

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУШКИ РУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ ИНЕРЦИОННО- ГРАВИТАЦИОННОЙ АЭРОСЕПАРАЦИИ

В. Н. Макаров¹, Р. Г. Ахметов², Н. В. Макаров¹, А. А. Арсланов¹

¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия,
mnikolay84@mail.ru

² АО «Костанайские минералы», г. Житикара, Республика Казахстан, info@km.kz

Аннотация: Проведенные на шахтных печах АО «Костанайские минералы» экспериментальные исследования и компьютерный анализ аэродинамических процессов подтвердили гипотезу о преобладающем влиянии концентрации, медианного диаметра, дисперсии, температуры и влажности пыли на эффективность пылеулавливания, существенное влияние на температуру и влажность рудной пыли в пневмосушиле параметров прямотока. Сила Архимеда с учетом силы тяжести, действующая на рудную пыль в прямотоке, обуславливает снижение величины критерия Фруда и, как результат, существенный рост на выходе из печи концентрации низкотемпературной влажной пыли из прямотока по отношению к концентрации высокотемпературной сухой пыли из противотока, что существенно снижает эффективность пылеулавливающего оборудования. В целях снижения концентрации пыли на выходе из печи, повышения эффективности пылеулавливающего оборудования предложено встраиваемое непосредственно в сушило устройство, работающее по принципу инерционно-гравитационной, термической сепарации. Для обеспечения оптимальных параметров рудной пыли на выходе из шахтной печи путем приведения уравнения Стокса к движению двухфазной среды к однопараметрической задаче по фактору релаксации пыли разработана математическая модель аэросепарации частиц пыли непосредственно в сушиле шахтной печи в функции от расхода, температуры теплоносителя и геометрических параметров аэросепаратора. Применение аэросепаратора, встроенного в сушило, позволило повысить экологическую эффективность шахтной печи до 75–85%, тем самым снизив не менее чем в 3 раза концентрацию аэрозоля на выходе из неё. Предложенная конструкция аэрационного сепаратора в настоящее время используется для повышения экологической эффективности вертикальной шахтной сушильной печи №9 цеха дробления и сушки хризотила (ДиСхр) АО «Костанайские минералы».

Ключевые слова: Экологическая эффективность, аэросепарация, медианный диаметр, сушило, входной коллектор, сила Стокса, Архимеда, аэрозоль.

Для цитирования: Макаров В. Н., Ахметов Р. Г., Макаров Н. В., Арсланов А. А. Повышение экологической эффективности сушки рудных материалов на базе инерционно-гравитационной аэросепарации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1-1. – С. 74–86. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_74.

Improving the environmental efficiency of ore materials drying based on inertial gravity air separation

V.N. Makarov¹, R.G. Akhmetov², N.V. Makarov¹, A.A. Arslanov¹

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia, mnikolay84@mail.ru

² Kostanay Minerals, Zhitikara, Republic of Kazakhstan, info@km.kz

Abstract: Experimental studies and computer analysis of aerodynamic processes carried out at the mine furnaces of Kostanay Minerals JSC confirmed the hypothesis of the predominant influence of the concentration, median diameter, dispersion, temperature and humidity of dust on the efficiency of dust collection, a significant influence on the temperature and humidity of ore dust in the pneumatic dryer of the parameters of the direct flow. The Archimedes force, taking into account gravity, acting on ore dust in the direct current, causes a decrease in the value of the Froude criterion and, as a result, a significant increase in the concentration of low-temperature wet dust from the direct current relative to the concentration of high-temperature dry dust from the counterflow, at the outlet of the furnace, which significantly reduces the efficiency of dust collecting equipment. In order to reduce the concentration of dust at the outlet of the dryer as a result of increasing the efficiency of dust-collecting equipment, a device built directly into it, operating on the principle of inertial-gravitational, thermal separation, is proposed. To ensure optimal parameters of ore dust at the outlet of the mine furnace by reducing the Stokes equation of motion of a two-phase medium to a one-parameter problem on the dust relaxation factor, a mathematical model of the aeroseparation of dust particles directly in the dryer of the mine furnace as a function of the flow rate, coolant temperature and geometric parameters of the aeroseparator has been developed. The use of an aeroseparator built into the dryer made it possible to increase the environmental efficiency of the shaft furnace to 75–85%, thereby reducing the concentration of aerosol at the outlet by at least 3 times. The proposed design of the aeration separator is currently being used to improve the environmental efficiency of the HSE No. 9 of the DiShr workshop of Kostanay Minerals JSC.

Key words: Environmental efficiency, aeroseparations, median diameter, dryer, inlet collector, Stokes force, Archimedes, aerosol.

For citation: Makarov V.N., Akhmetov R.G., Makarov N.V., Arslanov A.A. Improving the environmental efficiency of ore materials drying based on inertial gravity air separation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1-1):74–86. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_74.

Введение

Системный анализ информации об устройствах пылегазоулавливания вертикальных шахтных сушильных печей (ВШСП) указывает на существенное повышение их технических характеристик, энергоэффективности, степени отчистки. Наиболее часто применяют электрофильтры либо рукавные фильтры тонкой отчистки и одиночные батарейные циклоны предварительной отчистки. Однако повышенное содержание вредных примесей в аэрозоле

при условии высокой влажности рудного материала приводит к конденсации влаги как в циклонах, так и фильтрах, что резко снижает эффективность улавливания пыли, то есть отношение её концентрации на выходе в окружающую среду к концентрации в сушиле печи, что при оценке экологической безопасности производства характеризуется экологической эффективностью [1–3].

Непрерывный, оперативный контроль соблюдения экологического зако-

нодательства, — основная тенденция государственной политики в области повышения экологической эффективности как технологических процессов, так и предприятий в целом, — приводит к тому, что бизнес сталкивается с трудноразрешимыми задачами: снижать объем выпускаемой продукции в силу недостаточной эффективности пылегазоочистного оборудования или искать качественно новые экологически эффективные технологии.

Повышение экологической эффективности ВШСП может быть достигнуто за счет комплексного, конвергентного подхода не только к расчёту и выбору типа фильтра в совокупности с установками предварительной отчистки газа, но и к анализу физико-химических свойств, дисперсного состава, диапазона концентрации, влажности и температуры пыли на выходе из сушила, способов аэрационной сепарации, что требует совершенствования конструкции входного коллектора газотводящих каналов [4–6].

Для обеспечения устойчивой работы рукавного фильтра при запылённости газов, входящих в установку фильтрации, от 10 г/м^3 до 20 г/м^3 , при медианном диаметре пылевых частиц не менее 30 мкм , минимальной концентрации пыли на выходе не более 20 мг/м^3 необходимо обеспечивать минимально возможные скорости фильтрации, гарантированный запас по температуре точки росы, а также уровню аутогезии хризотил-асбестовой пыли, т.е. её влажности.

При этом для обеспечения паспортной эффективности циклонов и фильтров в условиях пылеулавливания сильно слипающейся рудной пыли максимально допустимую концентрацию её на входе необходимо снижать в 8–10 и 4 раза соответственно по отношению к слабо слипающейся пыли [7–9].

Задачей разработки установки для пылеочистки аэрозолей, кроме обеспечения экологических показателей, является её минимальное влияние на эффективность вертикальной шахтной сушильной печи. Для этого необходимо, чтобы дымосос обеспечивал условия оптимального сжигания газа и сушки асбеста в вертикально шахтной сушильной печи. Кроме того, необходимо чтобы нарушения в системе газоочистки не оказывали влияние на эффективность ВШСП.

Для достижения экономической эффективности газоочистной установки с рукавными фильтрами с учётом капитальных затрат и затрат на эксплуатацию необходим расчёт и выбор типа рукавного фильтра в совокупности с установками предварительной отчистки газа, анализом физико-химических свойств, дисперсного состава, диапазона концентрации пыли. В соответствии с исходными параметрами ВШСП сушки асбеста с производительностью $85\text{--}150 \text{ т/ч}$, расходом очищаемых газов до $70\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ экономически целесообразно применение газоочистного оборудования с рукавными фильтрами и циклонами в качестве предварительной отчистки. Для достижения максимальной экономической эффективности при коэффициенте пылеулавливания $99,9\%$ необходимо обеспечить концентрацию аэрозоля на входе в рукавный фильтр не более $2\text{--}10 \text{ г/м}^3$ при медианном диаметре пыли $15\text{--}30 \text{ мкм}$, скорости фильтрации не более $1\text{--}1,2 \text{ м/мин}$, влажности асбестовой пыли $0,5\text{--}0,7\%$, температуре газового потока не менее 80°C . При выборе рукавного фильтра необходимо учитывать физико-химические свойства пыли, поступающей на фильтрующий материал: влагосодержание, слипаемость, гигроскопичность, смачиваемость, высокую химическую актив-

ность, удельную поверхность, плотность, теплоёмкость, электризуемость, теплопроводность. Для обеспечения требуемой степени отчистки необходимо определить и контролировать диапазон оптимального гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки, время фильтрации. Расчёт оптимальных параметров рукавного фильтра и всего двухступенчатого газоочистного устройства шахтной вертикальной сушильной печи, оптимальных режимов дымососа, обеспечивающих требуемый диапазон разрежений, в том числе и в шахтном сушиле, как источнике пыли, позволяет на базе экспертных оценок и статистического анализа обеспечить экономическую эффективность не менее 1,5 руб./1000 м³ отчищаемого газа в сравнении с электрофильтрами.

Теоретические аспекты статьи.

Преобладающее влияние на повышение экологической эффективности сушки рудных материалов на базе инерционно-гравитационной аэросепарации согласно научно обоснованной гипотезе оказывают параметры аэрозоля: концентрация, медианный размер, дисперсия, температура и влажность пыли на выходе из печи, зависящие от технологического процесса сушки, состояния руды и определяющие качество пылеулавливания [10–12]. Новизна исследования экологической эффективности ВШСП заключается в разработке аэрационного сепаратора, обеспечивающего оптимальную совокупность параметров пыли на выходе из печи, соответствующую её максимальной экологической эффективности, то есть минимальной концентрации пыли в аэрозоле [13–15].

Кроме того, аэрационные процессы сушки рудных материалов в сепараторе должны приводить физические параметры частиц рудной пыли, указанные

выше, к значениям, обеспечивающим максимальную эффективность пылегазоочистного оборудования.

Результаты исследования. Проведенные в цехе ДиСхр АО «Костанайские минералы» экспериментальные исследования и анализ гранулометрического состава пыли в загрузочном, разгрузочном устройствах и на выходе из сушила показали, что в процессе компрессионного механического давления происходит дополнительное дробление взвешенных частиц исходной руды. В пределах фракции $-5 \cdot 10^{-4}$ м медианный диаметр частиц пыли возрастает по мере движения руды к входному коллектору газоотводящих каналов и далее в зону разгрузки. Это приводит к дополнительному выделению капиллярной влаги, росту слипаемости, снижению эффективности пылеулавливающего оборудования [16, 17].

Как видно из (рис.1, 2), медианный диаметр взвешенных частиц фракции $-5 \cdot 10^{-4}$ м в загрузочном устройстве, на выходе из печи и в разгрузочном устройстве возрастает, и равен соответственно: $2,95 \cdot 10^{-4}$ м; $3,35 \cdot 10^{-4}$ м; $4,5 \cdot 10^{-4}$ м. При этом дисперсия медианного диаметра взвешенных частиц хризотил асбеста так же возрастает с 0,2d до 0,3d, что подтверждает вышесказанное.

Более важным выводом из проведенных исследований является тот факт, что конструктивное исполнение сушила вертикальной шахтной печи приводит не только к росту медианного диаметра, но и к концентрации взвешенных частиц хризотил-асбеста в процессе движения рудного материала от загрузочного устройства к устройству разгрузки. Указанное способствует дополнительному росту экологической нагрузки как на печь, так и на её пылегазоочистное оборудование, и должно

учитываться при разработке аэросепаратора, встроенного в сушило.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что концентрация взвешенных частиц хризотил-

асбеста фракции -500 мкм в аэрозоле в процессе сушки возрастает в интервале от 63 до 69% от её концентрации в загрузочном устройстве, в диапазоне режимных параметров ВШСП. Таким

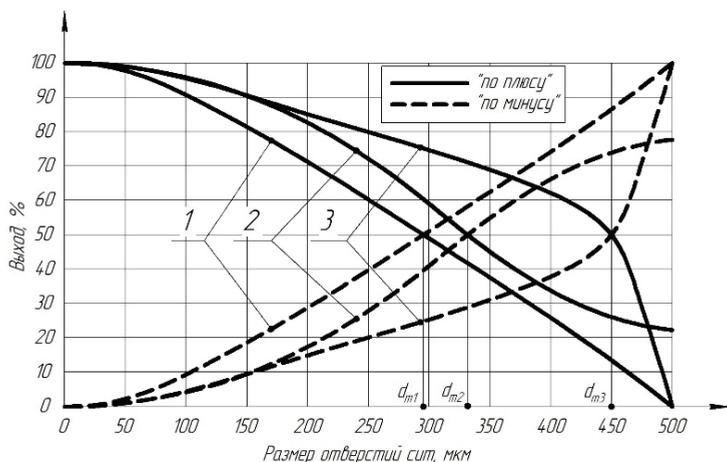


Рис. 1. Суммарные ситовые характеристики и медианные диаметры взвешенных частиц хризотил-асбеста фракции -500 мкм: 1 – в загрузочном устройстве; 2 – на выходе из ВШСП; 3 – в разгрузочном устройстве

Fig. 1. Total sieve characteristics and median diameters of suspended particles of chrysotile asbestos fraction -500 microns: 1 – in the loading device; 2 – at the outlet of the HSSP; 3 – in the unloading device

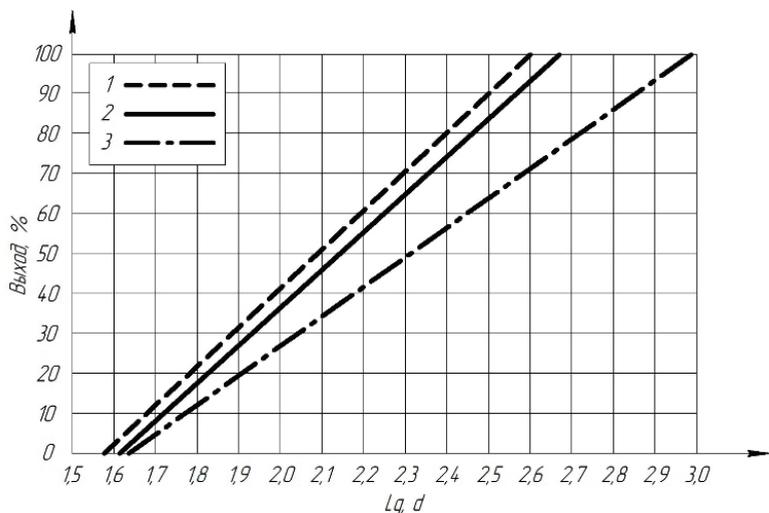


Рис. 2. Номограммы дисперсного состава взвешенных частиц хризотил-асбеста фракции -500 мкм: 1 – в загрузочном устройстве; 2 – на выходе из ВШСП; 3 – в разгрузочном устройстве

Fig. 2. Nomograms of the dispersed composition of suspended particles of chrysotile asbestos fraction -500 microns: 1 – in the loading device; 2 – at the outlet of the HSSP; 3 – in the unloading device

образом, рост концентрации взвешенных частиц хризотил-асбеста, изменяясь не более чем на 10% в широком диапазоне режимных параметров шахтной печи, приводит к увеличению практически на 70% экологической нагрузки на пылегазоочистное оборудование ВШСП.

Анализ математического моделирования (рис. 3) подтвердил выводы промышленных экспериментальных исследований о существенном влиянии на температуру и влажность асбестовой пыли в пневмосушиле параметров прямотока [18, 19].

Диаграммы на рис. 3 показывают, что значительная часть взвешенных частиц хризотил-асбеста из прямотока под действием поля аэродинамических сил депрессии поступает в пневмосушило, не вступая в контакт с теплоносителем из противотока. В следствие негативного действия приведенной силы Архимеда, в противовес вышесказанному, из противотока в пневмосушило поступает незначительная часть взвешенных частиц хризотил-асбеста. При этом пылевые частицы в противотоке имеют более высокую температуру и меньшую влажность по отношению к частицам прямотока, характеризующимся низкой температурой и высокой влажностью вследствие недостаточной эффективности теплообмена. Таким образом, вышесказанное неизбежно приводит к росту концентрации пылевых частиц хризотил-асбеста с повышенной влажностью и низкой температурой, поступающих в пневмосушило, что снижает экологическую эффективность печи, одновременно повышая нагрузку и снижая эффективность пылегазоулавливающего оборудования.

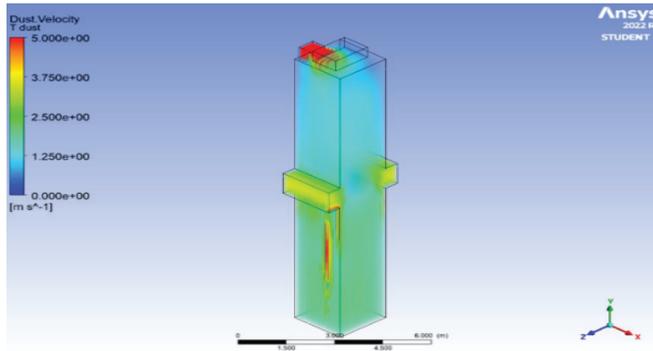
Для устранения указанного негативного явления, повышения экологической эффективности ВШСП

и её пылеулавливающего оборудования в статье предложено встроенное в сушило печи устройство аэрационной сепарации. Данное устройство путем целенаправленной организации как сепарации взвешенных частиц хризотил-асбеста, так и их аспирации за счёт действия аэродинамических, инерционных сил, вязкости и температуры теплоносителя, обеспечивает требуемые оптимальные параметры концентрации, температуры и влажности частиц пыли, а также температуры и влажности теплоносителя, поступающих в пневмосушило.

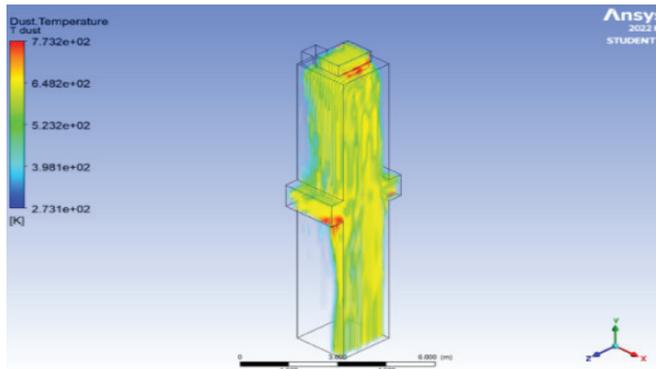
Проведенные на ВШСП №9 цеха ДиСхр АО «Костанайские минералы» экспериментальные исследования показали, что наибольшая эффективность печи и циклона, как в первой ступени пылеулавливания, достигается при следующих параметрах газового потока и асбестовой пыли на входе в пневмосушило: $t_r \geq 150-200$ °С, $t_n \geq 45-55$ °С, $\varphi_r \geq 30-40$ %, $\varphi_n \geq 0,6-0,7$ %; $z_4 \leq 40$ г/м³.

На рис. 4 представлена схема ВШСП, реализующая модифицированный метод аэрационной сепарации для повышения экологической эффективности, содержащая загрузочное устройство 1, верхнюю прямоточную 2, нижнюю противоточную 3 части сушила, устройство выгрузки 4, входной коллектор 5 в газоотводящие каналы 6 с горизонтальным входом 7 в зоне схождения прямоточной и противоточной частей сушила, выполненным в виде вертикального диффузорного канала 8.

Модифицированная математическая модель аэрационной сепарации в виде уравнения вертикального движения частицы пыли диаметром d_i в диффузорном канале входного коллектора газоотводящих каналов получена в виде [14, 20]:



а



б

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

Fig. 3. Distribution of the parameters of asbestos dust along the vertical axis of the VSHP at the nominal mode of its operation: a – temperature; b – speed

$$\frac{m_i dV_{bi}}{dt} = 3\pi\mu d_i k \cdot \left[u(t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}} + q\tau_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \right] - \frac{\pi}{6} d_i^3 (\rho_i - \rho_r) g, \quad (1)$$

где V_{bi} – скорость i -ой частицы пыли по вертикальной оси сушила, м/с; μ – динамическая вязкость теплоносителя, Па·с; k – коэффициент формы i -ой частицы пыли; $u(t) = \frac{Q_1 + Q_2}{S_k(h)}$ – скорость аэрозоля в диффузорном канале входного коллектора, м/с; $Q_1 + Q_2$ – расход теплоносителя прямотока и противотока соответственно, м³/с; $S_k(h)$ – площадь диффузорного канала входного коллектора, м²; $h(t)$ – текущая высота диффузорного канала входного коллектора, м;

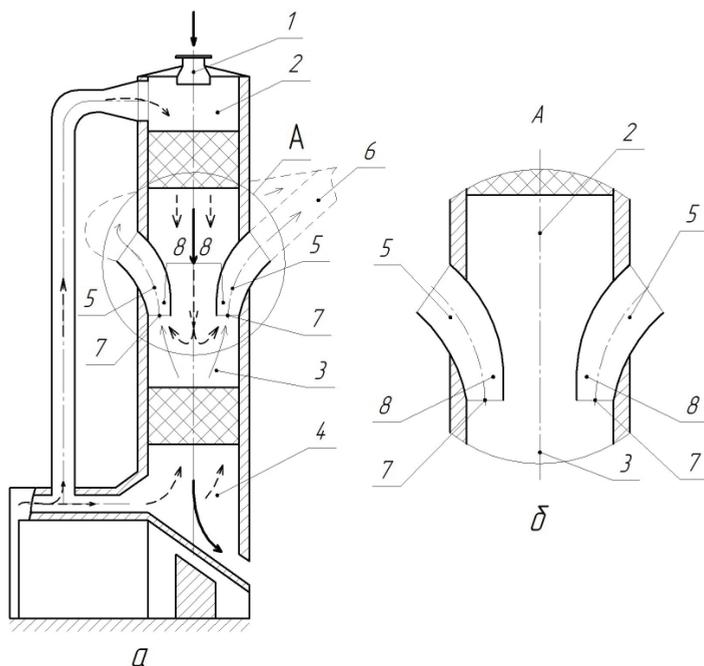


Рис. 4. Схема: а – ВШСП; б – устройства аэрационной сепарации пыли
 Fig. 4. Scheme: a – HSSP; b – aeration dust separation devices

$\tau_i = \frac{d_i^2 \cdot \rho_i}{18 \cdot \mu k}$ – время релаксации i -ой частицы пыли, с; ρ_i, ρ_{Γ} – плотность i -ой частицы пыли и теплоносителя соответственно, кг/м³.

Минимальный диаметр аэрационно сепарируемых частиц пыли в функции от их положения в диффузорном канале входного коллектора с учетом (1) после преобразования получим в виде:

$$d_{mi}(h) = \sqrt{\frac{18\mu k}{\rho_{i(h)} - \rho_{\Gamma(h)}} \cdot \frac{q}{\left[u(h) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}} + q\tau_i(1-e)^{-\frac{t}{\tau_i}} \right]}}, \quad (2)$$

где $\rho_{i(h)} - \rho_{\Gamma(h)}$ – текущие плотности i -ой частицы пыли и теплоносителя в функции от их положения в диффузорном канале входного коллектора, изменяющиеся в процессе конвективного теплообмена в связи с изменением их температуры и влажности. Из анализа уравнения (2) видно, что оно представляет собой параметрическое уравнение с внешним параметром скорости теплоносителя, определяемой по формуле:

$$u(h_i) = \frac{Q_1 + Q_2}{S_{\text{ок}} + \int_0^{h_i} D(h) dh}, \quad (3)$$

где $S_{\text{вк}}$ — площадь входа в диффузорный канал коллектора, м²; $D(h)$ — локальная диффузорность вертикального канала входного коллектора.

Скорость перемещения i -ой частицы пыли диаметром d_i в процессе аэрационной сепарации диффузорном канале входного коллектора газоотводящих каналов получим в виде:

$$V_{bi} = \left(q\tau_i - \frac{Q_1 + Q_2}{S_{\Pi} - S_{BK}} - \frac{Q_1 + Q_2}{S_{\text{вк}} + \int_0^{h_i} D(h)dh} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}} - q\tau_i + \frac{Q_1 + Q_2}{S_{\text{вк}} + \int_0^{h_i} D(h)dh}, \quad (4)$$

где S_{Π} — площадь сушила печи, м².

Время, в течение которого i -ая частица пыли диаметром d_i достигнет высоты h_i в диффузорном канале входного коллектора, определяется по формуле:

$$t_i = \tau_i \cdot \ln \frac{\frac{Q_1 + Q_2}{S_{\text{вк}} + \int_0^{h_i} D(h)dh} - q\tau_i}{\frac{Q_1}{S_{\Pi} - S_{BK}} + \frac{Q_1 + Q_2}{S_{\text{вк}} + \int_0^{h_i} D(h)dh} - q\tau_i}. \quad (5)$$

Из анализа уравнений (2–5) видно, что скорость, время движения в диффузорном канале и, как результат, медианный диаметр сепарируемых аэрацией частиц пыли не зависят от характера изменения локальной диффузорности $D(h)$ входного коллектора [14, 20].

Таким образом, диффузорный канал обеспечивает дополнительную сушку взвешенных частиц рудного материала, направляя при этом ее в полезный концентрат, снижает концентрацию пыли на выходе из сушила печи, повышая тем самым её экологическую эффективность.

На рис. 5 приведены результаты исследования эффективности аэросепаратора, интегрированного в сушило ВШСП АО «Костанайские минералы».

Из анализа рис. 5 с учетом (6) видно, что применение оптимально спроектированного аэросепаратора в виде вертикального диффузорного канала, встроенного в сушило печи, сепарирует до 80% хризотил-асбестовой пыли, направляя её в разгрузочное устройство и далее – в черновой концентрат на обогащение и классификацию, позволяя повысить эффективность пылеулавливания совместно с циклоном СК-ЦН-34 с 93 до 98%, снизив тем самым нагрузку на ступень тонкой пылеочистки.

Заключение

1. Экспериментальные исследования, проведенные в цехе ДиСхр АО «Костанайские минералы», и инженерный компьютерный анализ аэродинамических процессов в сушиле подтвердили гипотезу о преобладающем влиянии концентрации, медианного диаметра, дисперсии, температуры и влажности пыли на качество пылеулавливания.

2. Сила Архимеда с учетом силы тяжести, действующая на рудную пыль в прямотоке, обуславливает снижение величины критерия Фруда и, как резуль-

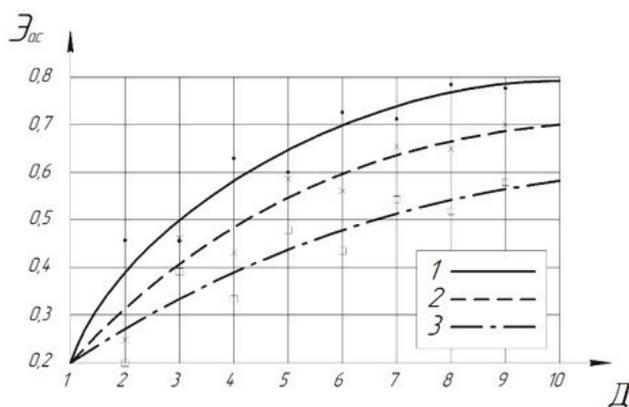


Рис. 5. Динамика изменения экологической эффективности шахтной печи в зависимости от диффузности аэрационного сепаратора при: $t_1 = 500^\circ\text{C}$; $Pr = 28 \text{ кг/с}$; $SBK = 2 \text{ м}^2$; $1 - Q = 13 \text{ м}^3/\text{с}$; $1 - Q = 17 \text{ м}^3/\text{с}$; $1 - Q = 22 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 5. Dynamics of changes in the environmental efficiency of a shaft furnace from the diffuseness of the aeration separator at: $t_1 = 500^\circ\text{C}$; $Pr = 28 \text{ кг/с}$; $SBK = 2 \text{ м}^2$; $1 - Q = 13 \text{ м}^3/\text{с}$; $1 - Q = 17 \text{ м}^3/\text{с}$; $1 - Q = 22 \text{ м}^3/\text{с}$

тат, существенный рост концентрации низкотемпературной влажной пыли из прямого тока по отношению к концентрации высокотемпературной сухой пыли из противотока, на выходе из печи, что существенно снижает эффективность пылеулавливающего оборудования.

3. Для достижения экологической эффективности шахтных печей необходимо с помощью аэрационного сепаратора и термогенерации обеспечивать следующие параметры аэрозоля на выходе из сушила: температура теплоносителя $150^\circ\text{C} \leq t_T \leq 200^\circ\text{C}$, температура частиц пыли $45^\circ\text{C} \leq t_p \leq 55^\circ\text{C}$, влажность теплоносителя $30^\circ\text{C} \leq \varphi_p \leq 40^\circ\text{C}$, влажность частиц пыли $0,6\% \leq \varphi_p \leq 0,7\%$, концентрация пыли в аэрозоле $z \leq 40 \text{ г/м}^3$

4. На базе принципа инерционно-гравитационной, термической аэросепара-

ции предложена конструкция сепаратора, интегрированного в сушило печи и обеспечивающего с учетом достижения параметров, указанных в п. 3, экологическую эффективность печи 75–80%, что позволяет повысить эффективность пылеулавливания совместно с циклоном СК-ЦН-34 с 93 до 98 %, снизив тем самым нагрузку на ступень тонкой пылеочистки.

Вклад авторов

Макаров В. Н. — Генерация идеи исследования и постановка задачи исследования.

Ахметов Р. Г. — Получение данных для анализа

Макаров Н. В. — Выполнение работы по систематизации материала

Арсланов А. А. — Анализ результатов исследования и подготовка данных, написание текста статьи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kornilov G., Gazizova O., Bunin A., Bulanov, M., Karyakin A. L. Improving the quality of voltage in the conditions of the oxygen-converter shop of metallurgical production (2019) Proceedings — ICOECS 2019: 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, article №8949928, DOI:10.1109/ICOECS46375.2019.8949928.

2. Davydov S. Y., Valiev N. G., Tauger V. M. Effect of the Flow of Transported Bulk Material on Design Features of a Belt Conveyor. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2019. 60 (1), pp. 10–13. DOI:10.1007/s11148-019-00301-5.

3. Lyaptsev S. A. Classification of granular material in an impact with a separation surface/ Lyaptsev S. A., Davydov S. Y./*Refractories and Industrial Ceramics*. — 2015. — Vol. 55, No 6.– pp.570–572.

4. Кычкин А. В., Николаев А. В. Архитектура киберфизической системы управления проветриванием подземного горнодобывающего предприятия на базе платформы Интернета вещей. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2021;22(3):115–123. <https://doi.org/10.17587/mau.22.115-123>.

5. Fair R., Laar J. H., Nell K., Nell D., Mathews E. H. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions // *South African Journal of Industrial Engineering* November. 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42–51. DOI: 10.7166/32-3-2616.

6. Velikanov V. S., Dyorina N. V., Suslov N. M., Luntsova A. I., Rabina E. I. Automation of design for dynamic loading at the designing stage of mining machinery (2019) *Journal of Physics: Conference Series*, 1399 (3), article №033010, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/3/033010.

7. Тарасов П. И., Хазин М. Л., Голубев О. В. Снижение геоэкологической нагрузки горно-перерабатывающей промышленности северных и арктических территорий // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2019. — № 7. — С. 74–82. DOI: 10.25018/02361493-2019-07-0-74-82.

8. Александрова Т. Н., Афанасова А. В., Кузнецов В. В., Бабенко Т. А. Исследование процессов селективной дезинтеграции медно-никелевых руд Заполярного месторождения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 12. — С. 73–87. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_73.

9. Шаров Н. А., Дудаев Р. Р., Кришук Д. И., Лискова М. Ю. // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. — 2019. — Т. 19, №2. — С.184–200. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.2.8.

10. Пелевин А. Е., Сытых Н. А., Черепанов Д. В. Влияние крупности частиц на эффективность сухой магнитной сепарации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 11–1. — С. 293–305. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_293.

11. Романченко С. Б., Тимченко А. Н., Костеренко В. Н., Поздняков Г. А., Руденко Ю. Ф., Артемьев В. Б., Копылов К. Н. Комплексное обеспыливание / М.:Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центра», 2016. 288 с.

12. Буренин В. В. Удаление вредных веществ из пылевоздушных выбросов предприятий. // *Экология производства*. 2014. № 12. С. 56–63.

13. Босиков И. И., Ключев Р. В., Хетагуров В. Н., Ажмухамедов И. М. Разработка методов и средств управления аэрогазодинамическими процессами на добычных участках // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 77–83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83.

14. Угольников А. В., Макаров В. Н., Макаров Н. В. Оптимизация геометрических параметров гидровихревого инерционного стратификатора Вентури. *Записки горного института*. — 2019. — Т. 240. — С. 638–648. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.638.

15. Макаров В. Н., Макаров Н. В., Плотников Н. С., Потапов В. В. Математическое моделирование вихревого гидрообеспыливания на горно-обогачительных предприятиях. // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2018. — № 4. — С. 210–217.

16. Антипов С. Т., Журавлев А. В., Казарцев Д. А., Бородкина А. В., Нестеров Д. А. Комбинированные аппараты с закрученным потоком теплоносителя для сушки дисперсных материалов // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2014, с. 52–58.

17. 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. 80–84.

18. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control. *Applied Sciences*. 2017, vol. 7, no. 1, pp. 5–20. DOI: 10.3390/app7010005.

19. Бойков А. В., Савельев Р. В., Пайор В. А. Применение численного моделирования в горно-металлургической области / Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие». – СПб., 2019. – С. 31–34.

20. Torshizi S. A. M., Benisi A. H., Durali M. Numerical optimization and manufacturing of the impeller of a centrifugal compressor // *Scenting Iranica*, 2017, No 24, pp.707–714. DOI:10.1115/GT2016–57105. 

REFERENCES

1. Kornilov G., Gazizova O., Bunin A., Bulanov, M., Karyakin A. L. Improving the quality of voltage in the conditions of the oxygen-converter shop of metallurgical production (2019) *Proceedings ICOECS 2019: 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*, article №8949928, DOI:10.1109/ICOECS46375.2019.8949928.

2. Davydov S. Y., Valiev N. G., Tauger V. M. Effect of the Flow of Transported Bulk Material on Design Features of a Belt Conveyor. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2019. 60 (1), pp. 10–13. DOI:10.1007/s11148-019-00301-5.

3. Lyaptsev S. A. Classification of granular material in an impact with a separation surface/ Lyaptsev S. A., Davydov S. Y./*Refractories and Industrial Ceramics*. 2015, Vol. 55, no. 6, pp.570–572.

4. Kychkin A. V., Nikolaev A. V. Architecture of a Cyber-Physical System for the Mining Enterprise Ventilation Control Based on the Internet of Things Platform. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2021;22(3):115–123. [In Russ].

5. Fair R., Laar J. H., Nell K., Nell D., Mathews E. H. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions. *South African Journal of Industrial Engineering* November. 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42–51. DOI: 10.7166/32–3-2616.

6. Velikanov V. S., Dyorina N. V., Suslov N. M., Luntsova A. I., Rabina E. I. Automation of design for dynamic loading at the designing stage of mining machinery (2019) *Journal of Physics: Conference Series*, 1399 (3), article №033010, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1742–6596/1399/3/033010.

7. Tarasov P. I., Khazin M. L., Golubev O. V. Reducing the environmental burden of the mining industry of the northern and Arctic territories. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 7, pp. 74–82.

8. Alexandrova T. N., Afanasova A. V., Kuznetsov V. V., Babenko T. A. Investigation of the processes of selective disintegration of copper-nickel ores of the Polar deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 12, pp. 73–87. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_73.

9. Sharov N. A., Dudayev R. R., Krishchuk D. I., Liskova M. Yu. Dust suppression methods in coal mines of the Far North. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2019, vol.19, no.2, pp. 184–200. [In Russ]. DOI: 10.15593/2224–9923/2019.2.8.

10. Pelevin A. E., Sytykh N. A., Cherepanov D. V. The effect of particle size on the efficiency of dry magnetic separation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11–1, pp. 293–305. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_293.

11. Romanchenko S. B., Timchenko A. N., Kosterenko V. N., Pozdnyakov G. A., Rudenko Yu. F., Artemyev V. B., Kopylov K. N. Complex dedusting. M.: Publishing house “Mining” LLC “Cimmerian Center”, 2016. 288 p. [In Russ].

12. Burenin, V. V. Removing harmful substances from the dusty emissions enterprises. *Ekologiya proizvodstva Production ecology*, 2014, 12, pp.56–63. [In Russ].
13. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Khetagurov V. N., Azhmukhamedov I. M. Development of methods and means of controlling aerogasdynamic processes in mining areas. Sustainable development of mountain regions. 2021, Vol. 13, no. 1, pp. 77–83. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83.
14. Makarov V. N., Davydov S. Y., Makarov N. V. Genesis of ecotechnology efficiency in the production of dust-forming materials. *New Refractories*. 2019;(2): pp.55–59. [In Russ]. DOI:10.17073/1683-4518-2019-2-55-59.
15. Makarov V. N., Makarov N. V., Plotnikov N. S., Potapov B. B. Mathematical modeling of vortex hydraulic spraying at mining and processing enterprises.. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 4, pp. 210–217. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-210-217.
16. Antipov S. T., Zhuravlev A. V., Kazartsev D. A., Borodkina A. V., Nesterov D. A. Combined apparatuses with swirling coolant flow for drying dispersed materials//*Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2014, pp. 52–58. [In Russ].
17. Yuryev B. P., Goltsev V. A., Maltsev V. A., & Savin V. A. Drying of chrysotile ore in vertical mine-type apparatuses. *Building materials*. 2016; No. 8. p. 80–84. [In Russ].
18. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control. *Applied Sciences*. 2017, vol. 7, no. 1, pp. 5–20. DOI: 10.3390/app7010005.
19. Boikov A. V., Savelyev R. V., Payor V. A. Application of numerical modeling in the mining and metallurgical field / Collection of selected articles based on materials of scientific conferences of the GNII “National Development”. St. Petersburg, 2019. pp. 31–34.
20. Torshizi S. A. M., Benisi A. H., Durali M. Numerical optimization and manufacturing of the impeller of a centrifugal compressor. *Scencing Iranica*, 2017, No 24, pp.707–714. DOI:10.1115/GT2016-57105.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макаров Владимир Николаевич — докт. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «УГГУ», orcid.org/0000-0002-3785-5569, email: uk.intelnedra@gmail.com;

Ахметов Рустам Гумарович — главный механик, АО «Костанайские минералы», email: info@km.kz;

Макаров Николай Владимирович — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «УГГУ», orcid.org/0000-0001-7039-6272, email: mnikolay84@mail.ru (для контактов);

Арсланов Азамат Альфизович — студент, ФГБОУ ВО «УГГУ», orcid.org/0009-0003-3082-0309, email: azamat.arslanov.2000@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Makarov V. N., Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, FGBOU VO “USGU”, orcid.org/0000-0002-3785-5569, email: uk.intelnedra@gmail.com;

Akhmetov R. G., chief mechanic, JSC Kostanay Minerals, email: info@km.kz;

Makarov N. V., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, FGBOU VO “USGU”, orcid.org/0000-0001-7039-6272, email: mnikolay84@mail.ru (corresponding author);

Arslanov A. A., student, FGBOU VO “USGU”, orcid.org/0009-0003-3082-0309, email: azamat.arslanov.2000@mail.ru.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 04.09.2023; принята к печати 10.12.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 04.09.2023; accepted for printing 10.12.2023.