УДК 621.1.016 DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-29-36

Критериальное уравнение энергетической эффективности печей сушки минерального сырья для горнообогатительных предприятий

Нурхожаев Е. С.[1], Макаров В. Н.[2], Попов С. А.[2]*, Дылдин Г. П.[2]
[1] АО «Костанайские минералы», г. Житикара, Казахстан
[2] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: popov.semyun@bk.ru

Реферат

Целью исследования *является разработка критериального уравнения энергетической эффективности процесса сушки минерального сырья, связывающего критерии подобия аэротермодинамических процессов в сушиле печи с эффективностью использования теплоносителя.*

Методология исследований *основана на использовании эйлерово-лагранжевой модели аэротермодинамики двухфазных сред, критерия энергетической эффективности, теории Веникова, теоремы Кирпичева–Гухмана и гипотезе о доминантном влиянии угловой скорости вращения частиц руды на процесс конвективного теплообмена.*

Результаты. *Проанализирована функциональная связь критериев подобия процессов вихревой сепарации частиц пыли в сушиле с факторами их силового и энергетического взаимодействия с теплоносителем в двухфазной среде. Сделан вывод об их влиянии на энергетическую эффективность печей сушки минералов.*

Выводы. *На базе гипотезы о доминантном влиянии циркуляции скорости теплоносителя получены критерии подобия процесса вихревой сепарации в сушильных печах, а также критериальное уравнение энергетической эффективности печей сушки для горнообогатительных предприятий. Модернизация вертикальных шахтных сушильных печей в цехе дробления и сушки хризотила АО «Костанайские минералы», проведенная на базе предложенной математической модели критериального уравнения и оптимизации геометрических и кинематических параметров, позволила повысить удельное влагоотделение с 4,6 до 8,5 кг/м³ и снизить расход газа более чем на 40 %.*

Ключевые слова: *математическая модель; критерии подобия; энергетическая эффективность; сушильная печь; конвективный теплообмен.*

Введение. Недостаточная энергоэффективность печей сушки минерального сырья повышает себестоимость продукции горнообогатительных предприятий более чем на 15 %. Энергоемкость ВВП Российской Федерации в полтора раза отстает от среднемировых показателей [1, 2]. Перспективное направление – совершенствование печей на базе энергетической эффективности тепломассообменных процессов, что требует определения соответствующих критериев подобия [3, 4]. Анализ исследований показывает, что в них не рассматривается влияние циркуляции скорости теплоносителя. Приведенные в статье исследования базируются на предложенной гипотезе о доминантном влиянии циркуляции скорости теплоносителя на эффективность теплообменных процессов [5, 6].

Методология исследований основана на использовании эйлерово-лагранжевой модели аэротермодинамики двухфазных сред, критерия энергетической эффективности, теории Веникова, теоремы Кирпичева–Гухмана и гипотезе о доминантном влиянии угловой скорости вращения.

Результаты – математическое моделирование. В качестве критерия фракционной энергетической эффективности тепломассообменного оборудования примем отношение интенсивности конвективного теплообмена к аэродинамическим потерям теплоносителя в виде:

$$K_{эi} = \frac{Nu_i}{Eu_т},$$

где Nu_i, $Eu_т$ – критерий Нуссельта в двухфазной среде и критерий Эйлера с учетом циркуляции скорости теплоносителя, инициированной вращением частиц руды i-й фракции, соответственно.

Воспользуемся эйлерово-лагранжевой математической моделью в форме дифференциальных уравнений в векторном виде, включающих их вращательное движение вокруг центра масс [7–9]:

$$\begin{cases} \rho_т \dfrac{V_т}{dt} = \rho_т g - grad\left(p\right) + V_т \nabla^2 V_i; \\ \dfrac{dl_т}{dt} = V_т; \\ m_i \dfrac{dV_i}{dt} = g\left(m_i - m_{0i}\right) - \xi_i S_i \rho_i \left(V_T - V_i\right)\dfrac{V_i}{2} + \varepsilon m_{0i}\dfrac{dV_i}{dt}; \\ \dfrac{dl_i}{dt} = V_i; \\ J_i \dfrac{d\omega_i}{dt} = \xi_{вi} \times \dfrac{\rho_т}{64} \times d_i^5 \Omega_i. \end{cases} \quad (1)$$

где $\rho_т$ – плотность теплоносителя; $V_т$, V_i – средние скорости несущей среды и i-й частицы, соответственно; t – время; g – ускорение силы тяжести; p – давление; ∇ – оператор Гамильтона; $l_т$, l_i – длины линии тока теплоносителя и i-й частицы, соответственно; m_i – масса i-й частицы; m_{0i} – масса объема теплоносителя, занятого i-й частицей; ξ_i – коэффициент сопротивления сепарации i-й частицы; ε – коэффициент присоединенной массы; S_i, ρ_i, d_i – миделево сечение, плотность и диаметр i-й частицы, соответственно; J_i – момент инерции i-й частицы; ω_i – угловая скорость i-й частицы; $\xi_{вi}$ – коэффициент сопротивления вращению i-й частицы; Ω_i – относительная угловая скорость частиц.

На основе π-теоремы и анализа размерностей [10] выделена совокупность из 17 независимых параметров:

– геометрические и временной параметры d_i, τ – время релаксации частицы;

– кинематические параметры ω_i, V_{0i}, $\sqrt{\Delta V_{0i} + \omega_i^2 d_i^2}$, $dV/dt\,\Delta V$;

– динамические параметры $\rho_т$, g, ν_i – кинематическая вязкость, $(\rho_i - \rho_т)$;

– макроскопические параметры ΔT – разность температур, $T_с$ – средняя температура, β – коэффициент теплопередачи, λ – теплопроводность теплоносителя, λ_p – теплопроводность частицы, C_p – удельная теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении.

Запишем в форме степенной функции критериальное уравнение, связывающее независимые параметры, которые определяют движения частиц руды по криволинейным траекториям в поле теплоносителя и формируют энергетическое

взаимодействие теплоносителя и частиц руды с критериями подобия, представим в виде безразмерной степенной зависимости [11–13]:

$$K_{эi} = Kd_i^{а}\nu^{б}p_{Т}^{в}\left(\rho_i - \rho_т\right)^{г} g^{д}V_{0i}^{е}\omega_i^{ж}\Delta V^{3}\sqrt{\Delta V_{0i} + \omega_i^2 d_i^2}^{и}\frac{dV^{к}}{dt}\Delta T^{л}T_{с}^{м}\lambda^{н}C_p^{п}\beta^{р}\tau^{с}\lambda_p^{\tau}, \quad (2)$$

где K – коэффициент пропорциональности.

Для построения матрицы показателей степеней независимых параметров в критериальном уравнении (2) воспользуемся показателями степеней базовых размерностей, используемых в системе уравнений (1) и матрице размерностей, построенной согласно типовой методике [10–14].

Таблица 1. Матрица индикаторов подобия
Table 1. Similarity indicator matrix

Индикатор подобия	d_i	ν	$\rho_т$	$(\rho_i - \rho_т)$	C_p	g	V_{0i}	ω_i	ΔV	$\sqrt{\Delta V_{0i} + \omega_i^2 d_i^2}$	dV/dt	ΔT	$T_с$	λ	β	τ	λ_p
U_1	1	–1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
U_2	–1	0	0	0	0	–1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
U_3	+3	–2	–1	+1	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U_4	–1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0
U_5	+1	0	0	0	0	0	0	0	–2	0	+1	0	0	0	0	0	0
U_6	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–1	+1	0	0
U_7	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–1	0	0	–1
U_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	–1	0	0	0	0
U_9	0	+1	+1	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	–1	0	0	0
U_{10}	0	0	–1	0	–1	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0	0	0
U_{11}	+1	0	0	0	0	0	–1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U_{12}	–1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0
U_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	–1	+1	0	0	0	0	0	0	0

Систему уравнений, определяющих показатели степеней независимых параметров в критериальном уравнении (2), с учетом табл. 1 и независимых параметров получим в виде:

$$\begin{cases} а + 2б - 3в - 3г + д + е + ж + и + м + 2н + с = 0; \\ в + 2 + м + п + с = 0; \\ -б - 2д + е - ж - з - 2и - 3м - 2н - 3п - р - 3с = 0; \\ к + л - м - и - п - с = 0. \end{cases}$$

Матрица индикаторов подобия приведена в табл. 1, в соответствии с ней построим индикаторы подобия:

$$U_{1i} = Re_i = \frac{d_i\sqrt{\Delta V_i^2 + \omega_i^2 d_i^2}}{\nu}; \quad U_{2i} = Fr_i = \frac{\Delta V_i^2}{gd_i}; \quad U_{3i} = Ar_i = \frac{d_i^3 g\left(\rho - \rho_т\right)}{\rho T\nu^2};$$

$$U_{4i} = St_i = \frac{\tau_i V_0}{d_i}; \quad U_{5i} = Eu_i = \frac{d\dfrac{\partial V}{\partial t}}{\Delta V^2}; \quad U_{6i} = Nu_i = \frac{d_i\beta}{\lambda}; \quad U_{7i} = Bi_i = \frac{d_i\beta}{\lambda_p};$$

$$U_{8i} = Gu_i = \frac{\Delta T_i}{T_c}; \quad U_{9i} = Pr_i = \frac{\nu p_т C_p}{\lambda}; \quad U_{10i} = \alpha = \frac{\lambda}{C_p \rho_т}; \quad U_{11i} = K_\omega = \frac{d_i \omega_i}{V_{0i}};$$

$$U_{12i} = H_{0i} = \frac{\tau_i V_{0i}}{d_i}; \quad U_{13i} = K_{Vi} = \frac{\sqrt{\Delta V_i^2 + \omega_i^2 d_i^2}}{\Delta V_i},$$

где Re_i – Рейнольдс; Fr_i – Фруд; Ar_i – Архимед; St_i – Стокс; Bi_i – Био; Gu_i – Гухман; Pr_i – Прандтль; H_0 – критерий гомохромности; K_ω, K_V, α – кинематические и термодинамический симплексы.

Определяющими критериями подобия аэротермодинамических процессов являются 8 критериев, 2 кинематических симплекса и 1 термодинамический симплекс, включающие дополнительно 8 индикаторов подобия [15].

В целях упрощения критериального уравнения рассмотрим процесс сушки одной фракции сырья для частиц медианным диаметром d, при постоянном расходе теплоносителя уравнение (3) примет вид:

$$\frac{Nu}{Eu} = Re_{\omega i}^{\alpha} Pr_{\omega i}^{\beta} Gu^{\gamma} K_{\omega i}^{\delta} K_{Vi}^{\zeta}. \tag{3}$$

Из уравнения (3) видно, что увеличение критериев *Re* и *Pr* за счет циркуляции скорости теплоносителя увеличивает энергоэффективность процесса сушки. Следует заметить, что кинематический симплекс K_ω, являясь критерием гомохромности, показывает необходимость исключения резких изменений угловой скорости вращения, что будет способствовать естественному ухудшению тепломассообмена.

В целях верификации математической модели критерия энергетической эффективности процессов разработана экспериментальная установка и проведены исследования, а также расчеты с использованием инженерного компьютерного анализа аэротермодинамических процессов в сушиле печи [15].

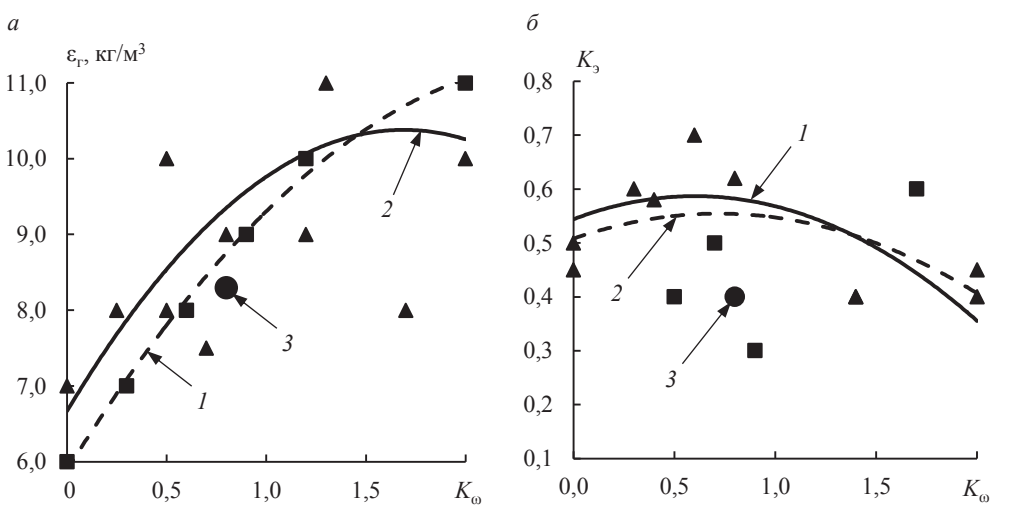

Рисунок 1. Зависимости $\varepsilon_г$ – *а* и $K_э$ – *б* (расход газа – 3150 м³/ч, производительность – 33,3 кг/с): *1* – эксперимент; *2* – ПО Ansys Fluent; *3* – вертикальная шахтная сушильная печь ВШСП № 9 АО «Костанайские минералы»

Figure 1. Plots $\varepsilon_г$ – *а* and $K_э$ – *б* (gas consumption is 3150 m³/h, throughput is 33.3 kg/s): *1* – experiment; *2* – Ansys Fluent; *3* – vertical shaft drying kiln VShSP No. 9 of JSC Kostanay Minerals

Приведенные на рис. 1 экспериментальные и расчетные зависимости отношения массы влагоотделения на единицу расхода газа $\varepsilon_г$ и критерия энергетической эффективности сушильной печи $K_э$ от симплекса циркуляции скорости теплоносителя $K_ω$ показывают, что эта функция унимодальна, имеет выраженный максимум. При этом эффективность влагоотделения в расчете на единицу расхода газа представляет собой монотонно возрастающую функцию от циркуляции скорости теплоносителя.

Приведенные на рис. 2 изолинии показывают, что рост градиента температур ΔT требует увеличения расхода газа. При Gu_i, равном константе, существует два значения энергоэффективности.

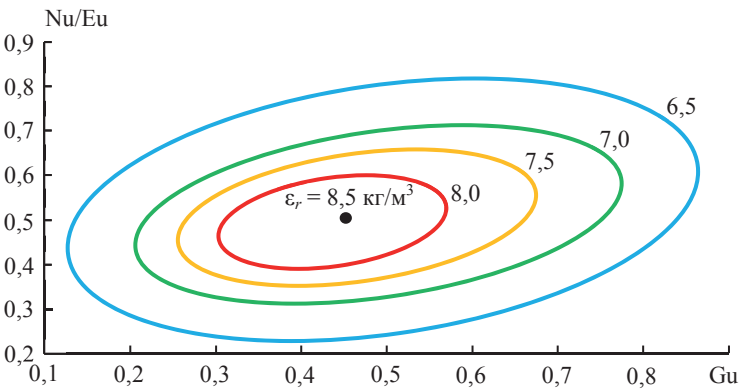

Рисунок 2. Изолинии удельного влагоотделения в сушильной печи в зависимости от критериев Нуссельта, Эйлера и Гухмана

Figure 2. Contour lines of specific moisture separation in a drying kiln as a function of the Nusselt, Euler and Gukhman criteria

Анализ и обсуждение. Полученные результаты подтверждают, что увеличение *Re* и *Pr* за счет циркуляции скорости теплоносителя, инициированной вращением частиц, повышает энергоэффективность сушки и снижает расход тепловой энергии. Критерий гомохронности указывает на необходимость исключения знакопеременных значений угловой скорости.

Выводы. На базе гипотезы о доминантном влиянии циркуляции скорости теплоносителя получены критерии подобия и критериальное уравнение энергетической эффективности печей сушки минерального сырья.

Управление угловой скоростью вращения частиц руды, влияющей на величину циркуляции скорости теплоносителя, повышает эффективность конвективного тепломассообмена, изменяя критерии *Pr*, *Gu*, *Re*, *Nu*.

Модернизация шахтных печей АО «Костанайские минералы» на базе предложенной модели повысила удельное влагоотделение с 4,6 до 8,5 кг/м^3, снизив расход газа более чем на 40 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевцов А. А., Дранников А. В., Ткач В. В., Сердюкова Н. А. Резервы энергоэффективности конвективной сушки дисперсных материалов при переменных режимах // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2017. № 79(2). С. 17–23. DOI: 10.20914/2310-1202-2017-2-17-23

2. Антонов В. Н. Формирование благоприятного экологического имиджа территорий // Стратегия современного научно-технологического развития: проблемы и перспективы реализации: сб. статей IV Всероссийской научно-практической конференции, Петрозаводск, 25 января 2022 г. Петрозаводск: Новая Наука, 2022. С. 89–93.

3. Афанасьев А. И., Кузнецов А. М., Потапов В. Я., Потапов В. В., Чиркова А. А. Математическая модель фрикционно-воздушного сепаратора // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2026. № 2. С. 40–48. DOI: 10.21440/0536-1028-2026-2-40-48

4. Roghanchi P., C. Kocsis K. Quantifying the thermal damping effect in underground vertical shafts using the nonlinear autoregressive with external input (NARX) algorithm // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29(2). No. 2. P. 255–262.

5. Угольников А. В., Нурхожаев Е. С., Макаров В. Н., Макаров Н. В. Повышение эффективности пылеулавливания тепломассообменного оборудования для горнометаллургического производства // ГИАБ. 2025. № 12-2. С. 98–111. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_98

6. 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(3). P. 45–51. DOI: 10.7166/32-3-2616

7. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю., Рыбичев А. А. Алгоритмы принятия решений по снижению аэрологических рисков в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. 2025. Т. 17. № 2. С. 688–700. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-688-700

8. Han Han, Pengfei Wang, Ronghua Liu, Chang Tian. Experimental study on atomization characteristics and dust-reduction performance of four common types of pressure nozzles in underground coal mines // International Journal of Coal Science and Technology. 2020. Vol. 7(3). P. 581–596. DOI: 10.1007/s40789-020-00329-w

9. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Шамраева М. А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство. М.: URSS, 2024. 272 с.

10. Фирсов А. Н., Журавская А. О методах теории подобия и размерности // Системный анализ в проектировании и управлении: сб. науч. тр. XXIV Междунар. науч. и уч.-практ. конф., в 3 ч., Санкт-Петербург, 13–14 октября 2020 года. Ч. 2. СПб: Политех-Пресс, 2020. С. 121–131. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id20-159

11. Shivani Kaustubh Chitale, Pranjal Nitin Jadhav, Snehal Suresh Dhoble, Satyajeet Deshmukh. Parameters affecting efficiency of centrifugal pump – a review // International Journal of Scientific Research in Science and Technology. 2021. No 8. P. 49–58. DOI: 10.32628/IJSRST218573

12. Mirsharipov R. H, Akhunbaev A. A. Research of hydrodynamic parameters of drum dryer // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2020. Vol. 7(11). P. 34–38.

13. Koul P. Design and optimization of ventilation systems for deep underground mines // Podzemni radovi. 2025. No. 47. P. 1–44.

14. Kychkin A., Nikolaev A. IoT-based mine ventilation control system architecture with digital twin // Proceedings 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 may 2020. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. Art. 9111995. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111995

15. Способ сушки сыпучих материалов, повышения экологической эффективности шахтных печей и устройство для его осуществления: пат. 2837809 C1 Рос. Федерация, МПК F26B 3/06, F26B 17/12.; заявл. 04.07.2024: опубл. 04.04.2025. Бюл. № 10. 11 с.

Поступила в редакцию 28 мая 2026 года

Сведения об авторах:

Нурхожаев Ербол Сапарбаевич – председатель правления АО «Костанайские минералы». E-mail: rus.akhmetov@mail.ru

Макаров Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горной механики Уральского государственного горного университета. E-mail: ur.intelnedra@mail.com; https://orcid.org/0000-0002-3785-5569

Попов Семен Анатольевич – аспирант Уральского государственного горного университета. E-mail: popov.semyun@bk.ru; https://orcid.org/0009-0004-3771-571X

Дылдин Герман Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры горной механики Уральского государственного горного университета. E-mail: german.dyldin@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-7106-4816

DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-29-36

A criterion equation for the energy efficiency of mineral raw material drying kilns for mining and processing plants

Erbol S. Nurkhozhaev[1], Vladimir N. Makarov[2], Semen A. Popov[2], German P. Dyldin[2]
[1] JSC Kostanay Minerals, Zhitikara city, Kazakhstan.
[2] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

The research objective *is to develop a criterion equation for the energy efficiency of mineral raw material drying that connects the similarity criteria of the aerothermodynamic processes in the kiln dryer with the efficiency of heat transfer fluid utilization.*

The methods of research *are based on the Euler–Lagrange model for two-phase media aerothermodynamics, the energy efficiency criterion, Venikov's theory, the Kirpichev–Gukhman theorem, and the hypothesis regarding the dominant influence of an ore particle's angular velocity on the convective heat transfer.*

Results. *The functional connection between the similarity criteria for vortex separation of dust particles in a dryer and the factors governing their force and energy interactions in a two-phase medium with a heat transfer fluid has been analyzed. It was revealed that these factors influence the energy efficiency of mineral drying kilns.*

Conclusions. *Based on the hypothesis that the circulation of the heat transfer fluid has a dominant influence, similarity criteria for the vortex separation process in drying kilns have been derived. A criterion equation for the energy efficiency of mineral raw material drying kilns for mining and processing plants has been derived. The vertical shaft drying kilns in the chrysotile crushing and drying shop of JSC Kostanay Minerals were modernized based on the proposed mathematical model of the criterion equation and on geometric and kinematic parameters optimization, making it possible to increase specific moisture separation from 4.6 to 8.5 kg/m³ and reduce gas consumption by more than 40%.*

Keywords: *mathematical model; similarity criteria; energy efficiency; drying kiln; convective heat transfer.*

REFERENCES

1. Shevtsov A. A., Drannikov A. V., Tkach V. V., Serdiukova N. A. Energy efficiency reserves convective drying dispersed materials under variable conditions. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii = Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies.* 2017; 79(2): 17–23. (In Russ.) DOI: 10.20914/2310-1202-2017-2-17-23

2. Antonov V. N. Formation of a favorable environmental image of territories. In: *Strategy of modern scientific and technological development: problems and prospects: Proceedings of the 4th All-Russian scient. pract. conf., Petrozavodsk, 25 January 2022*. Petrozavodsk: Novaia Nauka Publishing; 2022. P. 89–93. (In Russ.)

3. Afanasiev A. I., Kuznetsov A. M., Potapov V. Ia., Potapov V. V., Chirkova A. A. Mathematical model of a friction-air separator. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2026; 2: 40–48. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2026-2-40-48

4. Roghanchi P., C. Kocsis K. Quantifying the thermal damping effect in underground vertical shafts using the nonlinear autoregressive with external input (NARX) algorithm. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2019; 29(2); 2; 255–262.

5. Ugolnikov A. V., Nuhorzhaev E. S., Makarov V. N., Makarov N. V. Increasing the efficiency of dust collection of heat and mass exchange equipment for mining and metallurgical production. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2025; 12-2: 98–111. (In Russ.) DOI: 10.2518/0236_1493_2025_122_0_98

6. 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; 32(3): 45–51. DOI: 10.7166/32-3-2616

7. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kulikova E. Iu., Rybichev A. A. Decision-making algorithms for reducing aerological risks in coal mines. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories.* 2025; 17(2): 688–700. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-688-700

8. Han Han, Pengfei Wang, Ronghua Liu, Chang Tian. Experimental study on atomization characteristics and dust-reduction performance of four common types of pressure nozzles in underground coal mines. *International Journal of Coal Science and Technology.* 2020; 7(3): 581–596. DOI: 10.1007/s40789-020-00329-w

9. Kaplun A. B., Morozov E. M., Shamraeva M. A. *ANSYS in the hands of an engineer: a practical guide.* Moscow: URSS Publishing; 2024. (In Russ.)

10. Firsov A. N., Zuravska A. About methods of the theory of similarity and dimension. In: *System analysis in design and management: Proceedings of the 24th Internat. sci. and pract. conf. in 3 parts. St. Petersburg, 13–14 October 2020, Part 2.* St. Petersburg: Politekh-Press Publishing; 2020. P. 121–131. (In Russ.) DOI: 10.18720/SPBPU/2/id20-159

11. Shivani Kaustubh Chitale, Pranjal Nitin Jadhav, Snehal Suresh Dhoble, Satyajeet Deshmukh. Parameters affecting efficiency of centrifugal pump – a review. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology.* 2021; 8: 49–58. DOI: 10.32628/IJSRST218573

12. Mirsharipov R. H, Akhunbaev A. A. Research of hydrodynamic parameters of drum dryer. International *Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 2020; 7(11): 34–38.

13. Koul P. Design and optimization of ventilation systems for deep underground mines. *Podzemni radovi.* 2025; 47: 1–44.

14. Kychkin A., Nikolaev A. IoT-based mine ventilation control system architecture with digital twin. In: *Proceedings 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 May 2020*. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020: 9111995. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111995

15. Nurkhozhaev E. S., Makarov N. V., Akhmetov R. G., et al. *Method for drying loose materials, increasing environmental efficiency of shaft furnaces and device for its implementation.* Patent RF no. 2837809, 2025. (In Russ.)

Received 28 May 2026

Information about the authors:

Erbol S. Nurkhozhaev – Chairman of the Management Board, JSC Kostanay Minerals. E-mail: rus.akhmetov@mail.ru

Vladimir N. Makarov – DSc (Engineering), Professor, professor of the Mining Mechanical Engineering Department, Ural State Mining University. E-mail: ur.intelnedra@mail.com; https://orcid.org/0000-0002-3785-5569

Semen A. Popov – PhD student, Ural State Mining University. E-mail: popov.semyun@bk.ru; https://orcid.org/0009-0004-3771-571X;

German P. Dyldin – PhD (Engineering), associate professor of the Mining Mechanical Engineering Department, Ural State Mining University. E-mail: german.dyldin@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-7106-4816

Для цитирования: Нурхожаев Е. С., Макаров В. Н., Попов С. А., Дылдин Г. П. Критериальное уравнение энергетической эффективности печей сушки минерального сырья для горнообогатительных предприятий // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2026. № 5. С. 29–36. DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-29-36

For citation: Nurkhozhaev E. S., Makarov V. N., Popov S. A., Dyldin G. P. A criterion equation for the energy efficiency of mineral raw material drying kilns for mining and processing plants. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2026; 5: 29–36 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-29-36