



Оригинальная статья / Original article
УДК: 536.24
DOI: 10.21285/1814-3520-2016-10-128-134

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАЗМОЛА ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ ШК-32

© С.Д. Иванов¹, А.Н. Кудряшов², В.В. Ощепков³

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Проведение исследования влияния диаметра угольных частиц на расход электроэнергии на пылеприготовление шаровой барабанной мельницы (ШБМ) ШК-32 с целью оптимизации ее работы. **МЕТОДЫ.** Использованы численные алгоритмы многопараметрической оптимизации транспорта пылевоздушной смеси в ШБМ. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Получена целевая функция для минимизации энергозатрат на пылеприготовление в ШБМ ШК-32. Данная функция показывает возможность снижения расхода электроэнергии на 15%. **ВЫВОДЫ.** Важным фактором снижения энергозатрат на размол и пневмотранспорт является выбор оптимальной степени заполнения мельницы шарами.

Ключевые слова: оптимизация, шаровая барабанная мельница, расход электроэнергии на пылеприготовление, мощность пневмотранспорта, мощность размола, степень заполнения шарами, средний диаметр частиц угольной пыли.

Формат цитирования: Иванов С.Д., Кудряшов А.Н., Ощепков В.В. Модель оптимизации параметров размола шаровой барабанной мельницы ШК-32 // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 10. С. 128–134. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-10-128-134

OPTIMIZATION MODEL OF BC-32 BALL PULVERIZER MILL GRINDING PARAMETERS

S.D. Ivanov, A. N. Kudryashov, V.V. Oshchepkov

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

ABSTRACT. The **PURPOSE** of this paper is to study the effect of the coal particle diameter on power consumption for pulverization by the ball pulverizer mill BC-32 (ball conical) in order to optimize its operation. **METHODS.** Numerical algorithms of multi-parameter optimization of coal-air mixture transport in the ball pulverizer mill are used. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** A target function is obtained to minimize energy consumption for pulverization in the BC-32 ball pulverizer mill. This function shows the possibility to reduce energy consumption by 15%. **CONCLUSIONS.** The choice of an optimal degree of filling the mill with balls is an important factor in the reduction of energy consumption for grinding and pneumatic transport.

Keywords: optimization, ball pulverizer mill, energy consumption for coal pulverization, pneumatic transport power, grinding power, balls filling degree, average diameter of coal dust particles

For citation: Ivanov S.D., Kudryashov A.N., Oshchepkov V.V. Optimization model of BC-32 ball pulverizer mill grinding parameters. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2016. vol. 20, no.10. pp. 128–134. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2016-10-128-134

Введение

Технологические процессы измельчения угля с помощью шаровых барабанных мельниц (ШБМ) довольно энергоемки.

Так, на ТЭС расход электрической энергии на пылеприготовление составляет около 25% от общего расхода электроэнергии на

¹Иванов Сергей Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплоэнергетики Института энергетики, e-mail: ivsd55@yandex.ru

Ivanov Sergey, Candidate of Physical and Mathematical sciences, Associate Professor of the Department of Heat-Power Engineering of the Institute of Power Engineering, e-mail: ivsd55@yandex.ru

²Кудряшов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетики Института энергетики, e-mail: kan@istu.irk.ru

Kudryashov Alexander, Candidate of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Heat-Power Engineering of the Institute of Power Engineering, e-mail: kan@istu.irk.ru

³Ощепков Василий Владимирович, аспирант, e-mail: voui@mail.ru

Oshchepkov Vasily, Postgraduate, e-mail: voui@mail.ru



собственные нужды, или около 2% от общей выработки электрической энергии. Поэтому оптимизация рабочих параметров ШБМ с целью снижения этих расходов актуальна.

На работу шаровой барабанной мельницы существенное влияние оказывает режим вентиляции и затраты энергии на размол угля. При малых скоростях воздуха

вынос пыли из барабана уменьшается, происходит переизмельчение угля и понижение производительности мельницы. С усилением скорости потока воздуха производительность мельницы растет, но при этом повышаются затраты на вентиляцию вследствие увеличения среднего размера уносимых частиц угля [1].

Материал, цель и методы исследования

В данной статье рассматривается метод оптимизации рабочих параметров мельницы ШК-32 с учетом среднего диаметра частиц угольной пыли.

Оптимальный режим работы, отвечающий минимальному суммарному расходу энергии на размол $\mathcal{E}_p$ и пневмотранспорт $\mathcal{E}_{ШБМ}$, можно определить из анализа функционала, который представляет полные затраты энергии $\mathcal{E}$ на эти процессы в зависимости от среднего диаметра частиц угля:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_p + \mathcal{E}_{ШБМ} = \frac{N_p(\bar{d})}{B} + \frac{N_{ШБМ}(\bar{d})}{B} = \Phi(\bar{d}),$$

где N_p – мощность, затрачиваемая на размол угля в ШБМ; $N_{ШБМ}$ – мощность, затрачиваемая мельничным вентилятором на продувку пыли; $\bar{d}$ – средний размер угольной частицы после размола; B – производительность мельницы по сухой пыли после ШБМ.

По экспериментальным данным мощности N_b , потребляемой на вращение барабана [2], можно найти мощность N_p по уравнению из [3]

$$N_p = N_b - Q_{мех} - N_{б0}, \quad (1)$$

где $Q_{мех} = 0,7N_b$ – тепло, выделяющееся в результате работы мелющих органов;

$N_{б0} = \frac{1,86}{\eta_b} D L n_b S_b$ – мощность на вращение пустого барабана (без мелющих эле-

ментов); η_b – КПД привода; D – эквивалентный диаметр мельницы; L – длина мельницы; n_b – скорость вращения барабана; S_b – толщина стенки барабана.

Мощность, затрачиваемую на пневмотранспорт угольной пыли через ШБМ, также можно вычислить по экспериментально измеренным данным по формуле из [3]:

$$N_{ШБМ}(\bar{d}) = B \frac{\mu + 1}{\mu} \frac{\Delta p_{ШБМ}(\bar{d})}{\rho_{см} \eta_{MB}},$$

где $\mu = B/G_g$ – массовая расходная концентрация пыли; G_g – расход воздуха после сушки топлива в ШБМ [2]; $\Delta p_{ШБМ}$ – перепад давления в ШБМ [2]; $\rho_{см} = \alpha \rho_q + (1 - \alpha) \rho_g$ – плотность смеси воздуха и пыли; α – объемная доля частиц в воздухе; ρ_q – плотность частиц угольной пыли; ρ_g – плотность воздуха.

Средний диаметр частиц угольной пыли был вычислен по уравнению Розина – Раммлера:

$$R_x = e^{-bx^n}, \quad (2)$$

где R_x – остаток на каком-либо сите; b и n – опытные коэффициенты, характеризующие соответственно тонкость помола и равномерность зернового состава (показатель полидисперсности), постоянные для данного топлива и данного метода размола величины (определяются рассевом навесок пыли на двух ситах, чаще используют сита



с размером ячеек 90 и 200 мкм); x – размер частиц.

Экспериментальные значения R_{90} и R_{200} после сепаратора представлены в [2], по ним определили соответствующие значения параметров b и n .

Продифференцировав уравнение (2) по размерам частиц x , получили функцию плотности распределения частиц пыли по размерам:

$$F(b, n, x) = -dR_x / dx = nbx^{n-1}e^{-bx^n}.$$

Средний диаметр частиц

$$\bar{d} = \int_0^{x_{\max}} x F(b, n, x) dx.$$

где $x_{\max}$ – максимальный диаметр частиц (в рассматриваемом случае 0,0005 м).

Экспериментальная зависимость полного удельного расхода электроэнергии на пылеприготовление от среднего диаметра частиц угля показана на рис. 1.

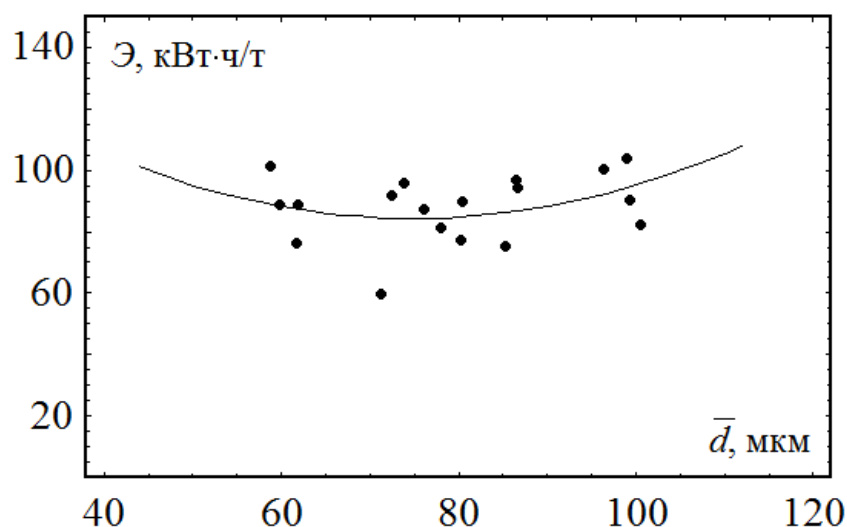


Рис. 1. Экспериментальная зависимость полного удельного расхода электроэнергии на пылеприготовление от среднего диаметра частиц угля
Fig. 1. Experimental dependence of the total specific energy consumption for coal pulverization on the average coal particle diameter

Результаты исследования и их обсуждение

Как видно из рис. 1, имеется минимум энергозатрат при определенном диаметре частиц. Далее рассмотрим пути его теоретического снижения.

Теоретическая мощность вращения барабана N_{σ}^T определяется по формуле из [3]:

$$N_{\sigma}^T = \frac{1,1}{\eta_{\sigma}} (0,127 D^3 L n_{\sigma} \gamma \psi_{\sigma} + 1,86 D L n_{\sigma} S_{\sigma}), \quad (3)$$

где γ – насыпной удельный вес шаров;
 ψ_{σ} – степень заполнения ШБМ шарами.

На рис. 2 представлено сравнение экспериментальной мощности N_{σ}^{∂} , потребляемой мельницей, и теоретической N_{σ}^T , из которого видно, что экспериментальная мощность во всех точках больше соответствующей теоретической в среднем на 10%. Следовательно, есть возможность ее снижения.

Теоретическая мощность размола N_p^T с учетом выражений (1) и (3) принимает вид

$$N_p^T = N_{\sigma}^T - Q_{\text{мех}}^T - N_{\sigma 0}. \quad (4)$$

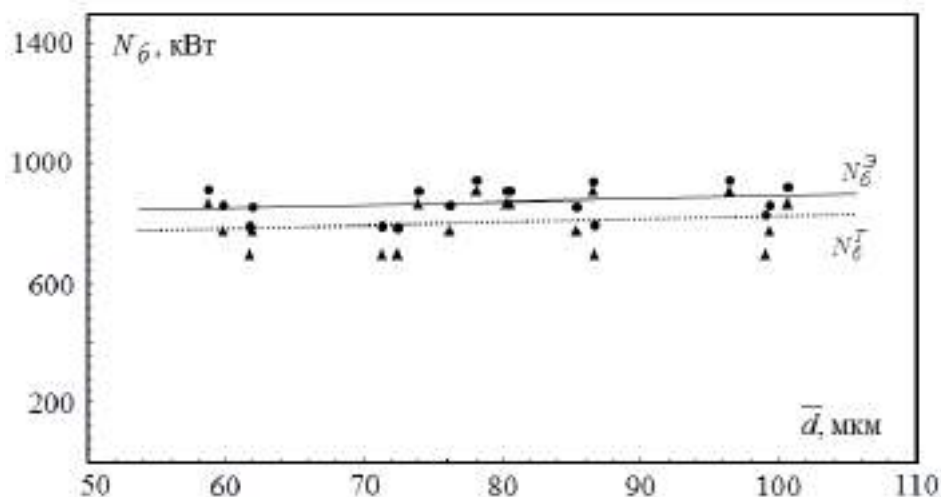


Рис. 2. Сравнение экспериментальной (●, сплошная прямая) и теоретической (▲, пунктирная прямая) мощностей вращения барабана мельницы
Fig. 2. Comparison of experimental (●, full line) and theoretical (▲, dotted line) powers of mill cylinder rotation

Чтобы получить целевую функцию, необходимо найти связь мощности N_p^T со средним диаметром частиц угольной пыли.

Полезная мощность размола идет на образование новых поверхностей пыли в результате удара (трением пренебрегаем) [4]:

$$N_{нов} = \frac{B\sigma^2}{2E\rho_u} \sum_{i=0}^n \phi^i, \quad (5)$$

где σ – предел прочности на сжатие частицы угля; E – модуль упругости материала

(модуль Юнга); $n = \frac{3}{\ln 2} \ln \left(\frac{d_0}{\bar{d}} \right)$ – число этапов измельчения от начального диаметра d_0 до конечного $\bar{d}$; $\phi = 0,98$ – доля энергии, приходящаяся на измельчение ударом.

Приняв число $n = 5-30$, можно аппроксимировать сумму в формуле (5).

Данная аппроксимация представлена на рис. 3 и имеет следующий функциональный вид:

$$\phi(\bar{d}) = -1,463 + 2,294 \left(\frac{d_0}{\bar{d}} \right)^{0,7}.$$

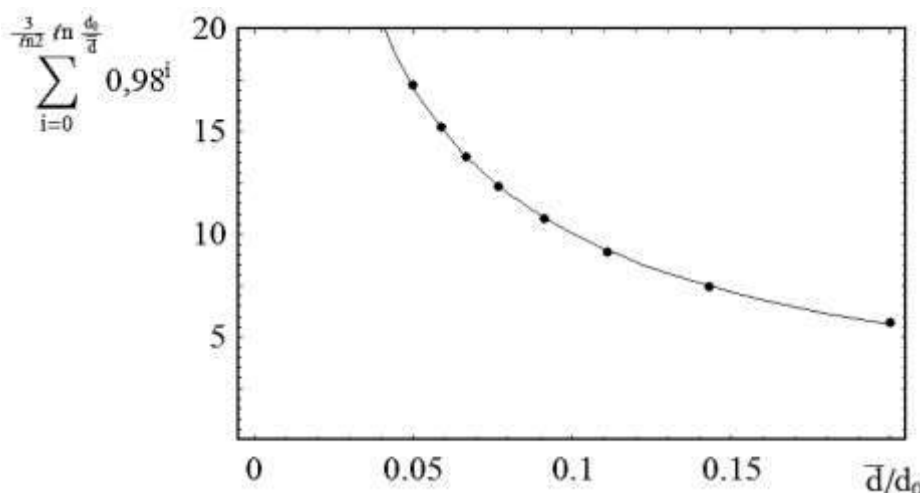


Рис. 3. Аппроксимация ступенчатой функции в (6) непрерывной зависимостью
Fig. 3. Step function approximation in (6) by a continuous dependence



Максимальный коэффициент полезного действия процесса размол, учитывая уравнения (4) и (5), можно записать так:

$$\eta_p^{max} = \frac{N_{nos}}{N_p^{T, onm}} \approx 0,0012, \quad (6)$$

где $N_p^{T, onm}$ – теоретическая оптимальная мощность размол при оптимальной степени загрузки $\psi_6^{onm} = 0,2$ [3].

Теоретическая мощность, которая расходуется на размол, в зависимости от среднего диаметра частиц пыли с учетом выражений (5) и (6) равна:

$$N_p(\bar{d}) = \frac{B\sigma^2}{2E\rho_6\eta_p^{max}} \sum_{i=0}^{\frac{3}{\ell n 2} \ln \left(\frac{d_0}{\bar{d}} \right)} \phi^i. \quad (7)$$

Теоретическую мощность, затрачиваемую на пневмотранспорт угольной пыли через ШБМ, можно найти из теоретического перепада давления на ШБМ $\Delta p_{ШБМ}^T$:

$$N_{ШБМ}^T(\bar{d}) = B \frac{\mu + 1}{\mu} \frac{\Delta p_{ШБМ}^T(\bar{d})}{\rho_{cm} \eta_{MB}}. \quad (8)$$

Перепад давлений в мельнице состоит из двух частей: перепад давления Δp_{mp} при транспорте смеси пыли и воздуха и перепад давления $\Delta p_{инж}$ при инъекции измельченных частиц в основной поток:

$$\Delta p_{ШБМ}^T(\bar{d}) = \Delta p_{mp}(\bar{d}) + \Delta p_{инж}(\bar{d}). \quad (9)$$

В [5] получены критериальные уравнения для этих составляющих перепада давлений в ШБМ. В несколько модернизированном виде перепад давлений, связанный с транспортом газозвеси, равен:

$$\Delta p_{mp}(\bar{d}) = \frac{1,214 \cdot 10^{11}}{Re_6^{1,5}} \times \sqrt{\frac{\mu}{1 + \mu}} \left(\frac{D}{L} \right)^3 \frac{\rho_6 w_6^2(\bar{d})}{2}, \quad (10)$$

где $w_6 = \frac{4G_6(\bar{d})}{\pi D^2 \rho_6}$ – скорость воздуха;

$Re_6 = \frac{4G_6(\bar{d})}{\pi D \eta_6}$ – число Рейнольдса; η_6 –

динамическая вязкость воздуха.

Потери давления на инъекцию измельченных частиц в основной поток в [5] функционально были связаны со средним квадратом скорости витания частиц угля, но эта скорость зависит от диаметра частиц. Поэтому получена новая формула для потерь давления на инъекцию частиц в поток в зависимости от среднего диаметра полидисперсной угольной пыли на выходе из сепаратора:

$$\Delta p_{инж}(\bar{d}) = 2,78 \cdot 10^7 \mu^{1,5} \times \left(\frac{\bar{d}}{d^*} \right)^{0,379} \left(\frac{D}{L} \right)^{20} (1 + \mu) \frac{\rho_6 w_6^2}{2}, \quad (11)$$

где $d^* = (v_6 / w_{6u})$ – характерный диаметр частиц при $Re = w_{6u} d^* / v_6 = 1$; w_{6u} – скорость витания частиц; v_6 – кинематическая вязкость воздуха.

Средняя скорость витания частиц определяется следующим образом [5]:

$$w_{6u} = \int_0^{x_1} w_{6u1}(x) F(b, n, x) dx + \int_{x_1}^{x_{max}} w_{6u2}(x) F(b, n, x) dx,$$

где $w_{6u1}(x) = \frac{1}{18} g x^2 \frac{\rho_6}{\rho_6 v_6}$ – скорость витания при $Re_{6u} \leq 0,2$; $Re_{6u} = \frac{w_{6u} x}{v_6}$ – число

Рейнольдса по скорости витания;

$w_{6u2}(x) = \frac{Re_{6u2} x}{v_6}$ – скорость витания при

$0,1 \leq Re_{6u} \leq 4000$;

$Re_{6u2} = (0,568 + 0,133 Re_{6u0}^2 + 0,00045 Re_{6u0}^4)^2$ –

число Рейнольдса по скорости витания w_{6u2} ; $Re_{6u0} = w_{6u0} x / v_6$ – число Рейнольдса



по скорости витания;
 $w_{eu0} = 1,155 \sqrt{g x (\rho_q - \rho_g) / \rho_g}$; x – диаметр частиц;
 $x_1 = (0,2 \cdot 18 \rho_g v_g^2 / (\rho_q g))^{0,33}$ – граничное значение диаметра частиц при $Re_{eu} = 0,2$; x_{max} – максимальный диаметр частиц (в рассматриваемом случае 0,0005 м).

Подставляя (10) и (11) в (9), а затем в (8) и учитывая (7), получаем функционал для минимизации энергозатрат на размол и пневмотранспорт газовзвеси в ШБМ:

$$\Phi(\bar{d}) = \frac{\sigma^2}{2E\rho_q\eta_p} \phi(\bar{d}) + \\ + \frac{1}{\mu\eta_{MB}} \left[\frac{1,214 \cdot 10^{11}}{Re_g^{1,5}} \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \left(\frac{D}{L}\right)^3 + \right. \\ \left. 2,78 \cdot 10^7 \mu^{1,5} (1+\mu) \left(\frac{\bar{d}}{d^*}\right)^{0,379} \left(\frac{D}{L}\right)^{20} \right] \frac{w_g^2}{2}.$$

На рис. 4 представлены экспериментальная зависимость полного удельного расхода электроэнергии на пылеприготовление $\mathcal{E}$ и теоретического функционала Φ от среднего диаметра частиц угля.

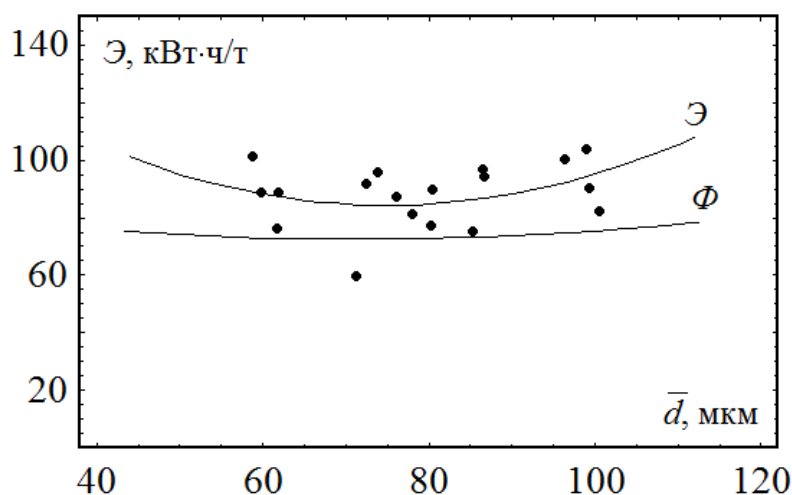


Рис. 4. Зависимость энергозатрат от среднего диаметра частиц угля
 Fig. 4. Energy consumption dependence on average coal particle diameter

Заключение

Из рис. 4 видно, что по экспериментальным точкам минимальный расход электроэнергии равен 84,3 кВт·ч/т, при этом значение среднего диаметра равно 75,1 мкм, а по теоретическому расчету расход электроэнергии – 71,4 кВт·ч/т, средний диаметр – 72,3 мкм. Разница в энергозатратах между теоретическим и экспериментальным расчетами составляет порядка 15%.

В эксперименте [2] мощность $N_{oi}^{\mathcal{E}}$, потребляемая на вращение барабана, изменялась в диапазоне от 720 до 950 кВт в зависимости от степени заполнения ШБМ шарами $\psi_{bi} = 0,191; 0,231; 0,263; 0,3;$

0,318, при этом $\psi_{onm} \approx 0,2$ для данного типа брони. Теоретическая мощность, рассчитанная по уравнению (5), равна 660 кВт. Имеются два фактора, которые влияют на увеличение энергозатрат при размоле топлива:

- степень заполнения ШБМ шарами;
- мощность на вращение барабана, измеренная в эксперименте, больше мощности, рассчитанной по уравнению (3) во всех измерениях, $N_{oi}^{\mathcal{E}}(\psi_{bi}) > N_o^T$ (см. рис. 2).

Сформулируем основные результаты:



– получена функция для минимизации энергозатрат на размол угля и пневмотранспорта в ШБМ ШК-32;

– предварительные оценки показывают, что теоретически рассчитанные энергозатраты ниже экспериментальных на 15%.

Библиографический список

1. Левит Г.Т. Пылеприготовление на тепловых электростанциях. М.: Энергоатомиздат, 1990. 384 с.
2. Елизаров В.В., Сеннов В.С. Отчет по тепловым испытаниям котла ТП-81 и пылесистемы 5А Иркутской ТЭЦ-9. Иркутск: РЭУ «Иркутскэнерго», 1970. 234 с.
3. Соколов Н.В., Кисельгоф М.Л. Расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов. Л.: ОНТИ ЦКТИ, 1971. 312 с.
4. Guangbin Dr.Yu., Кузнецова М.М., Мараховская М.Б., Алексина А.А. Определение энергозатрат на

- измельчение твердых материалов // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 5. С. 145–147.
5. Иванов С.Д., Кудряшов А.Н., Ощепков В.В. Математическая модель аэродинамического сопротивления шаровой барабанной мельницы при транспорте угольной газовзвеси // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: материалы IX Всероссийской конференции с международным участием (Новосибирск, 16–18 ноября 2015 г.). Новосибирск, 2015. С. 106–110.

References

1. Levit G.T. Pyleprigotovlenie na teplovyh ehlektrostanciyah. [Pulverization in thermal power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 384 p. (In Russian)
2. Elizarov V.V., Sennov V.P. Otchet po teplovym ispytaniyam kotla TP-81 i pylesistemy 5A Irkutskoj TEC 9 [Report on the thermal tests of TP-81 boiler and 5A coal pulverization system of Irkutsk CHP 9]. Irkutsk, REU "Irkutskenergo" Publ., 1975, 234 p. (In Russian)
3. Sokolov N. V., Kisel'gof M. L. Raschet i proektirovanie pyleprigotovitel'nyh ustanovok kotel'nyh agregatov [Calculation and design of boiler unit pulverization plants]. Leningrad, ONTI CKTI Publ., 1971, 312 p. (In Russian)
4. Guangbin Dr. Yu., Kuznecova M.M., Marahovskaya M.B., Aleksina A.A. Opredelenie energozatrat na iz-

- mel'chenie tverdyh materialov [Determination of energy consumption for solid material grinding]. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics]. 2015, vol. 85, no. 5, pp. 145–147. (In Russian)
5. Ivanov S.D., Kudryashov A.N., Oshchepkov V.V. Matematicheskaya model' aehrodinamicheskogo soprotivleniya sharovoj barabannoj mel'nicy pri transporte ugol'noj gazovzvеси [Mathematical model of ball cylindrical mill aerodynamic resistance under the coal gas suspension transport]. Materialy IX Vserossiyskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Gorenie topliva: teoriya, eksperiment, prilozheniya" [Proceedings of the IX All-Russian Conference with International Participation "Fuel combustion: theory, experiment, application"]. Novosibirsk, 2015, pp. 106–110. (In Russian)

Критерии авторства

Иванов С.Д., Кудряшов А.Н., Ощепков В.В. исследовали влияние диаметра угольных частиц на расход электроэнергии на пылеприготовление шаровой барабанной мельницы ШК-32 с целью оптимизации ее работы, провели обобщение и написали рукопись. Ощепков В.В. несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Ivanov S.D., Kudryashov A.N., Oshchepkov V.V. studied the influence of the coal particle diameter on power consumption for the dust preparation by the ball pulverizer mill BC-32 in order to optimize its operation. They summarized the material and wrote the manuscript. Oshchepkov V.V. bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 16.08.2016 г.

The article was received 16 August 2016