

КРИТЕРИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОМАСОБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГОРНОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Нурхожаев Е.С.¹, Ахметов Р.Г.¹, Попов С.А.², Макаров В.Н.²

¹*Акционерное общество «Костанайские минералы», Житикара, Республика Казахстан;*

²*Уральский государственный горный университет, Екатеринбург*

Ключевые слова: Эйлерово-Лагранжевая модель, природоподобие, шахтная сушильная печь, двухфазная среда, время релаксации, сепарация пыли, экологическая эффективность, тепломассообменное оборудование.

Аннотация. В статье представлены результаты разработки критериальных уравнений, позволяющих количественно оценивать экологическую эффективность работы тепломассообменного оборудования предприятий горнометаллургического комплекса. На основе анализа аэротермодинамических процессов, протекающих в двухфазной среде «частицы минерального сырья – теплоноситель», установлена доминирующая роль угловой скорости вращения частиц в формировании времени релаксации и эффективности сепарации пыли. Методология исследований базируется на Эйлерово-Лагранжевой модели аэродинамики двухфазных сред, π -теореме и теории подобия. Построена матрица индикаторов и критериев подобия, включающая 4 критерия и 5 индикаторов, имеющие безразмерную величину. Из их совокупности выделены определяющие критерии – Архимеда, Стокса, Фруда, Рейнольдса, модифицированные с учетом влияния угловой скорости вращения частиц. Предложено критериальное уравнение экологической эффективности, связывающее вышеуказанные критерии с коэффициентом фракционной сепарации пыли. Уравнение верифицировано путем экспериментальных исследований на модели, компьютерного моделирования и промышленных испытаний на вертикальных шахтных сушильных печах АО «Костанайские минералы». Практическая реализация разработанных подходов позволила повысить экологическую эффективность печей с 64% до 85% и снизить концентрацию хризотил-асбестовой пыли на выходе в 1,8 раза – с 30 до 16 г/м³.

CRITERIA EQUATIONS FOR THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF HEAT AND MASS TRANSFER EQUIPMENT FOR A MINING AND METALLURGICAL COMPLEX

Nurkhozhaev E.S.¹, Akhmetov R.G.¹, Popov S.A.², Makarov V.N.²

¹*Kostanay Minerals JSC, Zhitigara, Republic of Kazakhstan;*

²*Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia*

Keywords: Euler-Lagrange model, natural-like behaviour, shaft kiln, two-phase medium, relaxation time, dust separation, environmental efficiency, heat and mass transfer equipment.

Abstract. This article presents the results of the development of criterion equations that enable the quantitative assessment of the environmental performance of heat and mass transfer equipment at enterprises within the mining and metallurgical sector. Based on an analysis of the aerothermodynamic processes occurring in the two-phase ‘mineral raw material particles–heat transfer fluid’ medium, the dominant role of the angular velocity of particle rotation in determining the relaxation time and dust separation efficiency has been established. The research methodology is based on the Euler-Lagrange model of two-phase fluid dynamics, the π -theorem and similarity theory. A matrix of similarity indicators and criteria has been constructed, comprising 4 criteria and 5 indicators, all of which are dimensionless quantities. From this set, the determining criteria have been identified – Archimedes, Stokes, Froude and Reynolds – modified to account for the influence of the angular velocity of particle rotation. A criterion equation for environmental efficiency has been proposed, linking the above criteria to the dust fractionation coefficient. The equation has been verified through experimental studies on a model, computer modelling and industrial trials on vertical shaft drying kilns at Kostanay Minerals JSC. The practical implementation of the developed approaches has made it possible to increase the environmental efficiency of the kilns from 64% to 85% and to reduce the concentration of chrysotile asbestos dust at the outlet by a factor of 1.8 – from 30 to 16 g/m³.

Введение. Тенденция развития горнодобывающих предприятий определяется комплексным применением с глубокой переработкой природных ресурсов, что неизбежно приводит с одной стороны к росту добавочной стоимости, но с другой стороны к увеличению

отходов и снижению качественных показателей окружающей среды. По этой причине актуальное значение приобретает задача обеспечения экономически обоснованного и экологически эффективного функционирования горных предприятий [1].

В частности, применение инновационных технологий в производстве хризотил-асбеста должно способствовать одновременно не только снижению отходов, но и увеличению выхода готового продукта из исходного минерального сырья [2-4].

Одно из перспективных направлений разработки экологически эффективных инновационных технологий базируется на применении принципа природоподобной соразмерности, заключающемся в реализации технологических процессов, как минимум механистически, локально адекватных соответствующим процессам, происходящим в природе. Соответствие природоподобной соразмерности технологического процесса сушки минерального сырья в тепломассообменном оборудовании (ТМОО) в части его экологической эффективности может быть представлено долей потерь энергии либо материала при переходе с одного уровня технологического процесса на другой [5-7].

Аэротермодинамические процессы, протекающие в ТМОО горнометаллургических предприятий с позиции их экологической эффективности, должны быть аналогичны тепломассообмену, происходящему в природе. В частности, в процессе улавливания пыли и испарения влаги с поверхности листьев кроны деревьев и кустарников, которое происходит за счет формирования микро вихрей на их поверхности. Как установлено в статье [8] и патенте [9] в соответствии с принципом природоподобной соразмерности наиболее эффективно процесс сепарации происходит при условии оптимальных соотношений поступательной скорости движения частиц руды и угловых скоростей их вращения, что в данном случае для двухфазной среды в виде частиц минеральной руды и теплоносителя соответствует выполнению принципа Гамильтона. Аналогичный принцип должен быть реализован в тепломассообменных процессах шахтных печей при взаимодействии частиц рудного материала и теплоносителя [10].

Формирование устойчивых присоединенных вихрей в процессе взаимодействия частиц руды и теплоносителя аналогично процессам, происходящим в природе, индуцируется вращением частиц, а управление этим вращением позволяет изменять как аэродинамическое сопротивление, так и время релаксации частиц руды при движении по криволинейным траекториям в поле скоростей теплоносителя [11]. При этом наиболее целесообразно формирование устойчивого присоединенного вихря за счет внешнего источника, так как в этом случае вокруг мелкодисперсных частиц руды создается поле безвихревой циркуляции и как следствие сила Магнуса, действующая на частицы будет определяться величиной циркуляции независимой от диаметра частицы.

Актуальность исследований. Затраты на обеспечение экологической безопасности составляют более 7% ВВП и непрерывно растут в связи с тенденцией недостаточной эффективности глубокой переработки природных ресурсов, что обуславливает актуальность создания тепломассообменного оборудования, обеспечивающего одновременно с повышением качества готовой продукции снижение экологической нагрузки на окружающую среду.

Объект исследований тепломассообменное оборудование сушки минерального сырья для горнометаллургического комплекса.

Предмет исследований. Критериальное уравнение экологической эффективности процесса сушки минерального сырья в ТМОО, устанавливающее зависимость между критериями подобия, характеризующими аэродинамические процессы в нем с эффективностью сепарации мелкодисперсных частиц материала.

Целью исследований является разработка критериального уравнения экологической эффективности процесса сушки минерального сырья, связывающего критерии подобия аэродинамических процессов в сушилке печи с эффективностью сепарации мелкодисперсных частиц руды с учетом формирования устойчивых присоединенных вихрей теплоносителя для научного обоснования путей повышения экологической эффективности ТМОО горных предприятий.

Задачи исследований

1. С учетом физической картины аэродинамических процессов в сушиле печи определить критерии экологической эффективности ТМОО.
2. Сформировать систему дифференциальных уравнений, описывающих динамический процессы в сушиле печи с учетом вращения частиц руды в поле скоростей теплоносителя.
3. В соответствии с теорией подобия установить критериальное уравнение, определяющее эффективность сепарации мелкодисперсных частиц руды и его эквивалентность выбранному критерию экологической эффективности.
4. Установить функциональную связь критерия экологической эффективности с интенсивностью присоединенного вихря, то есть скоростью вращения частиц и временем их релаксации.
5. Осуществить верификацию предложенного критериального уравнения.

Методология исследований основана на использовании Эйлера-Лагранжевой модели аэродинамики двухфазных сред, критерия экологической эффективности, теории Веникова, теоремы Кирпичева-Гухмана и гипотезы о доминантном влиянии угловой скорости вращения частиц руды на процесс их сепарации, то есть экологическую эффективность ТМОО.

Проведение верификации критериев путем экспериментальных исследований на моделях, компьютерного инженерного анализа термоаэросепарационных процессов в двухфазной среде, промышленных исследованиях вертикальных шахтных сушильных печей на АО «Костанайские минералы».

Математическое моделирование

В качестве критерия фракционной экологической эффективности ТМОО принят коэффициент фракционной сепарации в виде:

$$K_{\varepsilon i} = \int_0^1 \bar{m}_{ci} d\bar{d}_i, \quad (1)$$

где $\bar{m}_{ci} = m_{ci} / m_i$ – относительная массовая доля i -ой фракции пыли, сепарируемой на выходе из сушила печи в газоходы; m_{ci} – массовая доля i -ой фракции пыли, сепарируемой на выходе из сушила печи в газоходы, кг/с; m_i – массовый расход пыли i -ой фракции, поступающей в сушило печи, кг/с; d_i – диаметр i -ой частицы пыли фракционного состава, по которому определяется экологическая эффективность печи, м; $\bar{d}_i = 2d_i / d_{\max}$ – относительный диаметр i -ой частицы хризотил асбестовой пыли, поступающей в сушило печи [12].

Из уравнения (1) видно, чем меньше диаметр мелкодисперсных частиц минерального сырья, в данном случае пыли, которые будут отсепарированы в пределах заданных фракций, в качестве которой может быть принят весь диапазон мелкодисперсных частиц руды под действием объемных и поверхностных сил при движении по криволинейным траекториям в потоке теплоносителя тем меньше их концентрация на выходе из печи, то есть выше экологическая эффективность ТМОО. Следовательно, необходимо таким образом оптимизировать топологическую схему сушила печи, чтобы при прочих равных условиях за счет управления присоединенными вихрями теплоносителя вокруг частиц обеспечить максимально возможное результирующее действие поверхностных сил, обусловленных этим вращением в направлении силы тяжести. То есть управление силами Магнуса, Кориолиса, Стокса, связанными с критериями подобия аэродинамических процессов в двухфазной среде за счет циркуляции теплоносителя, позволяющей увеличивать эффективность сепарации. Построение критериального уравнения экологической эффективности и поиск путей повышения экологичности ТМОО основаны на гипотезе о доминантном влиянии угловой скорости вращения частиц на процесс их вихревой сепарации [10-13].

В силу отсутствия в настоящее время общих уравнений аэродинамики двухфазных сред воспользуемся Эйлерово Лагранжевой математической моделью в форме дифференциальных уравнений в векторном виде, описывающих движение частиц минералов в криволинейном

потоке теплоносителя, включающих их вращательное движение их вокруг центра масс в следующем виде:

$$\begin{cases} \rho_T \cdot V_T / dt = \rho_T \cdot g - \text{grad} p + V_T \cdot \nabla^2 \cdot V_i; \\ m_i \frac{dV_i}{dt} = g(m_i - m_{0i}) - \xi_i \cdot S_i \cdot \rho_i \cdot (V_T - V_i) \cdot \frac{V_i}{2} + \varepsilon \cdot m_0 \cdot \frac{dV_i}{dt}; \\ J_i \frac{d\omega_i}{dt} = \xi_{Bi} \frac{\rho_T}{64} d_i^5 \Omega_i; \end{cases} \quad (2)$$

где V_T , V_i – средние скорости соответственно несущей среды и i -ой частицы; m_i – масса i -ой частицы; d_i , ρ_i , S_i – соответственно диаметр, плотность и миделево сечение i -ой частицы; ρ_T – плотность теплоносителя; g – ускорение силы тяжести; m_0 – масса объема теплоносителя, занятого i -ой частицей; l_T , l_i – длины линии тока теплоносителя и i -ой частицы; p – давление; t – время; ε – коэффициент присоединенной массы; ξ_i – коэффициент сопротивления сепарации i -ой частицы; ξ_{Bi} – коэффициент сопротивления вращению i -ой частицы; Ω_i – относительная угловая скорость частиц; J_i – момент инерции i -ой частицы; ω_i – угловая скорость i -ой частицы.

Вышеуказанные уравнения движения частиц руды и теплоносителя в ТМОО учитывают эффект присоединенной массы, то есть силу необходимую для ускорения движения теплоносителя, окружающего частицу руды, подъемную силу Магнуса, которая вызвана вращательным движением частиц вследствие действия градиента давления на поверхность частиц в соответствии с уравнением Бернулли. Кроме того, уравнения учитывают энергетический обмен между частицами, а также обратное их действие на теплоноситель [14-16].

С учетом третьей теоремы Кирпичова-Гухмана, правила Фурье, совокупности параметров, описывающих процессы сепарации согласно уравнениям (2) и применяя π -теорему выберем в качестве независимых параметров, определяющих этот механизм в виде следующей совокупности [17-19]:

– геометрические параметры d_i , R_i ;

– кинематические параметры ω_i , V_{0i} , $(V_{Tx} - V_{xi})$, $(V_{Ty} - V_{yi})$, $\frac{dV_{yi}}{dt}$, τ_i ; (3)

– динамические параметры ρ_T , g , v_i , $(\rho_i - \rho_T)$.

где R_i – радиус кривизны i -ой частицы; τ_i – время релаксации i -ой частицы; V_{Tx} , V_{Ty} – компоненты скоростей теплоносителя по осям x и y ; V_{yi} , V_{xi} – компоненты скоростей i -ой частицы по осям x и y ; V_0 – кинематическая вязкость; v_i – динамическая вязкость.

В соответствии с вышеуказанными элементами теории подобия уравнение, связывающее независимые параметры, определяющие движения частиц руды по криволинейным траекториям в поле теплоносителя и соответственно формирующие энергетическое взаимодействие теплоносителя и частиц руды с критериями подобия, представим в виде безразмерной степенной зависимости.

$$K_{\gamma i} = K d_i^\alpha v_i^\beta \rho_T^\gamma (\rho_i - \rho_T)^\eta g^\lambda V_{0i}^\chi (V_{Tx} - V_{xi})^\lambda (V_{Ty} - V_{yi})^z \left(\frac{dV_{yi}}{dt} \right)^\eta R_i^\sigma \omega_i^\theta \tau_i^\zeta. \quad (4)$$

Для построения матрицы показателей степеней независимых параметров в критериальном уравнении (4) воспользуемся показателями степеней базовых размерностей используемых в системе уравнений (2):

$$\begin{aligned} [d_i] &= l; [v] = l^2 t^{-1}; [\rho_T] = m l^{-3}; [\rho_i - \rho_T] = m l^{-3}; [g] = l t^{-2}; [V_0] = l t^{-1}; \\ [V_{Tx} - V_{xi}] &= l t^{-1}; [V_{Ty} - V_{yi}] = l t^{-1}; \left[\frac{dV_{yi}}{dt} \right] = l t^{-2}; [\omega_i] = t^{-1}; [R_i] = l. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом уравнений (1), (2) критериальное уравнение (4) представляет собой критерий экологической эффективности ТМОО, поскольку определяет фактически минимальный диаметр частиц пыли, то есть в совокупности их минимальную массу, сепарируемых в процессе движения по криволинейным траекториям в сушиле печи.

С учетом базовых размерностей, приведенных в (5), матрицу размерностей независимых параметров получим в виде (табл. 1).

Табл. 1. Матрица размерностей независимых параметров

	d	v	ρ_T	$(\rho_i - \rho_T)$	g	V_0	$(V_{Tx} - V_{xi})$	$(V_{Ty} - V_{yi})$	$\frac{dV_{yi}}{dt}$	R_i	ω_i	τ_i
m	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
e	1	+2	-3	-3	1	1	1	1	1	1	0	0
t	0	-1	0	0	-2	-1	-1	-1	-2	0	-1	1
	α	β	γ	φ	t	χ	λ	Z	η	σ	θ	ζ

Безразмерные индикаторы подобия с учетом π -теоремы и (5) (табл. 1) получим согласно формуле:

$$n = n_{kn} - n_{bp}, \quad (6)$$

где n_{kn} – количество независимых параметров (5); n_{bp} – количество базовых размерностей.

Таким образом, количество индикаторов подобия в соответствии с системой дифференциальных уравнений (2), описывающих движения двухфазных сред, включая процессы сепарации частиц руды с учетом их вращения равно 9.

Систему уравнений, определяющих показатели степеней независимых параметров в критериальном уравнении (4) с учетом (5) (табл. 1) получим в виде:

$$\begin{cases} \gamma + \varphi = 0; \\ 2\beta - 3\gamma - 3\varphi + t + \chi + \lambda + Z + \sigma + \eta = 0; \\ \beta + 2t + \chi + \lambda + Z + 2\eta + \theta + \zeta = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Матрицу индикаторов подобия получим в соответствии с результатами решения системы уравнений (7) в виде (табл. 2).

Табл. 2. Матрица индикаторов подобия

	d	v	ρ_T	$(\rho_i - \rho_T)$	g	V_0	$(V_{Tx} - V_{xi})$	$(V_{Ty} - V_{yi})$	$\frac{dV_{yi}}{dt}$	R_i	ω_i	τ_i
U_1	3	-2	-1	+1	1	0	0	0	0	0	0	0
U_2	+1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
U_3	-1	0	0	0	-1	0	0	2	0	0	0	0
U_4	1	0	0	0	0	-2	0	0	1	0	0	0
U_5	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
U_6	0	0	1	-1	-1	0	1	0	0	0	1	0
U_7	1	0	1	-1	0	2	0	0	0	-1	0	0
U_8	0	0	1	-1	-1	0	1	0	0	0	1	0
U_9	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

Раскрывая матрицу (табл. 2) в соответствии с принятыми в теории аэродинамических процессов соизмерности, получим следующую систему индикаторов подобия процесса вихревой сепарации в сушиле ТМОО:

$$U_{1i} = \frac{gd_i^3(\rho_i - \rho_{Ti})}{\rho_T v^2}; U_{2i} = \frac{d_i(V_{Ty} - V_{yi})}{v}; U_{3i} = \frac{(V_{Ty} - V_{yi})^2}{d_i g};$$

$$U_{4i} = \frac{d_i \frac{\partial V_{yi}}{\partial t}}{V_{0i}^2}; U_{5i} = \frac{d_i \omega_i}{V_{Ty} - V_{yi}}; U_{6i} = \frac{\rho_T \omega_i (V_{Tx} - V_{xi})}{g(\rho_i - \rho_T)}; \quad (8)$$

$$U_{7i} = \frac{d_i \rho_T \omega_i V_{0i}^2}{R_i(\rho_i - \rho_T)}; U_{8i} = \frac{(V_{Tx} - V_{xi}) d_i \rho_T \omega_i}{\rho_i - \rho_T}; U_{9i} = \frac{\tau_i V_{0i}}{d_i}.$$

Из общей совокупности индикаторов подобия независимыми критериями подобия физических процессов, протекающих в сушиле печи в процессе вихревой сепарации частиц пыли i -ой фракции в двухфазной среде с теплоносителем и характеризующих фракционную экологическую эффективность ТМОО являются четыре критерия, включающие дополнительно пять индикаторов подобия:

$$A_{rwi} = U_{1i}(1 - U_{6i}) = \frac{gd_i^3(\rho_i - \rho_{Ti})}{\rho_T v^2} \left(1 + \frac{\rho_T \omega_i (V_{Tx} - V_{xi})}{g(\rho_i - \rho_T)} \right) \quad - \quad \text{критерий Архимеда,}$$

определяющий отношение подъемной силы, обусловленной разностью плотностей двух разных сред с учетом силы Магнуса, обуславливающей вязкостью частиц, к силе трения.

$$S_{tkwi} = U_{9i}(1 + U_{5i}) = \frac{\tau_i (V_{Ty} - V_{yi})}{d_i} \left(1 + \frac{d_i \omega_i}{V_{Ty} - V_{yi}} \right) \quad - \quad \text{критерий Стокса, определяющий}$$

соотношение кинетической энергии частиц минерала и энергии их взаимодействия с теплоносителем с учетом его вязкости и влияния силы Магнуса обусловленной вращением частиц руды, то есть с учетом критерия гомохронности, характеризуемого индикатором U_5 .

$$F_{rwi} = \frac{U_{3i} d_i g}{d_i g + U_{7i} + U_{8i}} = \frac{(V_{Ty} - V_{yi})^2}{d_i g + \frac{d_i \rho_T \omega_i V_{0i}^2}{R_i(\rho_i - \rho_T)} + \frac{(V_{Tx} - V_{xi}) d_i \rho_T \omega_i}{\rho_i - \rho_T}} \quad - \quad \text{критерий Фруда,}$$

определяющий отношение силы инерции частиц руды и внешних сил, в поле которого происходит движение на элементарный объем теплоносителя с учетом влияния силы Магнуса обусловленной вращением частиц руды.

$$R_{ewi} = U_{2i}(1 + U_{5i}) = \frac{d_i (V_{Ty} - V_{yi})}{v} \left(1 + \frac{d_i \omega_i}{V_{Ty} - V_{yi}} \right) \quad - \quad \text{критерий Рейнольдса, определяющий}$$

отношение инерционной силы и силы вязкого трения с учетом пульсации скорости, обусловленной скоростью движения частиц руды, то есть с учетом критерия гомохронности, характеризуемого индикатором U_{1i} .

$$E_{uwi} = U_{4i} = \frac{d_i \frac{\partial V_{yi}}{\partial t}}{V_{0i}^2} \quad - \quad \text{определяемый критерий Эйлера, устанавливающий соотношение}$$

сил вызывающих движение частиц руды к силам инерции в двухфазной среде с теплоносителем.

Индикатор $U_{9i} = S_{tkw0i}$ – устанавливает идентичность начальных условий на момент сепарации частиц руды по критерию Стокса.

Значение коэффициента пропорциональности в критериальном уравнении (4) получим из уравнения динамического равновесия в процессе сепарации, учитывая, что критерий Эйлера является аналогом коэффициентом аэродинамического сопротивления (9):

$$\frac{m_i dV_{yi}}{dt} = E_{uwi} \rho_T \frac{\pi d_i^2}{4} V_{0i}^2. \quad (2)$$

С учетом вышесказанного критериальное уравнение экологической эффективности вихревой сепарации можно представить в виде:

$$K_{\omega i} = \frac{(A_{rwi})^\alpha (S_{tkwi})^\beta (R_{ewi})^d}{(E_{uwi})^\phi (F_{rwi})^c}. \quad (10)$$

Уравнение, связывающее усредненные коэффициенты аэродинамического сопротивления движению частиц руды в сушиле ТМОО с их кинематическими параметрами и критерием Эйлера получим в виде [20]:

$$C_i = \frac{2E_{\omega i}}{3R_{\omega i}^2}. \quad (11)$$

Время релаксации частицы пыли в процессе сепарации в сушиле ТМОО с учетом (11) и [20] получим в виде:

$$\tau_{\omega i} = \frac{2d_i^2(\rho_i - \rho_T)R_{\omega i}^2 g}{9E_{\omega i} \nu \rho_T}. \quad (12)$$

Из формулы (12) видно, что увеличение времени релаксации мелкодисперсных частиц руды в сушиле ТМОО за счет роста критерия Рейнольдса и снижения величины критерия Эйлера, то есть коэффициента аэродинамического сопротивления за счет вращения частиц руды способствует повышению эффективности вихревой сепарации заданной фракции мелкодисперсных частиц, следовательно, повешению фракционной экологической эффективности печи, то есть экологической эффективности печи. При уменьшении времени релаксации увеличивается значение критерия Эйлера за счет снижения силы Архимеда, Магнуса, увеличение негативного влияния силы Стокса, критерия Рейнольдса, при росте критерия Фруда, что приводит к ухудшению процесса сепарации мелкодисперсных частиц руды и как результат снижению фракционной эффективностью печи.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование внешнего устройства формирования устойчивых присоединенных вихрей вокруг мелкодисперсных частиц руды в силу постоянства циркуляции позволяет существенно снизить негативное влияние снижения диаметра частиц на время их релаксации, есть фракционную экологическую эффективность печи.

В статье проведен глубокий анализ возможности повышения эффективности пылеулавливания ТМОО на базе Лагранжевой модели движения частиц минерала в неинерционной системе координат.

Полученные результаты подтверждают механизм повышения эффективности сепарации частиц минералов непосредственно в сушиле печи за счет управления их угловой скорости вращения, что позволяет использовать положительный эффект от действия сил Кориолиса и Магнуса. Принципиальное отличие заключается в том, что в предлагаемой статье получено критериальное уравнение, определяющее пути повышения экологической эффективности, то есть сепарации частиц минералов в условиях проведения экспериментальных исследований, установлена целесообразность использования внешних устройств формирования устойчивых вихрей теплоносителя вокруг мелкодисперсных частиц руды. Предлагаемое критериальное уравнение определяет основные геометрические, кинематические и динамические параметры, которые должны быть в экспериментальной модели и натурном образце таковыми, чтобы вышеуказанные критерии подобия были равны между собой.

Результаты исследования. Из анализа функциональной связи критериев подобия процессов вихревой сепарации частиц пыли в сушиле с факторами силового и энергетического их взаимодействия в двухфазной среде с теплоносителем изложенными выше можно сделать следующие выводы их влияния на экологическую эффективность ТМОО.

Увеличение угловой скорости вращения частиц руды, создания устойчивых присоединенных вихрей в условиях при которых их вектор ортогонален поступательной скорости движения по криволинейной траектории приводит к росту силы Магнуса, которая, будучи поверхностной силой, способствует росту приведенной силы тяжести, то есть росту критерия Архимеда, снижению критерия Фруда, а также росту критерия Рейнольдса и Стокса вследствие пульсации скорости с частотой ω_i . При этом происходит снижение критерия Эйлера, то есть приведенного коэффициента аэродинамического сопротивления движению мелкодисперсных частиц руды в поле теплоносителя и как результат увеличение времени релаксации.

Таким образом математически доказана гипотеза эквивалентности между критерием экологической эффективности тепломассообменного оборудования, то есть процессом сепарации мелкодисперсных частиц пыли с угловой скоростью их вращения и временем релаксации частиц пыли при движении в двухфазной среде по криволинейной траектории.

В целях верификации предложенной математической модели критерия экологической эффективности процессов, протекающих в тепломассообменном оборудовании была разработана экспериментальная установка в соответствии с вышеуказанными критериями подобия и проведены экспериментальные исследования, а также расчеты с использованием инженерного компьютерного анализа аэротермодинамических процессов аэросепарации в сушиле печи.

Приведенные на рисунке 1, а графики зависимости коэффициента экологической эффективности ТМОО от критерия гомохронности U_{5i} показывают монотонный прирост экологической эффективности с ростом угловой скорости вращения частиц руды.

Из анализа зависимости экологической эффективности ТМОО от коэффициента релаксации, приведенной на рисунке 1, б видно, что увеличение времени релаксации мелкодисперсных частиц пыли в процессе вихревой сепарации позволяет довести экологическую эффективность до значения 0,83.

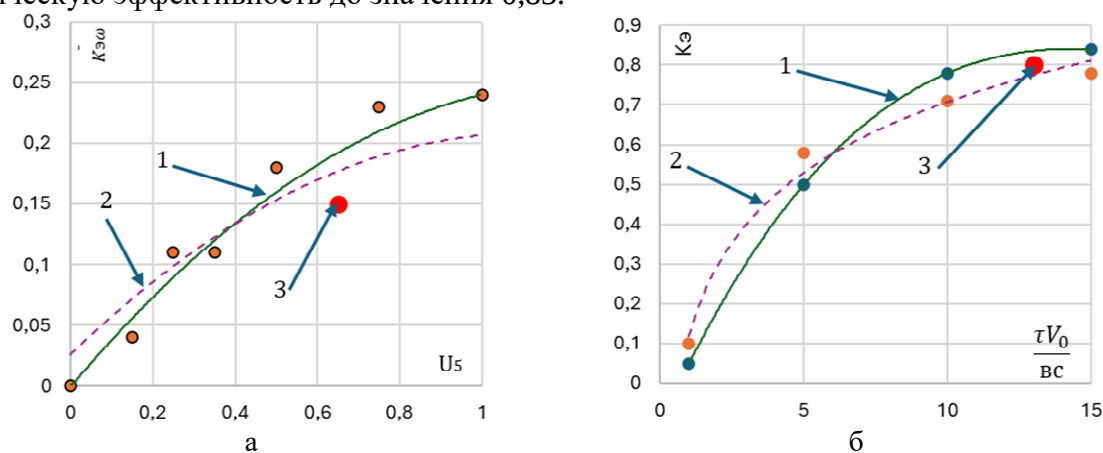


Рис. 1. Графики зависимости коэффициента экологической эффективности ТМОО: а) от критерия гомохронности U_5 ; б) от коэффициента релаксации: 1 – экспериментальные исследования на действующей модели; 2 – компьютерное моделирование; 3 – фактические параметры ВШСП №3 цеха ДиСхр АО «Костанайские минералы»

Приведенные на рисунке 2, а графики зависимости коэффициента экологической эффективности ТМОО от критерия Эйлера показывают его непрерывный рост с уменьшением значения критерия Эйлера.

Приведенные на рисунке 2, б графики зависимости коэффициента экологической эффективности от коэффициента скорости теплоносителя, определяемого отношением индикатора U_{9i} к U_{2i} , учитывающим начальный импульс, сообщаемый частицам руды в процессе сепарации показывают, что с ростом указанного критерия эффективность сепарации, то есть экологическая эффективность возрастает, что обусловлено положительным действием сил Кориолиса увеличивающим время релаксации и одновременно снижающей значение критерия Эйлера в связи с ростом критерия Рейнольдса.

Таким образом, результаты модернизации вертикальной шахтной сушильной печи ВШСП №3 цеха дробления и сушки хризотила АО «Костанайские минералы», приведенные на рисунках 1 и 2, подтверждают достаточную достоверность теоретических и экспериментальных исследований, приведенных в данной статье. Положенная в основу реализации природоподобной соразмерности гипотеза о доминантном влиянии времени релаксации мелкодисперсных частиц руды в процессе их сепарации в сушиле на эффективность ТМОО доказана и позволяет на ее основе целенаправленно модернизировать действующие и создавать экологически эффективное новое оборудование.

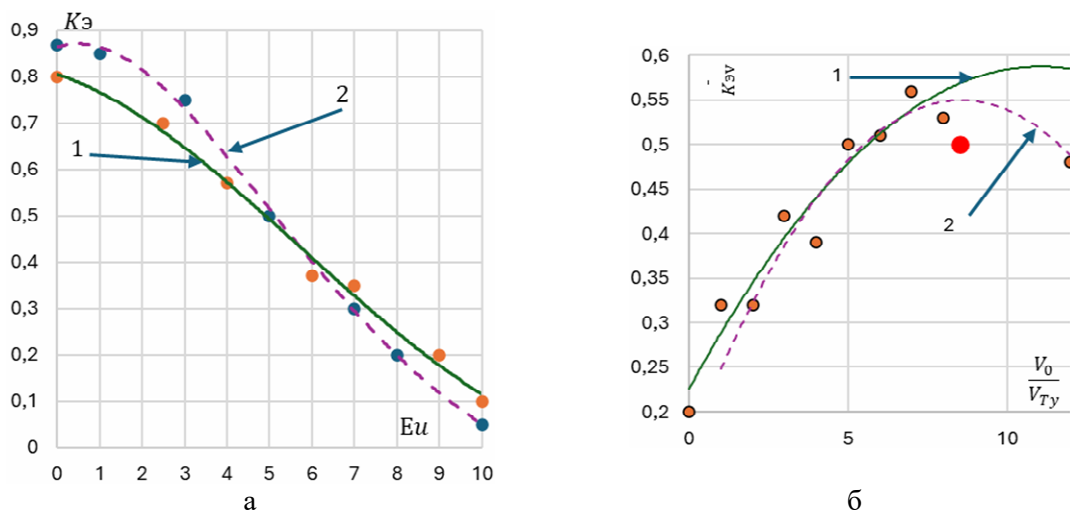


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента экологической эффективности ТМОО: а) от критерия Эйлера U_{4i} ; б) от коэффициента скорости теплоносителя, равного U_{9i} / U_{2i} ; 1 – экспериментальные исследования на действующей модели; 2 – компьютерное моделирование; 3 – фактические значения параметров ВШСП №3 цеха ДиСхр АО «Костанайские минералы»

Выводы

1. На базе гипотезы о доминантном влиянии угловой скорости вращения частиц руды на процесс их сепарации в сушиле печи получены определяющие и определяемые критерии подобия процесса вихревой сепарации в ТМОО.
2. Построена математическая модель зависимости энергоэффективности ТМОО от определяющих критериев подобия и получено ее критериальное уравнение.
3. Показано, что управление угловой скоростью вращения частиц минералов в процессе сушки позволяет целенаправленно изменять время релаксации, способствуя тем самым повышению экологической эффективности ТМОО.
4. Уточненные критерии подобия вихревой сепарации с учетом влияния угловой скорости вращения частиц позволяют с достаточной точностью проводить экспериментальные исследования на изготовленных с учетом них масштабных действующих моделях ТМОО.
5. Модернизация вертикальных шахтных сушильных печей в цехе ДиСхр АО «Костанайские минералы», проведенное с учетом экспериментальных исследований на базе предложенной математической модели критериального уравнения и оптимизации геометрических и кинематических параметров позволило повысить экологическую эффективность с 64% до 85%, снизив тем самым концентрацию хризотил-асбеста в теплоносителе на выходе из печи с 30 до 16 г/м³.

Список литературы

1. Стась Г.В., Калаева С.З., Муратова К.М., Чистяков Я.В. К вопросу защиты окружающей среды от мелкодисперсной пыли горных предприятий // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2019. – Вып. 1. – С. 92-109.
2. Картамышева Е.С., Бекетова Е.А. Инновации в решении экологических проблем // Молодой ученый. – 2018. – №25(211). – С. 10-12.
3. Антонов В.Н. Формирование благоприятного экологического имиджа территорий // Стратегия современного научно-технологического развития: проблемы и перспективы реализации: Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2022. – С. 89-93.
4. Chitale S.K., Jadhav P.N., Dhoble S.S., Deshmukh S. Parameters Affecting Efficiency of Centrifugal Pump – A Review // International Journal of Scientific Research in Science and Technology (IJSRST). 2021, no. 8, pp. 49-58. DOI: 10.32628/IJSRST218573.
5. Ковальчук М.В., Нарайкин О.С., Яцишина Е.Б. Природоподобные технологии: новые возможности и новые вызовы // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89, № 5. – С. 455-465. – DOI: 10.31857/S0869-5873895455-465.
6. 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: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-74-82.

7. 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: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9111995. – DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111995.
8. Угольников А.В., Нурхожаев Е.С., Макаров В.Н., Макаров Н.В. Повышение эффективности пылеулавливания тепломассообменного оборудования для горно-металлургического производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-2. – С. 98-111. – DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_98.
9. Патент №2837809 РФ. Способ сушки сыпучих материалов, повышения экологической эффективности шахтных печей и устройство для его осуществления / Е.С. Нурхожаев, Н.В. Макаров, Р.Г. Ахметов, В.Н. Баландин, В.Н. Макаров, М.В. Новицкий, З.В. Бочаров, М.А. Алексеев. – Заявка №2024118632 от 04.07.2024; опубл. 04.04.2025, Бюл. №10.
10. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. – СПб.: Химиздат, 2005. – 659 с.
11. Чистяков Я.В., Муратова К.М., Володин Н.И. Основы сепарации мелкодисперсной пыли в центробежно-инерционном пылеуловителе // Экология и промышленность России. – 2016. – Т. 20, №8. – С. 20-27. – DOI: 10.18412/1816-0395-2016-8-20-27.
12. Нурхожаев Е.С., Макаров В.Н., Макаров Н.В., Попов С.А. Аддитивная математическая модель оценки качества пылеулавливания тепломассообменного оборудования и её верификация // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17, №3. – С. 1495-1502. – DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1495-1502.
13. 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.
14. Usmanov K.I. Hisoblash suyuqliklari dinamikasi (CFD) yordamida gelioquritgichlarni modellashtirish // Ishlab Chiqarish Jarayonlari va Apparatlari. 2025, vol. 8, no. 5, pp. 20-31.
15. Roghanchi P., Kocsis K.C. 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. 2018, no. 2, pp. 255-262.
16. 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. – doi.org/10.26160/2658-3305-2023-19-122-128.
17. Фирсов А.Н., Журавская А. О методах теории подобия и размерности // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXIV Международной научной и учебно-практической конференции: в 3 ч. – СПб.: Политех-Пресс, 2020. – Ч. 2. – С. 121-131. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/id20-159.
18. Han H., Wang P., Liu R., Tian Ch. 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, no. 3, pp. 581-596. DOI: 10.1007/s40789-020-00329-w.
19. Koul P. Design and optimization of ventilation systems for deep underground mines // University of Belgrade – Faculty of Mining and Geology. 2025, no. 47, pp. 1-44.
20. Носырев М.Б., Макаров И.Р., Угольников А.В., Макаров Н.В. Модификация технологии гидровихревой коагуляции для устойчивого роста эффективности локализации взрывов мелкодисперсной угольной пыли // Устойчивое развитие горных территорий. – 2019. – Т. 11, №2(40). – С. 221-228. – DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-2-221-228.

References

1. Stas G.V., Kalaeva S.Z., Muratova K.M., Chistyakov Y.V. On the protection of the environment from fine particulate matter emitted by mining enterprises // News of Tula State University. Earth Sciences. 2019, iss. 1, pp. 92-109.
2. Kartamysheva, E.S., and Beketova, E.A. Innovations in addressing environmental issues // Young Scientist. 2018, no. 25(211), pp. 10-12.
3. Antonov V.N. Building a positive environmental image for regions // Strategy for Modern Scientific and Technological Development: Challenges and Prospects for Implementation: Proceedings of the 4th All-Russian Scientific and Practical Conference. – Petrozavodsk: International Centre for Scientific Partnership “New Science” (sole proprietor I.I. Ivanovskaya), 2022. – P. 89–93.
4. Chitale S.K., Jadhav P.N., Dhoble S.S., Deshmukh S. Parameters Affecting Efficiency of Centrifugal Pump – A Review // International Journal of Scientific Research in Science and Technology (IJSRST). 2021, no. 8, pp. 49-58. DOI: 10.32628/IJSRST218573.
5. Kovalchuk M.V., Naraikin O.S., Yatsishina E.B. Nature-inspired technologies: new opportunities and new challenges // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019, vol. 89, no. 5, pp. 455-465. DOI: 10.31857/S0869-5873895455-465.

6. Tarasov P.I., Khazin M.L., Golubev O.V. Reducing the geo-ecological impact of the mining and processing industry in northern and Arctic regions // Mining Information and Analytical Bulletin. 2019, no. 7, pp. 74-82. – DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-74-82.
7. 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: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9111995. – DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111995.
8. Ugolnikov A.V., Nurkhojaev E.S., Makarov V.N., Makarov N.V. Improving the dust collection efficiency of heat and mass transfer equipment for mining and metallurgical production // Mining Information and Analytical Bulletin. 2025, no. 12-2, pp. 98-111. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_98.
9. Patent No. 2837809 RU. Method for drying bulk materials, improving the environmental efficiency of mine furnaces and a device for its implementation / E.S. Nurkhozhaev, N.V. Makarov, R.G. Akhmetov, V.N. Balandin, V.N. Makarov, M.V. Novitsky, Z.V. Bocharov, M.A. Alekseev. – Appl. No. 2024118632 from 04.07.2024; publ. 04.04.2025, Bul. No. 10.
10. Logachev I.N., Logachev K.I. Aerodynamic Principles of Aspiration. – SPb.: Khimizdat, 2005. – 659 p.
11. Chistyakov Ya.V., Muratova K.M., Volodin N.I. Fundamentals of fine dust separation in a centrifugal-inertial dust collector // Ecology and Industry of Russia. 2016, vol. 20, no. 8, pp. 20-27. – DOI: 10.18412/1816-0395-2016-8-20-27.
12. Nurkhozhaev E.S., Makarov V.N., Makarov N.V., Popov S.A. An additive mathematical model for assessing the dust capture efficiency of heat and mass transfer equipment and its verification // Sustainable Development of Mountain Territories. 2025, vol. 17, no. 3, pp. 1495-1502. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1495-1502.
13. 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.
14. Usmanov K.I. Hisoblash suyuqliklari dinamikasi (CFD) yordamida gelioquritgichlarni modellashtirish // Ishlab Chiqarish Jarayonlari va Apparatlari. 2025, vol. 8, no. 5, pp. 20-31.
15. Roghanchi P., Kocsis K.C. 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. 2018, no. 2, pp. 255-262.
16. Makarov V.N., Akhmetov R.G., Makarov N.V., Belskikh A.M. Improving the environmental performance of vertical shaft kilns for drying ore materials // Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production. 2023, no. 19, pp. 122-128. doi.org/10.26160/2658-3305-2023-19-122-128.
17. Firsov A.N., Zhuravskaya A. On methods of similarity theory and dimensionality // System Analysis in Design and Management: Proceedings of the XXIV International Scientific and Educational-Practical Conference: in 3 vol. – SPb.: Polytech-Press, 2020. – Vol. 2. –P. 121-131. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/id20-159.
18. Han H., Wang P., Liu R., Tian Ch. 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, no. 3, pp. 581-596. DOI: 10.1007/s40789-020-00329-w.
19. Koul P. Design and optimization of ventilation systems for deep underground mines // University of Belgrade – Faculty of Mining and Geology. 2025, no. 47, pp. 1-44.
20. Nosyrev M.B., Makarov V.N., Ugolnikov A.V., Makarov N.V. Modification of the technology of hydro vortex coagulation for a steady growth of the efficiency of localization of fine dispersed coal dust explosions // Sustainable Development of Mountain Territories. 2019, vol. 11, no. 2(40), pp. 221-228. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-2-221-228.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Нурхожаев Ербол Сапарбаевич – председатель правления	Nurhozhaev Erbol Saparbayevich – chairman of the board
Ахметов Рустам Гумарович – главный механик	Akhmetov Rustam Gumarovich – chief mechanic
Попов Семен Анатольевич – аспирант	Popov Semen Anatolyevich – postgraduate student
Макаров Владимир Николаевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой горной механики	Makarov Vladimir Nikolaevich – doctor of technical sciences, professor of the Department of mining mechanics
popov.semyun@bk.ru	

Получена 28.05.2026