

## Исследование процесса ударного измельчения угля в пневмотранспортной измельчительной установке

Г.И. Нечаев, С.В. Ленич, В.А. Турушин

Луганский государственный университет им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: ttsnu@meta.ua

*Рассмотрены эффективные и энергосберегающие способы измельчения угля в системах пылеприготовления на тепловых электростанциях. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований измельчения антрацита в пневмотранспортной измельчительной установке. Исследовано влияние основных факторов на работу, непосредственно затрачиваемую на процесс измельчения антрацита. Получен эмпирический коэффициент использования работы разрушения частиц. Относительное расхождение теоретических и экспериментальных результатов не превышает 10 %, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели измельчения антрацита в пневмотранспортной измельчительной установке реальным процессам.*

**Ключевые слова:** *измельчение, пылеприготовление, антрацит, пневмотранспорт, удельная поверхность, мельница.*

## Research Results of Coal Impact Grinding Process in the Pneumatic Transport Mill

G.I. Nechayev, S.V. Lenich, V.A. Turushin

Dahl Lugansk State University, Lugansk  
e-mail: ttsnu@meta.ua

*The paper is devoted to the topic of current interest in developing the effective and energy saving methods of coal powder processing in the thermal power stations. One of the effective thin grinding methods is solid particles impact on a hard balk. This method can be implemented by the air stream particle acceleration and the particles impact on the angle pipes dash elements of a pneumatic transport mill. This device is designated for coal powder processing systems and makes it possible to combine the coal grinding and pneumatic transporting processes. The article looks at theoretical and experimental research results of anthracite grinding in the laboratory pneumatic transport mill and investigates the influence of the main factors on anthracite grinding process. We found that the air-coal mixture velocity, the angle of pipe's turn in the transport pipeline, the mass concentration and the primary specific surface area of the grinded material contribute to the increase in specific surface area. The destruction work coefficient of the obtained particles allowed us to define the energy which is directly spent on coal grinding. The relative divergence of theoretical and experimental results doesn't exceed 10 % that testifies to adequacy of the developed mathematical model to real processes of anthracite grinding in the pneumatic transport mill.*

*Keywords: grinding, coal powder processing, anthracite, pneumatic transport, specific surface area, mill.*

Современное состояние энергоресурсов во многих отраслях промышленности характеризуется резким увеличением стоимости потребляемой электроэнергии, в том числе из-за увеличения расходов на ее производство на тепловых электростанциях. Главная составляющая таких расходов обусловлена низкой эффективностью процессов пылеприготовления, осуществляющих измельчение угля в традиционных шаровых барабанных мельницах. Одним из направлений совершенствования технологии пылеприготовления является использование эффекта измельчения материалов при пневмотранспортировании.

Наиболее перспективными для эффективного измельчения сыпучих материалов являются устройства, в которых реализуются струйные (газоструйные) и пневматические способы измельчения [1–3]. Однако внедрение новых конструкций мельниц, использующих этот принцип, возможно лишь при предварительном проведении теоретических и экспериментальных исследований процесса измельчения угля в разрабатываемых устройствах и выявлении закономерностей измельчения материала.

Принцип действия пневматических и струйных мельниц основан на использовании энергии сжатого газа, который при расширении приобретает высокую скорость, используемую для разгона частиц измельчаемого материала. Разрушение частиц происходит в результате столкновения их друг с другом или с препятствием.

Этот способ позволяет также использовать избирательное измельчение многокомпонентных смесей различных материалов. Преимуществами этих устройств являются низкая материалоемкость, максимально четкая классификация частиц по размерам, возможность совмещения измельчения с другими процессами (транспортирование, сушка), отсутствие подвижных частей [4].

Целью работы является исследование влияния основных конструктивных и технологических факторов на эффективность процесса измельчения антрацита в пневмотранспортной измельчительной установке.

**Материалы и результаты исследования.** В мельницах ударного действия часть работы разрушения материала затрачивается на преодоление сцепления и трения частицами между собой, придание разделяющимся частицам кинетической энергии и т. д. С увеличением дисперсности порошка число контактов и вторичных структур в нем возрастают и соответственно повышается его сопротивляемость удару [5]. К тому же дисперсность пыли и концентрация аэросмеси определяют характер взаимодействия (столкновений) частиц друг с другом в потоке воздуха. Точный учет приведенных факторов достаточно сложен. Значение коэффициента пропорциональности между значениями удельной поверхности материала до и после разрушения зависит от

природы материала и условий разрушения, в частности от энергии воздействия (в случае измельчения ударом) [5].

Часть энергии, непосредственно затрачиваемая на образование новых поверхностей, может быть определена с помощью коэффициента  $k_{\text{см}}$  использования работы разрушения частиц, введенного в выражение, полученное по результатам теоретических исследований [6–7]:

$$\Delta S_m = \frac{k_{\text{см}}}{2k_r} \left[ V_{\text{см}}^2 \cos^2 \alpha (1 - k_b^2) - \frac{\sigma_p^2 g}{E \rho_{\text{ч}}} \right], \quad (1)$$

где  $\Delta S_m$  — прирост удельной поверхности;  $k_{\text{см}}$  — коэффициент использования работы разрушения частиц;  $k_r$  — эмпирический коэффициент пропорциональности, представляющий собой удельную работу на образование единицы новой поверхности;  $V_{\text{см}}$  — скорость аэросмеси;  $\alpha$  — угол между нормалью к неподвижной поверхности и направлением удара (угол атаки), зависящий от угла поворота колена  $\delta$ , при этом  $\alpha = 90^\circ - \delta$ ;  $k_b$  — коэффициент восстановления при ударе, зависящий от формы и физико-механических свойств соударяемых тел,  $0 < k_b < 1$ ;  $\sigma_p$  — предельное напряжение упругих деформаций (предел прочности материала);  $g$  — ускорение свободного падения;  $E$  — модуль Юнга;  $\rho$  — удельный вес материала.

В работе [8] приведены результаты экспериментальных исследований и получено уравнение

$$\Delta S_{m_i} = -2,66 + 0,2165 V_{\text{см}} + 0,06 \delta - 1,7875 \mu - 0,2 \left[ S_{m_0} + \sum_{i=2}^n \Delta S_{m_{i-1}} \right], \quad (2)$$

где  $\Delta S_{m_i}$  — прирост удельной поверхности после  $i$ -го удара (цикла измельчения);  $\delta$  — угол поворота колена трубопровода;  $\mu$  — массовая концентрация аэросмеси;  $S_{m_0}$  — первоначальная удельная поверхность материала;  $i$  — номер удара (цикла измельчения);  $n$  — число ударов (циклов измельчения).

Влияние основных факторов на коэффициент  $k_{\text{см}}$  может быть изучено на основании результатов экспериментальных исследований. Подставляя экспериментальные значения прироста удельной поверхности  $\Delta S_m$  в зависимость (1), рассчитали значения коэффициента  $k_{\text{см}}$ . В результате обработки полученных данных найдена его зависимость от основных факторов

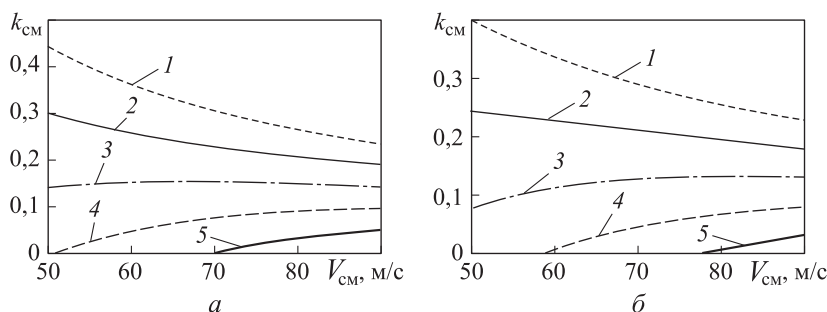
$$k_{\text{см}} = \frac{22}{V_{\text{см}} \sin \delta} \left( 1 - \frac{S_m}{S_{m \text{ max}}} \right), \quad (3)$$

где  $S_m$  — удельная поверхность угольной пыли перед коленом (ударом об отбойную плиту);  $S_{m \max}$  — максимальная удельная поверхность частиц, которая может быть получена при определенном сочетании факторов.

Согласно [8], запишем

$$S_{m \max} = -13,3 + 1,08V_{\text{см}} + 0,3\delta - 8,94\mu. \quad (4)$$

На рис. 1 приведен график зависимости коэффициента  $k_{\text{см}}$  от скорости  $V_{\text{см}}$  движения аэросмеси для различной удельной поверхности  $S_m$  угольной пыли при ударе об отбойную плиту.



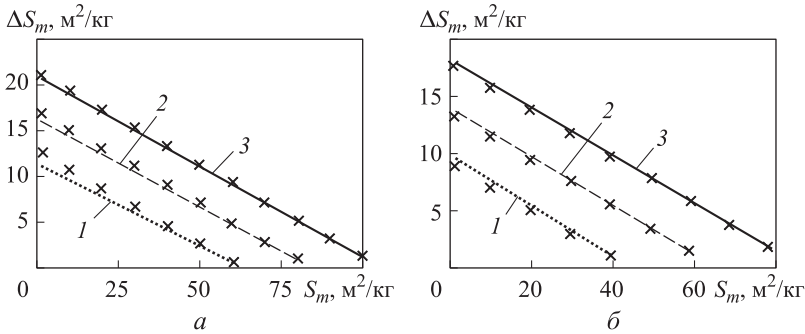
**Рис. 1.** График зависимости  $k_{\text{см}} = f(V_{\text{см}})$  при  $\delta = 60^\circ$ ,  $\mu = 1,0$  кг/кг (а) и  $\delta = 75^\circ$ ,  $\mu = 1,5$  кг/кг (б):

1 —  $S_m = 1$  м<sup>2</sup>/кг; 2 —  $S_m = 20$  м<sup>2</sup>/кг; 3 —  $S_m = 40$  м<sup>2</sup>/кг; 4 —  $S_m = 60$  м<sup>2</sup>/кг; 5 —  $S_m = 80$  м<sup>2</sup>/кг

Как видно на рис. 1, при удельной поверхности пыли  $S_m = 40$  м<sup>2</sup>/кг в интервале скорости движения аэросмеси  $V_{\text{см}} = 75 \dots 90$  м/с коэффициент  $k_{\text{см}}$  остается постоянным. Такое сочетание факторов и точки пересечения кривых с осью абсцисс указывают на скорость движения аэросмеси, при которой измельчения угля происходить не будет.

Сравнение значений прироста удельной поверхности  $\Delta S_m$ , рассчитанных по теоретической зависимости (1) с учетом (3) и по экспериментальному уравнению (2), приведено на рис. 2. Физико-механические характеристики исследуемого антрацита следующие:  $\sigma_p = 25$  МПа,  $E = 7000$  МПа,  $\rho = 16\,700$  Н/м<sup>3</sup>. Значение эмпирических коэффициентов:  $k_r = 45$  Дж/м<sup>2</sup>,  $k_B = 0,21$ .

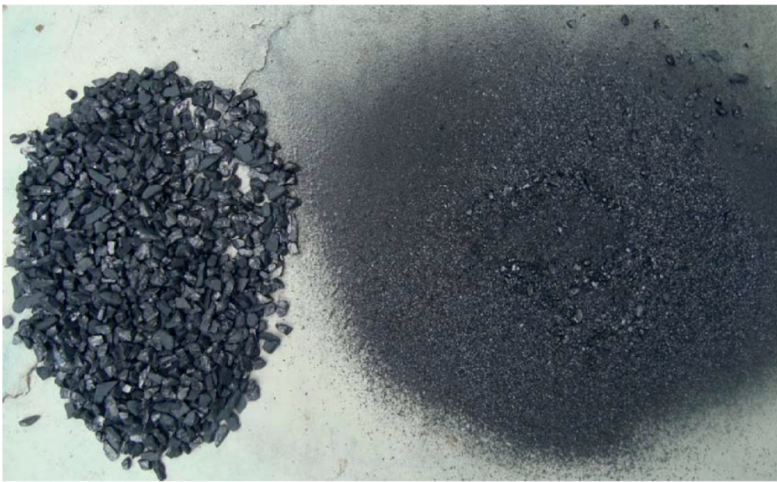
Относительное расхождение результатов не превышает 10 %, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели реальным процессам измельчения антрацита в пневмотранспортной измельчительной установке.



**Рис. 2.** График зависимости  $\Delta S_m = f(S_m)$  при  $\delta = 90^\circ$ ,  $\mu = 0,5$  кг/кг (а) и  $\delta = 60^\circ$ ,  $\mu = 1,5$  кг/кг (б):

1, 2, 3 — математическая модель (1); × — экспериментальная зависимость (2)

Проведенные исследования показали полную работоспособность предложенных устройств (рис. 3), значительное снижение энергоемкости процесса измельчения угля, достаточную производительность при необходимой тонкости помола.



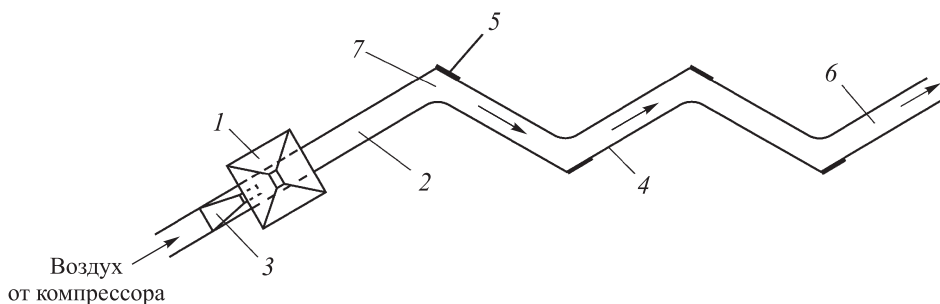
**Рис. 3.** Порция антрацита, измельченная (после одного удара) в пневмотранс-портной измельчительной установке

Расчеты системы приготовления пыли в пневмотранспортной измельчительной установке (тонкость готовой пыли  $R_{90} \approx 8$  %) с 8–10 коленами показали, что общее сопротивление составляет не более 0,15 МПа, при этом удельные затраты электроэнергии 27...28 кВт · ч/т, что уменьшает в 1,4–1,5 раза энергозатраты.

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований дали возможность разработать конструкции пневмотранспортных измельчительных установок.

**Конструкции пневмотранспортных измельчительных установок.** На кафедре «Транспортные системы» ЛГУ им. В. Даля разработаны два варианта конструкции пневмотранспортной измельчительной установки. В качестве одного из вариантов предложено устройство в виде зигзагообразного измельчительного трубопровода. Устройство защищено патентом [9]. Предложенный способ измельчения может быть реализован путем вставки пневмотранспортной измельчительной установки в линейную часть трубопроводов, транспортирующих уголь.

На рис. 4 приведена пневмотранспортная измельчительная установка в виде зигзагообразного трубопровода. Исходный материал из загрузочного устройства 1 поступает в разгонную трубу 2, где подхва-



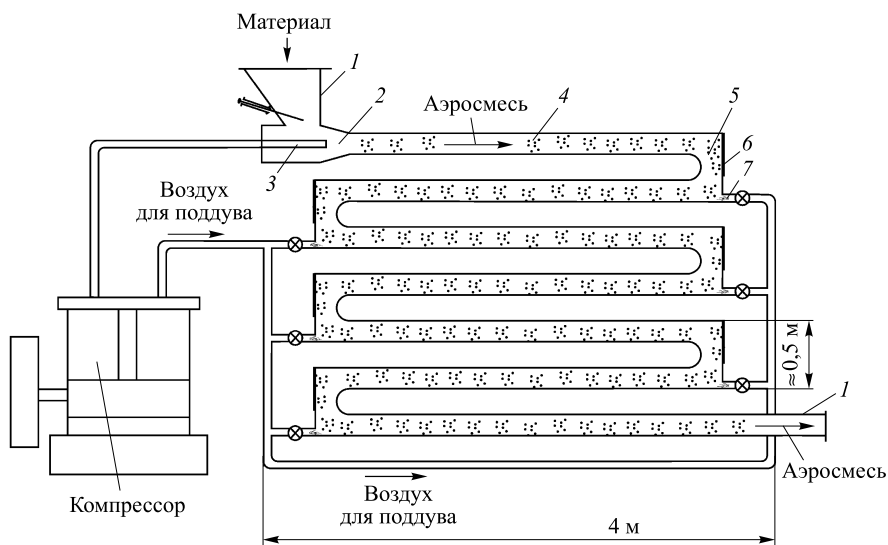
**Рис. 4.** Пневмотранспортная измельчительная установка в виде зигзагообразного трубопровода (вид сверху):

1 — бункер; 2 — разгонная труба; 3 — сопло; 4 — измельчительный трубопровод; 5 — отбойная плита; 6 — выводная труба; 7 — колено трубопровода

тывается струей сжатого воздуха, выходящего из сопла 3. Частицы разгоняются до необходимой скорости и поступают в измельчительный трубопровод 4, где измельчаются при прохождении через колено 7. Измельчение материала происходит при ударе частиц об отбойные плиты 5. Измельченный продукт выносится воздушным потоком через выводную трубу 6.

Путь непрерывного движения материала в предлагаемом устройстве во много раз больше, чем в существующих пневматических мельницах. Степень измельчения регулируется скоростью потока, числом колен и углом поворотов зигзагообразной измельчительной трубы. Конструкция предлагаемого устройства чрезвычайно проста и позволяет совместить процессы пневмотранспортирования и измельчения материала.

Вторым конструктивным вариантом пневмотранспортной измельчительной установки является вертикальный измельчительный змеевик (рис. 5). Это устройство функционирует как самостоятельный измельчитель — без установки в линейную часть трубопроводов. Измельчаемый уголь может пропускаться через сепаратор для обогащения и накапливаться в разгрузочных устройствах (бункере и т. п.) [10].



**Рис. 5.** Общий вид пневмотранспортной измельчительной установки (вертикальный змеевик)

Исходный материал из загрузочного устройства 1 поступает в эжектор 2, в который подается сжатый воздух из сопла 3. Частицы измельчаемого материала, подхватываемые струей воздуха (газа), попадают в разгонную трубу 4, где разгоняются до необходимой скорости и поступают в П-образное колено 5 вертикального змеевика.

Измельчение материала происходит в П-образном колене 5 при ударе частиц об отбойную плиту 6. Измельченные частицы материала направляются для последующего измельчения в трубопровод благодаря подаче новой порции воздуха, поступающего из дополнительного сопла 7 для поддува воздуха. Материал опять разгоняется и измельчается в П-образном колене. Процесс измельчения длится до получения частиц материала необходимого размера. Готовый продукт выносится воздушным потоком через выводную трубу 8 в разгрузочное устройство.

Выполнение П-образного колена с проставкой, равной диаметру трубопровода ( $l \approx D_{\text{тр}}$ ), и закругленными внутренними кромками способствует повороту потока почти без отрыва и с малыми потерями давления. Поэтому коэффициент сопротивления такого П-образного колена будет минимальным.

Конструкция П-образного колена в предлагаемом измельчителе позволяет материалу после измельчения под действием силы тяжести выводиться из зоны удара, что уменьшает проникновение отраженных частиц в набегающий поток. Наличие дополнительных сопел для поддува воздуха в нижней части П-образных колен препятствует завалу материала и увеличивает скорость аэросмеси после каждого поворота. Это приводит к увеличению кинетической энергии частиц при ударе об отбойные плиты и повышению эффективности работы устройства в целом.

Степень измельчения регулируется скоростью потока и числом П-образных колен змеевика.

**Заключение.** 1. Проведенные исследования позволили установить влияние скорости аэросмеси, угла поворота колена транспортного трубопровода, массовой концентрации и первоначальной удельной поверхности измельчаемого материала на прирост удельной поверхности при измельчении антрацита в коленах пневмотранспортной измельчительной установки.

2. Получен эмпирический коэффициент использования работы разрушения частиц, позволяющий определить часть энергии, непосредственно затрачиваемую на измельчение антрацита.

3. По результатам проведенных исследований разработаны конструкции пневмотранспортных измельчительных установок, совмещающих процессы измельчения и транспортирования материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Росляк А.Т., Бирюков Ю.А., Пачин В.Н. Пневматические методы и аппараты порошковой технологии. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. 272 с.
2. Gommeren H.J.C. Study of a Closed Circuit Jet Mill Plant Using On-line Particle Size Measurements. Delft University Press, 1997. 218 p.
3. Modzik A.E. Jet Mill Evaluation for Coal Dust Inhalation Studies. West Virginia University, 1994. 144 p.
4. Булгаков С.Б. Струйная противоточная мельница с дополнительным подводом энергоносителя: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2002. 186 с.
5. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 307 с.
6. Турушин В.О., Ленич С.В. Закономірності руйнування сипких матеріалів в подрібнювачах ударної дії // Вісник СНУ ім. В. Даля. 2009. № 5 (135). С. 11–15.
7. Turushin V., Lenich S. An Investigation of the Process of Anthracite Particles Destruction in Percussion Crushing Machines // Teka Kom. Mot. i Energ. Roln. OL PAN. 2010. 10B. P. 260–265.
8. Ленич С.В., Турушин В.А. Анализ результатов экспериментальных исследований измельчения антрацита в пневмотранспортной измельчающей установке // Вісник СНУ ім. В. Даля. 2012. № 6 (177) Ч. 2. С. 281–288.
9. Патент 44274 Україна, МПК (2009) кл. В02С 19/00, В02С 23/06. Подрібнювач / В.О. Турушин, Г.І. Нечаєв, С.В. Ленич; заявл. 05.05.2009; опубл. 25.09.2009, Бюл. № 18.
10. Патент 101529 Україна, МПК (2013.01) кл. В02С 19/06, В02С 23/00. Газоструминний подрібнювач / В.О. Турушин, С.В. Ленич; заявл. 23.05.2011; опубл. 10.04.2013. Бюл. № 7.

## REFERENCES

- [1] Roslyak A.T., Biryukov Yu.A., Pachin V.N. Pnevmaticheskie metody i apparaty poroshkovoy tekhnologii [Pneumatic Methods and Devices of Powder Technology]. Tomsk, Tomsk University Publ., 1990. 272 p.
- [2] Gommeren H.J.C. Study of a Closed Circuit Jet Mill Plant Using On-line Particle Size Measurements. Delft University Press, 1997. 218 p.
- [3] Modzik A.E. Jet Mill Evaluation for Coal Dust Inhalation Studies. West Virginia University, 1994. 144 p.



- [4] Bulgakov S.B. Struynaya protivotochnaya mel'nitsa s dopolnitel'nym podvodom energonosatelya. Diss. kand. tekhn. nauk [Jet Counterflow Mill with an Additional Supply of the Energy Carrier. Cand. tech. sci. diss.]. Belgorod, 2002.
- [5] Hodakov G.S. Fizika izmel'cheniya [Physics of Grinding]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 307 p.
- [6] Turushin V.O., Lenich S.V. The Patterns of Destruction of the Friable Materials in the Grinders with Blowing Action. *Visnik SNU im. V. Dalya* [Herald of the Dahl East Ukrainian National University], 2009, no. 5, pp. 11–15 (in Ukr.).
- [7] Turushin V., Lenich S. An Investigation of the Process of Anthracite Particles Destruction in Percussion Crushing Machines. *Teka Kom. Mot. i Energ. Roln. OL PAN*, 2010, 10B, pp. 260–265.
- [8] Lenich S.V., Turushin V.A. The Analysis of the Results of Experimental Researches of Anthracite Grinding in the Pneumatic Transport Mill. *Visnik SNU im. V. Dalya*. [Herald of the Dahl East Ukrainian National University], 2012, no. 6, iss. 2, pp. 281–288 (in Russ.).
- [9] Turushin V.O., Nechaev G.I., Lenich S.V. Patent 44274 Ukraine, ICL B02C 19/00, B02C 23/06. Crusher. Date of Patent: 25.09.2009.
- [10] Turushin V.O., Lenich S.V. Patent 101529 Ukraine, ICL B02C 19/06, B02C 23/00. Jet Crusher. Date of Patent: 10.04.2013.

Статья поступила в редакцию 24.09.2015

Нечаев Григорий Иванович — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Транспортные системы» Луганского государственного университета им. В. Даля (91034, г. Луганск, Молодежный квартал, д. 20а).

Nechayev G.I. — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Transport Systems Department, Dahl Lugansk State University (Molodezhnyy kvartal 20a, Lugansk, 91034).

Ленич Сергей Васильевич — старший преподаватель кафедры «Транспортные системы» Луганского государственного университета им. В. Даля (91034, г. Луганск, Молодежный квартал, д. 20а).

Lenich S.V. — Senior Lecturer of Transport Systems Department Dahl Lugansk State University (Molodezhnyy kvartal 20a, Lugansk, 91034).

Турушин Владимир Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Транспортные системы» Луганского государственного университета им. В. Даля (91034, г. Луганск, Молодежный квартал, д. 20а).

Turushin V.A. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Transport Systems Department, Dahl Lugansk State University (Molodezhnyy kvartal 20a, Lugansk, 91034).

### **Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Нечаев Г.И., Ленич С.В., Турушин В.А. Исследование процесса ударного измельчения угля в пневмотранспортной измельчительной установке // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 3. С. 131–139. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-131-139

### **Please cite this article in English as:**

Nechayev G.I., Lenich S.V., Turushin V.A. Research Results of Coal Impact Grinding Process in the Pneumatic Transport Mill. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 3, pp. 131–139. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-131-139