и скорости теплоносителя на коэффициент пылевыделения.

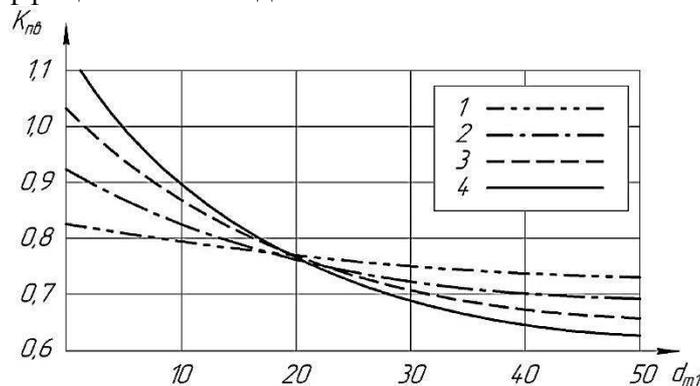
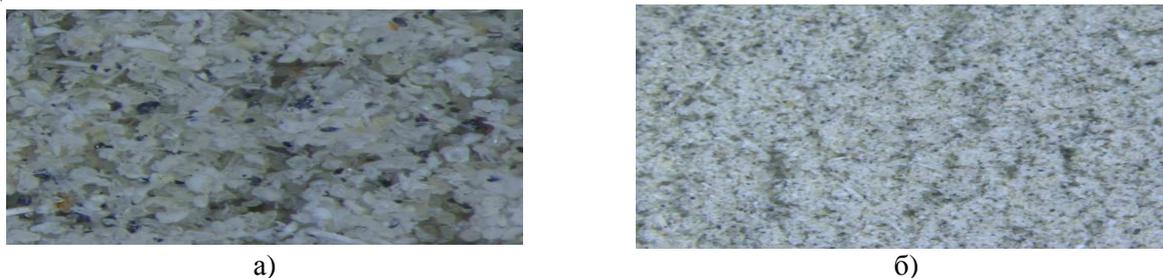


Рис.1. График зависимости коэффициента пылевыделения ВШСП от медианного диаметра взвешенных частиц исходной руды фракции $-5 \cdot 10^{-4}$ при $V_h = 3,5$ м/с:

1 – $\sigma_d = \pm 0,1d_m$; 2 – $\sigma_d = \pm 0,2d_m$; 3 – $\sigma_d = \pm 0,3d_m$; 4 – $\sigma_d = \pm 0,4d_m$

Из анализа приведенных графиков видно, что с уменьшением медианного диаметра взвешенных частиц, указанной фракции происходит заметный рост коэффициента пылевыведения, особенно в диапазоне медианных диаметров менее $2 \cdot 10^{-4}$ м. При этом с ростом дисперсии медианного диаметра, рост коэффициента пылевыведения более существенен. Указанное приводит к росту экологической нагрузки на пылеулавливающее оборудование, и как результат, требует тщательного подхода к определению гранулометрического состава исходной руды [8-9].

Приведенные на рисунке 2 фотографии указывают на то, что при механическом, компрессионном дроблении взвешенных частиц в процессе их движения в сушиле во фракции руды $-5 \cdot 10^{-4}$ м возрастает медианный размер частиц. Обусловлено это тем, что мелкие частицы дробятся менее эффективно в силу меньших значений инерционных сил в процессе их взаимного контакта.



а)

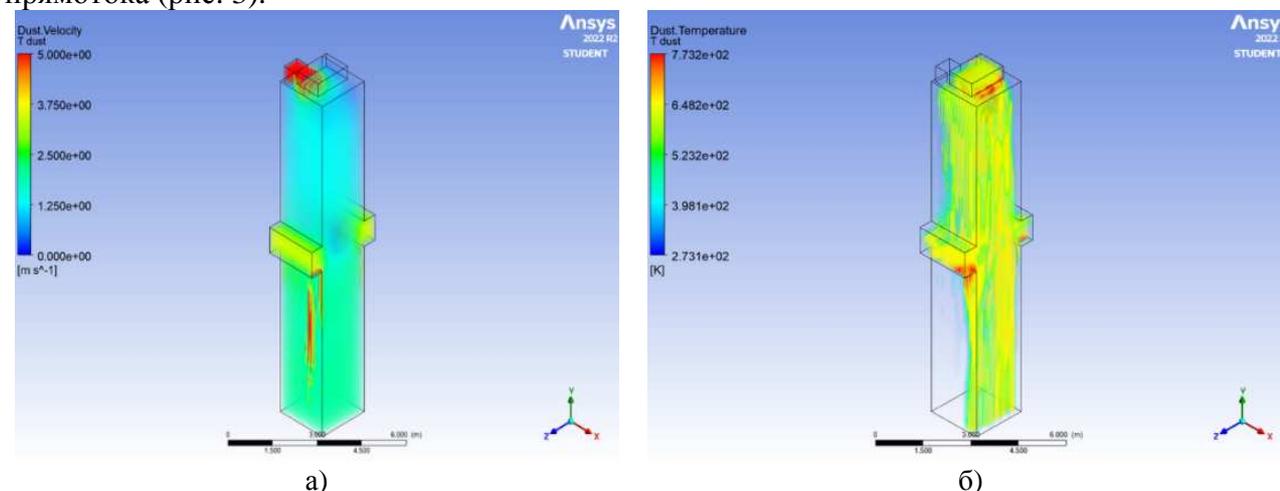
б)

Рис. 2. Фотографии рентгеноспектрального микроанализа асбестовой пыли в 56-кратном увеличении: а) на выходе из ВШСП; б) в исходной руде

Указанное существенно увеличивает нагрузку на пылеулавливающее оборудование системы газоочистки ВШСП и соответственно является исходной информацией для поиска технических решений снижения интенсивности дополнительного пылеобразования.

Таким образом изменяя режимные параметры ВШСП и гранулометрический состав исходной руды, можно добиться снижения коэффициента пылевыведения с 1 до 0,6, то есть на 40% снизить концентрацию пылевых частиц (рис. 1). Однако диапазон изменения вышеуказанных параметров ограничен их существенным влиянием на качество сушки исходной руды, что снижает его практическую целесообразность.

С использованием современных средств инженерного компьютерного анализа было проведено математическое моделирование аэротермодинамических процессов в двухфазной среде «асбестовая пыль–газовый поток» [10-12]. Анализ математического моделирования подтвердил выводы промышленных экспериментальных исследований о существенном влиянии на температуру и влажность асбестовой пыли в пневмосушиле параметров прямотока (рис. 3).



а)

б)

Рис. 3. Распределение параметров асбестовой пыли по вертикальной оси ВШСП на номинальном режиме ее работы: а) температуры; б) скорости

Конструктивно устройство термоаэрационной сепарации, встроенное в сушило шахтной печи, представляет собой конфузорный канал 1 по плоскости симметрии сушила с входным коллектором 2 газоотводящих каналов, выполненным в виде вертикального канала 3, разделяющего область взаимодействия противотока 4 и прямотока 5 на две части: область прямого их контакта и область смешения до полного поворота по направлению противотока 4. Структуре аэрационной сепарации соответствуют 3 стадии процесса снижения концентрации пыли на выходе из сушила (рис. 4).

На первой стадии за счет роста динамического давления происходит частичное гравиметрическое расслоение по скорости падения и инерционная сепарация в процессе движения по криволинейной наружной поверхности 6 конфузорного канала 1. На второй стадии за счет силы Магнуса, градиента поперечной скорости теплоносителя в прямотоке 5 и противотоке 4, центробежной силы происходит движение взвешенных частиц из зоны прямотока 5 в зону противотока 4 в направлении входного коллектора 3 газоотводящих каналов. На третьей стадии в зоне противотока 4 и в вертикальном канале 3 входного коллектора 2 в процессе динамического витания влажные низкотемпературные частицы пыли, оседая в область повышенных температур теплоносителя под действием силы гравитации, отдают влагу за счет конвективного теплообмена с ним, достигают влажности и температуры, соответствующей необходимой парусности и далее за счет динамического витания через входной коллектор 2 поступает в газоотводящие каналы [13, 14].

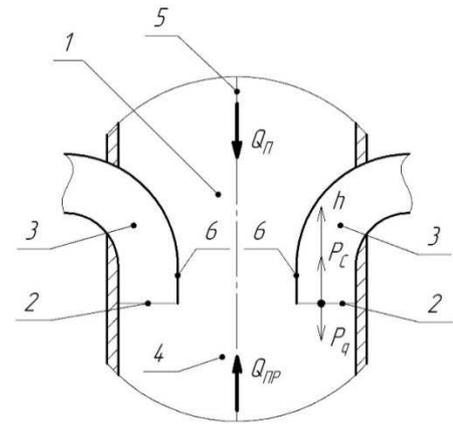


Рис. 4. Схема устройства термоаэрационной сепарации пыли на выходе из ВШСП

Уравнение движения частицы пыли с медианным диаметром d_m запишем в виде:

$$\frac{dV_h}{dt} = \frac{1}{\tau_d} (U_h - V_h) - \frac{P_A}{m_d}, \quad (2)$$

где V_h – скорость частицы пыли по вертикальной оси сушила; $V_h^0 = \frac{Q_n}{S_n - S_{\text{вк}}}$ при $t=0$, м/с;

$U_h = \frac{Q_n + Q_{\text{пр}}}{S_{\text{вк}}}$; $Q_n, Q_{\text{пр}}$ – расход теплоносителя по прямотоку и противотоку соответственно, м³/с, $S_n, S_{\text{вк}}$ – площадь сушила в плане и входного коллектора газоотводящих каналов, м²,

$P_A = P_Q - P_C = \frac{\pi}{G} d_m^3 (\rho_d - \rho_T) g - 3\pi d_m \cdot \mu k_\phi (U_h - g\tau_d) (1 - e^{-\frac{t}{\tau_d}})$, н; $\tau_d = \frac{dm^2 \rho d}{18\mu k_\phi}$ – время релаксации

частицы пыли, с; ρ_d, ρ_T – плотность частицы пыли и теплоносителя соответственно кг/м³; μ – динамическая вязкость теплоносителя, Па·с, k_ϕ – коэффициент формы частицы пыли, m_d – масса частицы пыли диаметром d_m , кг.

После соответствующих преобразований уравнение текущей скорости динамического витания частицы пыли в вертикальном канале входного коллектора получим в виде:

$$V_{dh} = -V_h^0 e^{-\frac{t}{\tau_d}} + (V_h - g\tau_d) (1 - e^{-\frac{t}{\tau_d}}). \quad (3)$$

Подставив в уравнение (3) параметры устройства аэросепарации получим:

$$V_d = \frac{Q_n + Q_{\text{пр}}}{S_{\text{вк}}} - g\tau_d - \left(-\frac{Q_n}{S_n - S_{\text{вк}}} \cdot \frac{Q_n + Q_{\text{вк}}}{S_{\text{вк}}} + g\tau_d \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d}}. \quad (4)$$

Время витания частицы пыли медианного диаметра d_m в вертикальном канале устройства аэросепарации, в процессе которого осуществляется ее дополнительная сушка и последующий выход в газоотводящие каналы, определяется по формуле:

$$\tau_d = \tau_d \ln \cdot \frac{\frac{Q}{S_{\text{вк}}} - g\tau_d}{\frac{Q_n}{S_n - S_{\text{вк}}} + \frac{Q}{S_{\text{вк}}} - g\tau_d}, \quad (5)$$

где $Q = Q_n + Q_{np}$ – общий расход теплоносителя, $\text{м}^3/\text{с}$.

Минимально возможный диаметр пылевых частиц заданной плотности, определяемой температурой, влажностью и временем термоаэроэрозийной сушки, прошедших сепарацию, то есть осевших в процессе витания для дополнительной сушки, определяем из условия равновесия по приведенной силе Архимеда:

$$d_m = 3 \sqrt{2 \frac{\mu k_\phi \cdot Q}{(\rho_d - \rho_r) q}}. \quad (6)$$

Из анализа результатов экспериментальных исследований и математического моделирования, приведенных на рисунке 5, видно, что минимальный диаметр сепарируемых частиц пыли уменьшается с увеличением площади входного коллектора газоотводящих каналов и снижением температуры теплоносителя.

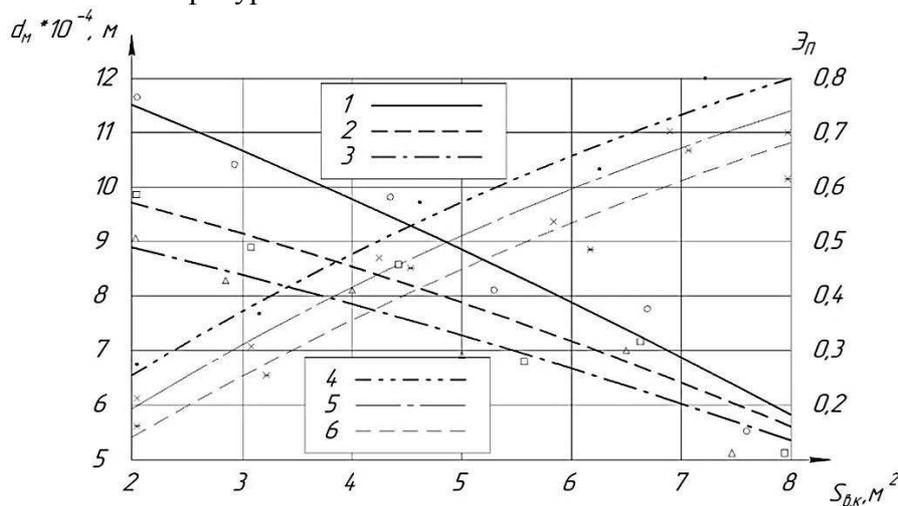


Рис. 5. График зависимости минимального диаметра сепарируемой пыли и экологической эффективности пылеулавливания в зависимости от площади входного коллектора газоотводящих каналов при $Q=12 \text{ м}^3/\text{с}$;

1 и 4 — $t_T = 400^\circ\text{C}$; 2 и 5 — $t_T = 300^\circ\text{C}$; 3 и 6 — $t_T = 200^\circ\text{C}$

Таким образом, интенсификация конвективного теплообмена в процессе аэротермодинамической сепарации повышает экологическую эффективность предлагаемого устройства, поскольку повышение температуры пыли, снижает вероятность конденсации влаги в циклоне и одновременно снижает температуру теплоносителя на выходе, улучшая тем самым его сепарационную эффективность

Выводы. Управление парусностью частиц пыли во входном коллекторе газоотводящих каналов позволяет существенно уменьшать концентрацию ее на выходе из сушила. Наибольшая эффективность аэротермодинамической сепарации достигается в диапазоне скоростей теплоносителя 1-1,5 м/с во входном коллекторе и не менее 5 м/с в прямоотке конфузорного канала сушила. Для пылевых частиц фракции $5 \cdot 10^{-5}$ была достигнута эффективность улавливания не менее 75% и концентрации пыли в аэрозоле на входе из циклона СК-ЦН-22 не более $25 \text{ мг}/\text{м}^3$, снизив эксплуатационные затраты не менее чем на 30%.

Заключение. Рассмотрение ВШСП, как локальной замкнутой системы технологического процесса сушки рудных материалов, позволило установить причину недостаточной ее экологической эффективности, обусловленной существенным влиянием на температуру и влажность асбестовой пыли на выходе из печи аэротермодинамических параметров прямотока. На базе гипотезы о доминанте экологической эффективности ВШСП в виде генеральной совокупности параметров аэрозоля, то есть его концентрации, медианного размера, дисперсии, температуры и влажности частиц пыли, поступающей в пневмосушило, зависящих от параметров технологического процесса сушки и состояния руды и определяющих качество пылеулавливания, предложено устройство термоаэроэрозионной сепарации пыли, интегрированное в сушило печи и позволяющее более чем в 3 раза снизить ее концентрацию за счет оптимизации параметров.

Список литературы

1. Макаров В.Н., Давыдов С.Я. Теоретические основы повышения эффективности вентиляции в технологических процессах на промышленных предприятиях // Новые огнеупоры. – 2015. – №2. – С. 59-63.
2. Makarov V.N., Davydov S.Ya. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises // Refractories and Industrial Ceramics. 2015, vol. 56, no. 1, pp. 103-106.
3. Юрьев Б.П., Гольцев В.А., Мальцев В.А., Савин В.А. Сушка хризотиловой руды в вертикальных аппаратах шахтного типа // Строительные материалы. – 2016. – №8. – С. 80.
4. Wang P. Multi-objective design of a transonic turbocharger compressor with reduced noise and increased efficiency: Ph D. – London: UCL University, 2017. – 213 p.
5. Давыдов С.Я., Семин А.Н. Энергосберегающее оборудование пневматического транспорта: вчера, сегодня, завтра: теория, расчет, исследования, производство – М.: Фонд “Кадровый резерв”, 2016.– 472 с.
6. Белов М.А., Дябин Н.В., Копосов Ю.Б. и др. Практика обогащения асбестовых руд / Под ред. Ф.П. Софронова. – М.: Недра, 1975. – 224 с.
7. Lyaptsev S.A., Davydov S.Ya. Classification of granular material in an impact with a separation surface // Refractories and Industrial Ceramics. 2015, vol. 5, no. 6, pp. 570-572.
8. Киринов В.Ф., Ушаков К.З. Рудничная и промышленная аэрология. Учебник для вузов. – М.: Недра, 1983. – 256 с.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 830 с.
10. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Шамраев М.А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство. – М.: URSS, 2017. – 272 с.
11. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. – СПб.: Химиздат, 2005. – 659 с.
12. Макаров В.Н., Потапов В.Я., Давыдов С.Я., Макаров Н.В. Метод аддитивного аэродинамического расчета узла аэрационной классификации фрикционных аппаратов // Новые огнеупоры. – 2017. – №6. – С. 40-44.
13. Макаров Н.В., Угольников А.В., Макаров В.Н. Оптимизация геометрических параметров гидровихревого инерционного стратификатора Вентури // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240. – С. 638-648. – DOI: 10.31897/pmi.2019.6.638.
14. Torshizi S.A., Benisi A.H., Durali M. Numerical optimization and manufacturing of the impeller of a centrifugal compressor // Scencing Iranica. 2017, no. 24, pp. 707-714.

References

1. Makarov V.N., Davydov S.Ya. Theoretical bases of increasing the efficiency of ventilation in technological processes in industrial enterprises // New Refractories. 2015, no. 2, pp. 59-63.
2. Makarov V.N., Davydov S.Ya. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises // Refractories and Industrial Ceramics. 2015, vol. 56, no. 1, pp. 103-106.
3. Yuryev B.P., Goltsev V.A., Maltsev V.A., Savin V.A. Drying of chrysotile ore in vertical apparatuses of mine type // Building Materials. 2016, no. 8, p. 80.
4. Wang P. Multi-objective design of a transonic turbocharger compressor with reduced noise and increased efficiency: Ph D. – London: UCL University, 2017. – 213 p.
5. Davydov S.Ya., Semin A.N. Energy-saving equipment of pneumatic transport: yesterday, today, tomorrow: theory, calculation, research, production. – М.: Fund "Personnel Reserve", 2016. – 472 p.
6. Belov M.A., Dyabin N.V., Kuposov Yu.B. et al. The practice of enrichment of asbestos ores / Ed. by F.P. Sofronov. – М.: Nedra, 1975. – 224 p.
7. Lyaptsev S.A., Davydov S.Ya. Classification of granular material in an impact with a separation surface // Refractories and Industrial Ceramics. 2015, vol. 5, no. 6, pp. 570-572.
8. Kirin V.F., Ushakov K.Z. Mine and Industrial Aerology. Textbook for universities. – М.: Nedra, 1983. – 256 p.
9. Loitsyansky L.G. Mechanics of Fluid and Gas. – М.: Drofa, 2003. – 830 p.
10. Kaplun A.B., Morozov E.M., Shamrayev M.A. ANSYS in the hands of an engineer: a practical guide. – М.: URSS, 2017. – 272 p.

11. Logachev I.N., Logachev K.I. Aerodynamic bases of aspiration. – SPb.: Khimizdat, 2005. – 659 p.
12. Makarov V.N., Potapov V.Ya., Davydov S.Ya., Makarov N.V. Method of additive aerodynamic calculation of the aeration classification unit of friction apparatuses // New refractories. 2017, no. 6, pp. 40-44.
13. Makarov V.N., Ugolnikov A.V., Makarov N.V. Optimization of geometrical parameters of the hydro-cyclone inertial venturi separator // Journal of Mining Institute. 2019, vol. 240, pp. 638-648. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.638.
14. Torshizi S.A., Benisi A.H., Durali M. Numerical optimization and manufacturing of the impeller of a centrifugal compressor // Scinting Iranica. 2017, no. 24, pp. 707-714.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Макаров Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор	Makarov Vladimir Nikolaevich – doctor of technical sciences, professor
Ахметов Рустам Гумарович – главный механик	Akismetov Rustam Gumarovich – chief mechanic
Макаров Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующей кафедрой	Makarov Nikolay Vladimirovich , candidate of technical sciences, associate professor, head of the department
Бельских Анна Михайловна – студент belskikh-2015@mail.ru	Belskikh Anna Mikhailovna – student

Получена 04.04.2023