

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕЧЕЙ СУШКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЖЕКЦИИ В ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЕ

Е.С. Нурхожаев¹, В.В. Зотов², В.Н. Макаров³, Н.В. Макаров⁴

¹ АО «Костанайские минералы», Житикара, Республика Казахстан

² НИТУ МИСИС, Москва, Россия

³ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

⁴ ООО «Вентиляция, Экология, Безопасность», Екатеринбург, Россия, e-mail: mnikolay84@mail.ru

Аннотация: Повышение конкурентоспособности предприятий горно-металлургического комплекса актуализирует задачу увеличения эффективности технологических процессов подготовки исходного минерального сырья. Перспективным направлением исследования путей снижения расхода теплоносителя и повышения эффективности процесса сушки является оптимизация распределения исходного материала в загрузочном устройстве, его геометрических параметров, аэротермодинамических процессов взаимодействия частиц исходного материала с атмосферным воздухом и теплоносителем, обеспечивающих формирование требуемой структуры на входе в печь и устранение эжекционных процессов. Существующие методики расчета загрузочных устройств и коллекторов подачи теплоносителя прямого тока в сушило печи, математические модели исследования процессов взаимодействия атмосферного воздуха, минерального сырья и теплоносителя не учитывают влияние на эжекционные процессы переноса массы, импульса, энергии при фазовых преобразованиях в двухфазовых средах, обусловленных существенным градиентом температуры между атмосферным воздухом и теплоносителем, а также высокой влажностью частиц исходных минералов. Предложена методика компьютерной оптимизации посредством Discrete Phase Model в эйлерово-лагранжевом виде аэротермодинамических процессов эжекции в двухфазных средах загрузочных устройств сушильных печей, во взаимосвязи с их геометрическими параметрами с учетом переноса массы, импульса, энергии при фазовых преобразованиях, обусловленных высокой влажностью частиц минерального сырья и существенными градиентами температур атмосферного воздуха и теплоносителя. Модернизация загрузочного устройства вертикальной шахтной сушильной печи № 9 АО «Костанайские минералы» на базе предложенной методики позволила снизить объем эжектируемого воздуха до нуля, расход теплоносителя – на 28%, электроэнергии – не менее чем на 15%.

Ключевые слова: эжекция, минеральное сырье, сушка сырья, двухфазная среда, сушильная печь, компьютерная оптимизация, теплоноситель, влажности.

Для цитирования: Нурхожаев Е. С., Зотов В. В., Макаров В. Н., Макаров Н. В. Повышение эффективности печей сушки минерального сырья с использованием компьютерной оптимизации эжекции в двухфазной среде // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10. – С. 114–125. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_114.

Improvement of kilns for drying mineral raw materials through computerized optimization of two-phase ejection

E.S. Nurkhozhaev¹, V.V. Zotov², V.N. Makarov³, N.V. Makarov⁴

¹ Kostanay Minerals JSC, Zhitikara, Republic of Kazakhstan

² NUST MISIS, Moscow, Russia

³ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

⁴ Ventilation Ecology Safety LLC, Ekaterinburg, Russia, mnikolay84@mail.ru

Abstract: For increasing competitiveness of the mining and metallurgical sector, it is highly topical to improve efficiency of process flow diagrams involved in pre-treatment of original mineral raw materials. A promising way of decreasing consumption of heat carrier and enhancing drying efficiency is optimization of distribution of a source material in the feeder, geometrical parameters of the material, aero-thermodynamics of interaction between the source material particles and atmospheric air and a heat carrier, ensuring formation of a required structure at the kiln inlet and elimination of ejection processes. The current design procedures for feeders and supply headers of the direct flow heat carrier to the drying kiln, and mathematical models of interaction between the atmospheric air, mineral raw material and heat carrier neglect the influence exerted on the ejection process by the mass transport, impulse and energy in the phase transformation in two-phase media, conditioned by a high temperature gradient between the atmospheric air and heat carrier, and by the high moisture of mineral particles. This article proposes a computerized optimization procedure in Discrete Phase Model in the Euler-Lagrange form of aero-thermodynamic processes of ejection in two-phase media in kiln feeders, in interaction with their geometrical parameters with regard to the mass transport, impulse and energy in the phase transformation, conditioned by high moisture of mineral particles and by high temperature gradients between the atmospheric air and heat carrier. Upgrading of the feeder of vertical mine drying kiln No. 9 at Kostanay Minerals JSC using the proposed procedure made it possible to decrease the air ejection to zero, the heat carrier consumption by 28% and the power consumption by 15%.

Key words: ejection, mineral raw material, drying, two-phase medium, drying kiln, computerized optimization, heat carrier, moisture.

For citation: Nurkhozhaev E. S., Zotov V. V., Makarov V. N., Makarov N. V. Improvement of kilns for drying mineral raw materials through computerized optimization of two-phase ejection. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10):114-125. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_114.

Введение

Положительная динамика роста качества продукции горно-металлургического комплекса, высокие экологические требования, необходимость повышения конкурентоспособности предприятий актуализируют задачу увеличения эффективности технологических процессов подготовки исходного минерального сырья, в том числе сушки, обжига, прока-

ливания. Первостепенные задачи улучшения процесса сушки минерального сырья и повышения энергоэффективности, снижения экологической нагрузки на окружающую среду — оптимизация параметров аэротермодинамического процесса его взаимодействия с теплоносителем в шахтных печах, а также снижение расхода газа как основного энергоносителя, что может быть достигнуто

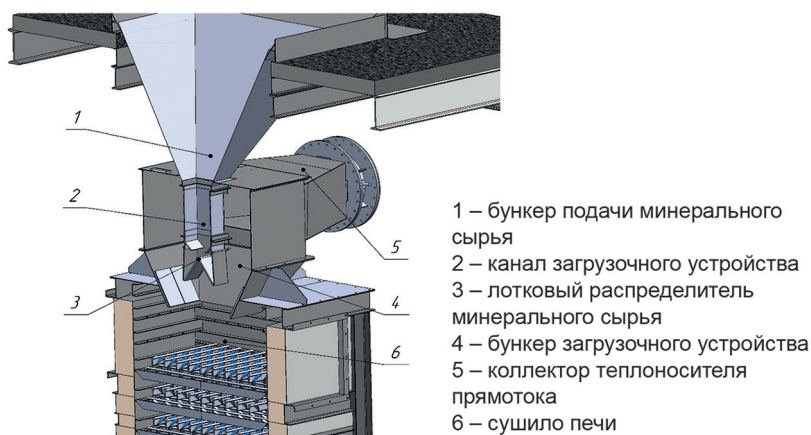


Рис. 1. Загрузочное устройство ВШСП № 9 цеха ДиСхр АО «Костанайские минералы»:

Fig. 1. Loading device of the VShSP No. 9 of the DiSkhr shop of Kostanay Minerals JSC

за счет повышения эффективности загрузочных устройств [1 – 3].

Загрузочные устройства шахтных сушильных печей обеспечивают устранение поступления в них атмосферного воздуха вследствие процесса эжекции при подаче минерального сырья и теплоносителя прямотока [4].

Перспективным направлением исследования путей снижения расхода теплоносителя, повышения эффективности процесса сушки, роста энергоэффективности при заданном уровне производства является оптимизация распределения исходного материала в загрузочном устройстве, его геометрических параметров, аэротермодинамических процессов взаимодействия частиц исходного материала с атмосферным воздухом и теплоносителем, обеспечивающих формирование требуемой структуры на входе в печь и устранение эжекционных процессов [1, 5, 6].

Существующие методики расчета загрузочных устройств и коллекторов подачи теплоносителя прямотока в сушило печи, математические модели исследования процессов взаимодействия атмосферного воздуха, минерального сырья и теплоносителя не учитывают влияние на эжекционные процессы пе-

реноса массы, импульса, энергии при фазовых преобразованиях [7, 8].

Предмет исследования – аэротермодинамические процессы эжекции в двухфазных средах загрузочных устройств сушильных печей во взаимосвязи с их геометрическими параметрами.

Используемые в цехе дробления и сушки хризотила (ДиСхр) АО «Костанайские минералы» загрузочные устройства, по конструкции соответствующие лотковым распределителям, были приняты в качестве исходной конструкции для верификации предлагаемой методики [4, 7] (рис. 1).

Цель и новизна исследований

Целью исследований является разработка методики компьютерной оптимизации аэротермодинамических процессов эжекции в двухфазных средах загрузочных устройств для повышения эффективности процесса сушки, технико-экономических показателей печей и конкурентоспособности горно-металлургических предприятий. Новизна исследований заключается в учете переноса массы, импульса, энергии при фазовых преобразованиях, обусловленных высокой влажностью частиц минерального сырья и существенными градиентами

температур атмосферного воздуха и теплоносителя при расчетах процесса эжекции с использованием эйлерово-лагранжевого подхода, реализованного в ANSYS Fluent в виде модели дискретной фазы Discrete Phase Model (DPM) [9].

Результаты исследований

3D-модель загрузочного устройства создавалась с возможностью компьютерного моделирования процессов эжекции атмосферного воздуха в гравитационном поле частиц минерального сырья с учетом аэротермодинамических процессов дополнительной эжекции от взаимодействия теплоносителя прямого тока с атмосферным воздухом и материалом, переноса массы, импульса, энергии при фазовых преобразованиях с опцией оптимизации параметров загрузочного устройства и теплоносителя прямого тока по критерию минимальной эжекции атмосферного воздуха. При оптимизации определяются: характеристики теплоносителя прямого тока в бункере загрузочного устройства, взаимное расположение входа теплоносителя прямого тока в загрузочное устройство и лоткового распределителя, высота канала загрузочного устройства, геометрические параметры выхода из лоткового распределителя, избыточное давление в корпусе загрузочного устройства, соответствующее минимуму эжекции атмосферного воздуха [10–12].

Генезис существующих математических моделей, описывающих процессы эжекции при движении двухфазных сред, позволил создать одну из наиболее эффективных моделей типа Discrete Phase (DPM) имеет серьезные ограничения по качеству получаемых результатов в зависимости от соотношения объемных и массовых концентраций фаз, условий их взаимопроникновения. Для замыкания системы дифференциальных уравнений, отражающих взаимообмен им-

пульсами и энергией между фазами, необходимо использование дополнительных соотношений, которые в каждом конкретном случае могут быть получены эмпирически или на основании кинетической теории [13, 14].

В рассматриваемом процессе на первом этапе дискретная фаза обменивается энергией и импульсом с несущей фазой. На втором этапе совместно с атмосферным воздухом дискретная фаза взаимодействует с теплоносителем прямого тока.

В процессе взаимодействия с атмосферным воздухом и теплоносителем изменения параметров движения частиц руды учитывались в модели DPM. Основной проблемой формирования математической модели процессов эжекции при взаимодействии двухфазных сред является корректный учет переноса массы, импульса и энергии. В условиях фазовых превращений при взаимодействии между частицами руды, атмосферным воздухом и теплоносителем происходит взаимообмен массой, импульсом и энергией. Испарение влаги с поверхности частиц руды вследствие существенной разности температур приводит к фазовым преобразованиям. В предлагаемой математической модели объемная интенсивность испарения, учитываемая через разность температуры частиц, температуры насыщения теплоносителя, коэффициент теплообмена и концентрацию частиц руды, определяет тепломассообмен от испарения [15, 16].

С учетом сказанного [9, 13, 17] уравнения переноса массы в математической модели аэротермодинамики двухфазной среды в процессе эжекции получим в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \beta_i \rho_i + \frac{\partial}{\partial x_k} \beta_i \rho_i v_{ik} = \\ = \frac{\partial}{\partial t} \psi(\gamma_i \rho_i) - \frac{\partial}{\partial x_k} \psi(\beta_i \rho_i v_{ik}) \end{aligned} \quad (1)$$

где $i = 1, 2$ — параметр частиц руды и атмосферного воздуха (теплоносителя соответственно); t — время, с; β_i — объемная концентрация частиц руды и атмосферного воздуха (теплоносителя), $\text{м}^3/\text{м}^3$; ρ_i — плотность частиц руды и атмосферного воздуха (теплоносителя), $\text{кг}/\text{м}^3$; x_k — конечная точка пути, пройденного частицами в загрузочном устройстве, м; v_{ik} — скорость частиц руды и атмосферного воздуха (теплоносителя) на выходе из загрузочного устройства, $\text{м}/\text{с}$; ψ — коэффициент сопротивления частицы; γ_i — признак существования частиц руды или атмосферного воздуха (теплоносителя) в элементарном объеме dV , $\gamma_i = 1$ при наличии соответствующей фазы, $\gamma_i = 0$ при отсутствии соответствующей фазы.

Уравнение переноса импульсов между фазами в процессе эжекции атмосферного воздуха частицами руды и теплоносителя получим в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} K_v \beta_i \rho_i v_i + \frac{\partial}{\partial x_k} K_{vv_k} \beta_i \rho_i v_i v_{ik} = \\ = K_M \beta_i \rho_i M_i + \frac{\partial}{\partial x_k} K_{\Pi} \beta_i \Pi_{ik} + K_R \frac{\beta_1}{V_1} R_{ji} \end{aligned} \quad (2)$$

где K_v , K_{vv_k} , K_M , K_{Π} , K_R — поправочные коэффициенты, учитывающие пульсирующие моменты в уравнении переноса импульсов; M_i — массовые силы частиц руды и атмосферного воздуха (теплоносителя соответственно), $\text{Н}/\text{кг}$; Π_{ik} — вектор поверхностных сил частиц руды и атмосферного воздуха (теплоносителя) в конечной точке, $\text{Н}/\text{м}^2$; V_1 — объем частиц руды, м^3 ; R_{ji} — вектор взаимного аэродинамического сопротивления падающих частиц руды и атмосферного воздуха (теплоносителя), Н .

Уравнение переноса энергии в процессе эжекции в загрузочном устройстве получим в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} K_g \beta_i \rho_i \frac{\vartheta_i}{2} + \frac{\partial}{\partial x_k} K_{g\vartheta_k} \beta_i \rho_i \frac{\vartheta_i}{2} \vartheta_{ik} = \\ = K_{Mg} \beta_i \rho_i M_i \vartheta_i + \frac{\partial}{\partial x_k} K_{\Pi g} \beta_i \Pi_{ik} \vartheta_i + \\ + K_{Rg} \frac{\beta_1}{V_1} R_{ji} \vartheta_i \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} K_v \beta_i \rho_i \frac{v_i}{2} + \frac{\partial}{\partial x_k} K_{vv_k} \beta_i \rho_i \frac{v_i}{2} v_{ik} = \\ = K_{Mv} \beta_i \rho_i M_i v_i + \frac{\partial}{\partial x_k} K_{\Pi v} \beta_i \Pi_{ik} v_i + \\ + K_{Rv} \frac{\beta_1}{V_1} R_{ji} v_i \end{aligned}$$

где K_{Mv} , $K_{\Pi v}$, K_{Rv} — поправочные коэффициенты, учитывающие пульсирующие моменты в уравнении переноса энергии.

Уравнение переноса тепловой энергии в процессе взаимодействия атмосферного воздуха частиц руды и теплоносителя в загрузочном устройстве получим в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} K_t \beta_i c_i \rho_i T_i + \frac{\partial}{\partial x_k} K_{Tv_k} \beta_i c_i \rho_i T_i v_{ik} = \\ = K_q \frac{\beta_1}{V_1} Q_{ji} \end{aligned} \quad (4)$$

где K_t , K_{Tv_k} , K_q — поправочные коэффициенты, учитывающие пульсирующие моменты в уравнении переноса тепловой энергии; c_i — теплоемкость частиц руды и атмосферного воздуха (теплоносителя), $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$; T_i — температура частиц руды и атмосферного воздуха (теплоносителя), К ; Q_{ji} — интенсивность теплообмена между атмосферным воздухом (теплоносителем) и частицами руды, $\text{Вт}/\text{м}^3$.

Система дифференциальных уравнений поступательного и вращательного движения частиц руды в процессе рас-

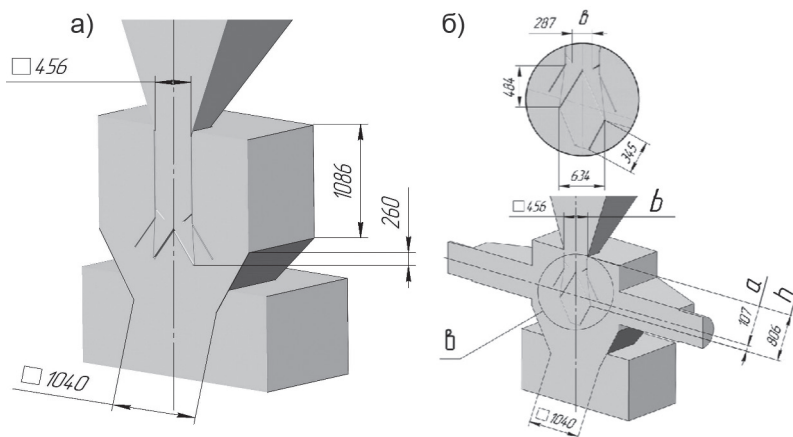


Рис. 2. Исходная (а) и оптимизированная (б) 3D-модели загрузочного устройства с коллектором подачи теплоносителя прямотока

Fig. 2. Initial (a); optimized (b) 3D models of the loading device with a direct-flow coolant supply manifold

чета обмена импульсами и энергией и определения эжекции атмосферного воздуха решалась путем численного интегрирования на базе векторного уравнения Лагранжа, связывающего координаты частицы в эйлерово-лагранжевой системе и скорости этих частиц [18, 19].

С учетом сказанного задача компьютерной оптимизации загрузочного уст-

ройства с коллектором теплоносителя прямотока в данной работе решена по критерию минимальной эжекции атмосферного воздуха, т.е. максимальной эффективности аэротермодинамических процессов сушки в двухфазной среде «хризотил-асбестовая руда — атмосферный воздух с теплоносителем», находящейся в гравитационном поле пада-

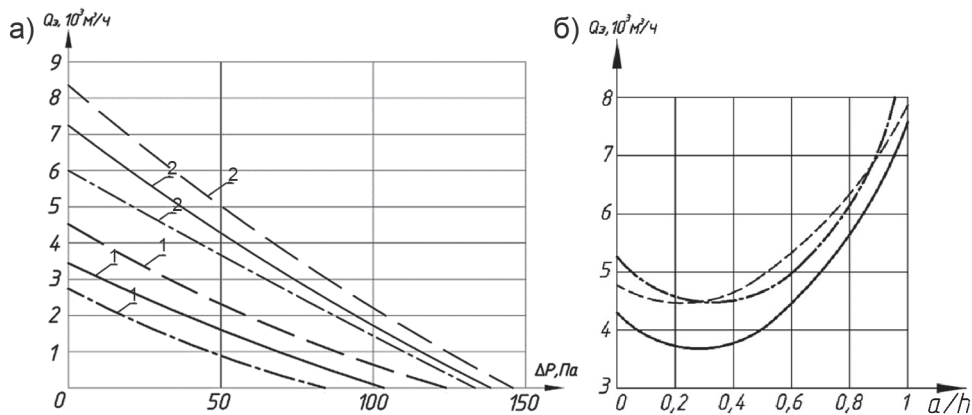


Рис. 3. Динамика изменения объема эжектируемого воздуха в зависимости: от депрессии (1, 2, ... — по итогам и до оптимизации соответственно; при — — — $t = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$; — — — $t = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$; - - - - $t = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) (а); от геометрических параметров при депрессии в корпусе загрузочного устройства ($\Delta P = 0\text{ Па}$; $t = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$; — — — $h/b = 2$; - - - - $h/b = 1,5$; — — — $h/b = 1,75$) (б)

Fig. 3. Dynamics of change in the volume of ejected air depending on: depression; 1, 2, ... — after and before optimization, respectively; at — — — $t = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$; — — — $t = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$; - - - - $t = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a); from the geometric parameters during depression in the body of the loading device ($\Delta P = 0\text{ Па}$; $t = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$; — — — $h/b = 2$; - - - - $h/b = 1,5$; — — — $h/b = 1,75$) (b)

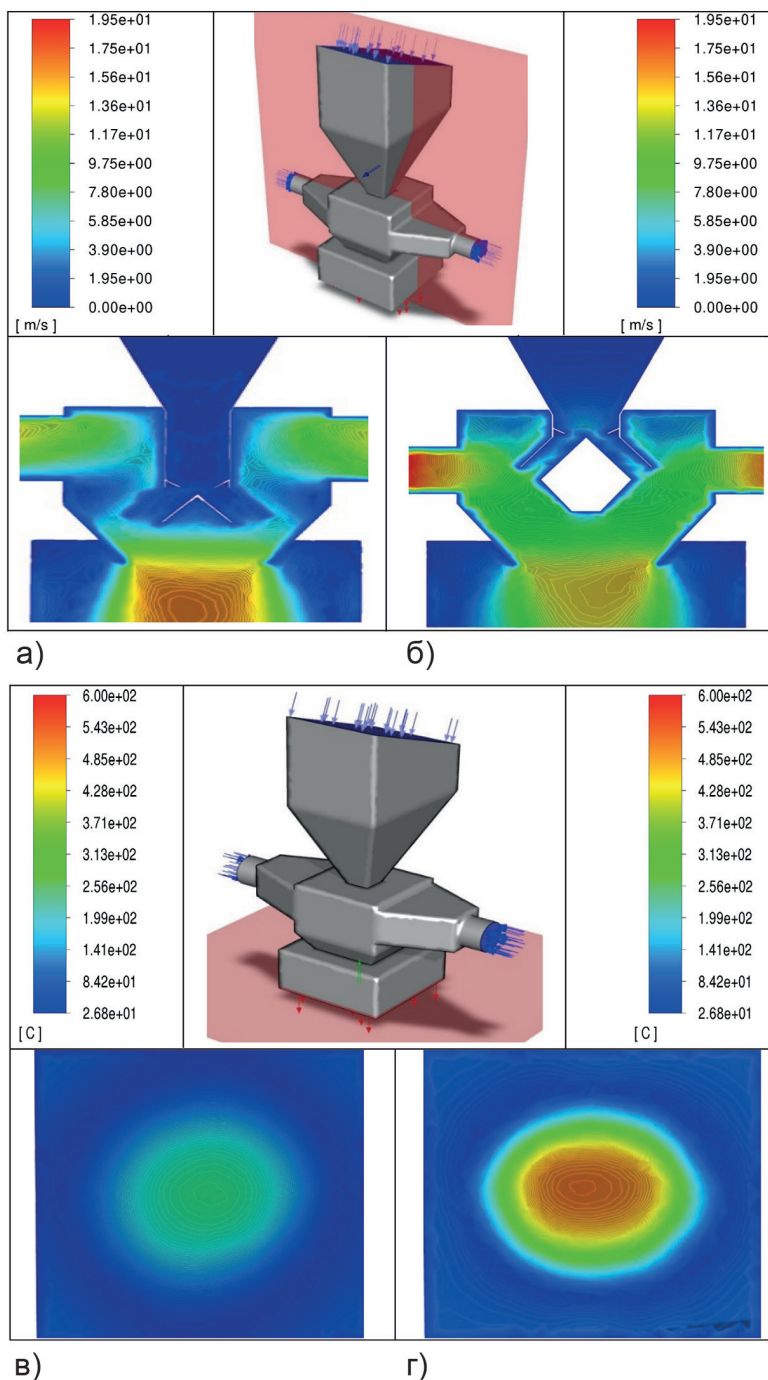


Рис. 4. Скорость и температура несущей фазы в загрузочном устройстве: до оптимизации; $Q_s = 8200 \text{ м}^3/\text{ч}$, $t = 190 \text{ °C}$ (а, в); после оптимизации $Q_s = 0 \text{ м}^3/\text{ч}$, $t = 190 \text{ °C}$ (б, г)

Fig. 4. Velocity and temperature of the carrier phase in the loading device: before optimization; $Q_s = 8200 \text{ м}^3/\text{ч}$, $t = 190 \text{ °C}$ (a, v); after optimization $Q_s = 0 \text{ м}^3/\text{ч}$, $t = 190 \text{ °C}$ (b, g)

ющих частиц минерального сырья с учетом переноса массы, импульса, энергии при фазовых преобразованиях, обусловленных высокой влажностью дисперсной фазы и существенными градиентами температур [20 – 22].

Обсуждение результата

Исходная и оптимизированная 3D-модель загрузочного устройства с коллектором подачи теплоносителя прямого тока приведена на рис. 2.

По итогам оптимизации топологии загрузочного устройства с коллектором подачи теплоносителя прямого тока построены зависимости изменения эжекции атмосферного воздуха от температуры теплоносителя t , депрессии в корпусе загрузочного устройства ΔP и его геометрических параметров (рис. 3).

Из анализа рис. 3 видно, что оптимизация геометрических параметров загрузочного устройства позволяет более чем в 2 раза снизить объемы эжектируемого воздуха. Кроме того, установлена ярко выраженная унимодальность, т.е. единственность оптимального соотношения геометрических параметров, при которых достигается минимальная эжекция атмосферного воздуха, как по относительной длине канала загрузочного устройства, так и по взаимному расположению коллектора теплоносителя прямого тока и выхода из загрузочного устройства. Установлено, что h/b (относительная длина канала загрузочного устройства) и a/h (относительное смещение коллектора подачи теплоносителя прямого тока от выхода из канала загрузочного устройства) оказывают наибольшее влияние на процесс эжекции атмосферного воздуха за счет действия гравитационных сил падающих частиц руды и аэротермодинамического затвора, формируемого динамическим давлением теплоносителя прямого тока на выходе из канала загрузочного устройства.

С помощью управления депрессией теплоносителя прямого тока в загрузочном устройстве при оптимальном соотношении его геометрических параметров в области 100 Па возможно практически исключить эжекцию атмосферного воздуха через загрузочное устройство в сушило печи и тем самым существенно повысить эффективность теплообменных процессов сушки минерального сырья.

На рис. 4 приведено итоговое распределение в загрузочном устройстве скорости и температуры атмосферного воздуха в гравитационном поле хризотил-асбестовой руды и теплоносителя прямого тока с учетом тепломассопереноса до и после компьютерной оптимизации.

Компьютерная оптимизация топологии загрузочного устройства ВШСП № 9 АО «Костанайские минералы» позволила снизить объем эжектируемого атмосферного воздуха с 9000 м³/ч, что составляло до 15% общего расхода теплоносителя, практически до нуля. Исключение поступления холодного атмосферного воздуха в загрузочное устройство печи повысило температуру теплоносителя прямого тока в сушиле печи с 190 °С до 350 °С, что способствовало существенному росту эффективности теплообменных процессов, ускорению влагоотделения в процессе сушки руды. При номинальной производительности ВШСП № 9 100 т/ч, расходе теплоносителя 58 000 м³/ч, начальной влажности руды 4,5% и конечной влажности концентрата 1,6% снижение расхода теплоносителя, т.е. природного газа, составило не менее 180 м³/ч, т.е. до 28%. Кроме того, устранение эжекции атмосферного воздуха, снизившее фактический расход теплоносителя при сохранении его тепловой мощности, дополнительно способствовало снижению расхода электроэнергии, потребляемой дымососом, не менее чем на 20 кВт, т.е. на 15%.

Заключение

Повышение конкурентоспособности предприятий горно-металлургического комплекса актуализирует задачу увеличения эффективности технологических процессов подготовки исходного минерального сырья. Перспективным направлением исследования путей снижения расхода теплоносителя и повышения эффективности процесса сушки является компьютерная оптимизация распределения исходного материала в загрузочном устройстве, его геометрических параметров, аэротермодинамических процессов взаимодействия частиц исходного материала с атмосферным воздухом и теплоносителем, обеспечивающих формирование требуемой структуры на входе в печь и устранение эжекционных процессов.

Предложена методика компьютерной оптимизации аэротермодинамических процессов эжекции в двухфазных средах загрузочных устройств сушильных печей с учетом переноса массы, импульса, энергии при фазовых преобразованиях, обусловленных высокой влажностью частиц минерального сырья, существенными градиентами температур атмосферного воздуха и теплоносителя на базе эйлерово-лагранжевого подхо-

да, реализованного в ANSYS Fluent в виде модели дискретной фазы Discrete Phase Model.

Компьютерная оптимизация топологии загрузочного устройства ВШСП № 9 АО «Костанайские минералы» позволила снизить объем эжектируемого атмосферного воздуха с 9000 м³/ч, что составляло до 15% общего расхода теплоносителя, практически до нуля, повысить температуру теплоносителя прямого тока в сушиле печи с 190 °С до 350 °С, способствуя существенному росту эффективности теплообменных процессов и ускорению процесса сушки руды. При номинальной производительности ВШСП № 9100 т/ч, расходе теплоносителя 58 000 м³/ч, начальной влажности руды 4,5% и конечной влажности концентрата 1,6% снижение расхода теплоносителя составило не менее 180 м³/ч, т.е. до 28%, электроэнергии — не менее 20 кВт, т.е. до 15%.

Авторы выражают признательность руководству АО «Костанайские минералы» (Республика Казахстан) за помощь в организации и проведении промышленных испытаний вентиляторного комплекса пневмосистемы аспирации и обогащения хризотил-асбеста цеха обогащения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нурхожаев Е. С., Макаров Н. В., Ахметов Р. Г., Баладин В. Н., Макаров В. Н., Новицкий М. В., Бочаров З. В., Алексеев М. А. Патент № 2837809 РФ, МКИ F 04 D 17/08. Способ сушки сыпучих материалов, повышения экологической эффективности шахтных печей и устройство для ее осуществления. Заявл. 04. 07.2024, опублик. в П.И. 04.04.2025 г. № 10.
2. Макаров В. Н., Ахметов Р. Г., Давыдов С. Я., Макаров Н. В. Исследования и моделирование экологической эффективности вертикальных шахтных печей сушки огнеупорных и строительных материалов // Новые огнеупоры. — 2023. — № 7. — С. 52 — 59.
3. Иванов А. Н. Методологические положения формирования и оценки экономического ущерба // Известия УГГУ. — 2019. — № 3(55). — С. 157 — 161. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-3-157-161.
4. 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 — 83.
5. Батухтин А. Г., Батухтин С. Г., Якубович А. И., Кузнецова Н. С. Анализ эффективности теплосъема поверхностей нагрева // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2023. — Т. 29. — № 4. — С. 65 — 72.

6. Han H., Wang P., Liu R. Experimental study on the atomization characteristics and dust reduction efficiency of four common types of pressure nozzles in underground coal mines // *International Journal of Coal Science & Technology*. 2020, vol. 7, no. 2, pp. 581 – 596. DOI: 10.1007/s40789-02000329-w.
7. Аверкова О. И., Логачев И. Н., Логачев К. И. Аэродинамика противопылевой вентиляции. — М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2019. — 432 с.
8. Shivani Kaustubh Chitale, Pranjal Nitin Jadhav, Snehal Suresh Dhoble, Dr. Mr. Satyajeet Deshmuk Parameters affecting efficiency of centrifugal pump. A review. *IJSRST*, 2021, pp. 49 – 58.
9. Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В. Основы работы в ANSYS 17. — М.: ДМК Пресс, 2017. — 210 с.
10. Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Захарова Ю. В. Моделирование гидрогазодинамических процессов ПК ANSYS 17.0. — Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2016. — 168 с.
11. Макаров В. Н., Ахметов Р. Г., Макаров Н. В., Бельских А. М. Повышение экологической эффективности вертикальных шахтных печей сушки рудных материалов // *Транспортное, горное и строительное машиностроение, наука и производство*. — 2023. — № 19. — С. 122 – 128.
12. 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*. 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42 – 51. DOI: 10.7166/32-3-2616.
13. Бойков А. В., Савельев Р. В., Пайор В. А. Применение численного моделирования в горно-металлургической области / Научные конференции ГНИИ «Нацразвитие»: Сборник избранных статей. — СПб.: Нацразвитие, 2019. — С. 31 – 34.
14. Zhang H., Han W., Xu Y., Wang Z. Analysis on the development status of coal mine dust disaster prevention technology in China // *Journal of Healthcare Engineer*. 2021, vol. 2021, article 5574579. DOI: 10.1155/2021/5574579.
15. 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 / *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems: Proceedings of the ICOECS 2019*. 2019, article 8949928. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949928.
16. Нурхожаев Е. С., Макаров В. Н., Ахметов Р. Г., Шакирзянова А. Ф. Методика определения экологической эффективности вертикальных шахтных сушильных печей и пути ее повышения // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. — 2024. — № 4. — С. 525 – 532. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-525-526.
17. Zhou S., Lin P., Zhang W., Zhu Z. Evolution characteristics of separated vortices and near-wall flow in a centrifugal impeller in an off-designed condition // *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, no. 22, pp. 1 – 17. DOI: 10.3390/app 10228209.
18. 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 // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1399, no. 3, article 033010. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/3/033010.
19. Kychkin A., Nikolaev A. IOT-based mine ventilation control system architecture with digital twin / *International Conference on Industrial Engineering. Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020*, New York: IEEE, 2020, article 9111995.
20. Васенин И. М., Крайнов А. Ю., Исaiченков А. Б. Математическое моделирование сушки угольных частиц в потоке газа // *Компьютерные исследования и моделирование*. — 2012. — Т. 4. — № 2. — С. 357 – 367.
21. Киреев В. М., Минко В. А., Гольцов А. Б., Болгов А. И. Рециркуляционные энергоэффективные системы аспирации с использованием эффекта Коанда // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. — 2019. — № 12. — С. 57 – 62. DOI: 10.12737/article_5c1c995c7f4e35.90271716.
22. Yang S., Nie W., Lv S., Liu Z., Peng H., Ma X., Cai P., Xu C. Effects of spraying pressure and installation angle of nozzles on atomization characteristics of external spraying system at a fully mechanized mining face // *Powder Technology*. 2019, vol. 343, pp. 754 – 764. **PLAS**

REFERENCES

1. Nurkhodzhaev E. S., Makarov N. V., Akhmetov R. G., Baladin V. N., Makarov V. N., Novitsky M. V., Bocharov Z. V., Alekseev M. A. *Patent RU 2837809, IPC F 04 D 17/08*, 04.04.2025. [In Russ].

2. Makarov V. N., Akhmetov R. G., Davydov S. Ya., Makarov N. V. Research and modeling of the environmental efficiency of vertical shaft furnaces for drying refractory and building materials. *Novie ognepory*. 2023, no. 7, pp. 52 – 59. [In Russ].
3. Ivanov A. N. Methodological provisions for the formation and assessment of economic damage. *News of the Ural State Mining University*. 2019, no. 3(55), pp. 157 – 161. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-3-157-161.
4. Yuryev B. P., Goltsev V. A., Maltsev V. A., Savin V. A. Drying of chrysotile ore in vertical shaft-type apparatus. *Construction materials*. 2016, no. 8, pp. 80 – 83. [In Russ].
5. Batukhtin A. G., Batukhtin S. G., Yakubovich A. I., Kuznetsova N. S. Analysis of the heat removal efficiency of heating surfaces. *Transbaikalian state university journal*. 2023, vol. 29, no. 4, pp. 65 – 72. [In Russ].
6. Han H., Wang P., Liu R. Experimental study on the atomization characteristics and dust reduction efficiency of four common types of pressure nozzles in underground coal mines. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2020, vol. 7, no. 2, pp. 581 – 596. DOI: 10.1007/s40789-02000329-w.
7. Averkova O. I., Logachev I. N., Logachev K. I. *Aerodinamika protivopylevoy ventilyatsii* [Aerodynamics of dust ventilation], Moscow, LAP Lambert Academic Publishing, 2019. 432 c.
8. Shivani Kaustubh Chitale, Pranjal Nitin Jadhav, Snehal Suresh Dhoble, Dr. Mr. Satyajeet Deshmuk *Parameters affecting efficiency of centrifugal pump. A review*. IJSRST, 2021, pp. 49 – 58.
9. Fedorova N. N., Val'ger S. A., Danilov M. N., Zakharova Yu. V. *Osnovy raboty v ANSYS 17* [Basics of Working in ANSYS 17], Moscow, DMK Press, 2017, 210 p.
10. Fedorova N. N., Val'ger S. A., Zakharova Yu. V. *Modelirovanie gidrogazodinamicheskikh protsessov PK ANSYS 17.0* [Modeling of hydrogas-dynamic processes in ANSYS 17.0], Novosibirsk, NGASU (Sibstrin), 2016, 168 p.
11. Makarov V. N., Akhmetov R. G., Makarov N. V., Bel'skikh A. M. Improving the environmental efficiency of vertical shaft kilns for drying ore materials. *Transport, Mining and Construction Engineering, Science and Production*. 2023, no. 19, pp. 122 – 128. [In Russ].
12. 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*. 2021, vol. 32, no. 3, pp. 42 – 51. DOI: 10.7166/32-3-2616.
13. Boykov A. V., Saveliev R. V., Payor V. A. Application of numerical modeling in the mining and metallurgical field. *Nauchnye konferentsii GNII «Natsrazvitie»: Sbornik izbrannykh statey* [Scientific conferences of the State Research Institute «NatSrazvitie»: Collection of selected articles], Saint-Petersburg, Natsrazvitie, 2019, pp. 31 – 34.
14. Zhang H., Han W., Xu Y., Wang Z. Analysis on the development status of coal mine dust disaster prevention technology in China. *Journal of Healthcare Engineer*. 2021, vol. 2021, article 5574579. DOI: 10.1155/2021/5574579.
15. 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. *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems: Proceedings of the ICOECS 2019*. 2019, article 8949928. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949928.
16. Nurkhozhaev E. S., Makarov V. N., Akhmetov R. G., Shakirzyanova A. F. Methodology for determining the environmental efficiency of vertical shaft drying kilns and ways to improve it. *News of the Tula state university. Technical sciences*. 2024, no. 4, pp. 525 – 532. [In Russ]. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-525-526.
17. Zhou S., Lin P., Zhang W., Zhu Z. Evolution characteristics of separated vortices and near-wall flow in a centrifugal impeller in an off-designed condition. *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, no. 22, pp. 1 – 17. DOI: 10.3390/app 10228209.
18. 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. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1399, no. 3, article 033010. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/3/033010.
19. Kychkin A., Nikolaev A. IOT-based mine ventilation control system architecture with digital twin. *International Conference on Industrial Engineering. Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020*, New York: IEEE, 2020, article 9111995.
20. Vasenin I. M., Krainov A. Yu., Isaichenkov A. B. Mathematical modeling of drying coal particles in a gas flow. *Computer research and modeling*. 2012, vol. 4, no. 2, pp. 357 – 367. [In Russ].

21. Kireev V. M., Minko V. A., Goltsov A. B., Bolgov A. I. Recirculation energy-efficient aspiration systems using the Coanda effect. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019, no. 12, pp. 57–62. [In Russ]. DOI: 10.12737/article_5c1c995c7f4e35.90271716.

22. Yang S., Nie W., Lv S., Liu Z., Peng H., Ma X., Cai P., Xu C. Effects of spraying pressure and installation angle of nozzles on atomization characteristics of external spraying system at a fullymechanized mining face. *Powder Technology*. 2019, vol. 343, pp. 754–764.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нурхожаев Ербол Сапарбаевич — председатель правления, АО «Костанайские Минералы», Житикара, Республика Казахстан, e-mail: nm_ekb@mail.ru,
Зотов Василий Владимирович — канд. техн. наук, зав. кафедрой, НИТУ МИСИС, e-mail: zotov@misis.ru,
Макаров Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, Уральский государственный горный университет, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3785-5569,
Макаров Николай Владимирович — канд. техн. наук, доцент, директор, ООО «Вентиляция Экология Безопасность», e-mail: mnikolay84@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7039-6272.
Для контактов: Макаров Н.В. e-mail: mnikolay84@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.S. Nurkhozaev, Chairman of the Board, Kostanay Minerals JSC, Zhitikara, Republic of Kazakhstan, e-mail: nm_ekb@mail.ru,
V.V. Zotov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Chair, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: zotov@misis.ru,
V.N. Makarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: uk.intelnedra@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3785-5569,
N.V. Makarov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Director, Ventilation Ecology Safety LLC, Ekaterinburg, Russia, e-mail: mnikolay84@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7039-6272.
Corresponding author: N.V. Makarov, e-mail: mnikolay84@mail.ru.

Получена редакцией 13.02.2026; получена после рецензии 01.05.2026; принята к печати 10.09.2026.
Received by the editors 13.02.2026; received after the review 01.05.2026; accepted for printing 10.09.2026.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ
(специальный выпуск), смотри на www.gornaya-kniga.ru

БЕСПИЛОТНАЯ СИСТЕМА ПРОЕКЦИРОВАНИЯ ПРОЕКТНЫХ КООРДИНАТ
НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ: АРХИТЕКТУРА И ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТИ
(2026, № 4, СБ 15, 20 с.)

Кулешов Артем Михайлович — аспирант, НИТУ МИСИС, e-mail: Artemon110998@yandex.ru,
Тухель Екатерина Андреевна — канд. техн. наук, доцент, НИТУ МИСИС, e-mail: tukhel71@mail.ru,
Ерхан Евгений Вячеславович — генеральный директор, ООО «Морфинг Технолджис», e-mail: eugerhan@gmail.com.

UNMANNED PROJECTION SYSTEM FOR OPEN-PIT MINING: ARCHITECTURE AND SOURCES OF ERROR

A.M. Kuleshov, Graduate Student, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: Artemon110998@yandex.ru,
E.A. Tukhel, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: tukhel71@mail.ru,
E.V. Erkhan, General Director, Morphing Technologies LLC, 121205, Moscow, Russia, e-mail: eugerhan@gmail.com.