

Анализ энергетической эффективности процесса измельчения на основе термодинамического подхода

А.Н. Беляков¹, В.П. Жуков¹, Н. Otwinowski², Д.В. Тупицын¹

¹ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

² Institute of Thermal Machinery, Częstochowa University of Technology, Częstochowa, Poland
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Для оценки эффективности процесса измельчения порошкообразных материалов традиционно используются подходы, которые оперируют с частицами ограниченного диапазона крупности при их измельчении в ограниченном числе типов помольного оборудования. В связи с этим разработка универсального критерия оценки энергетической эффективности процесса измельчения является актуальной задачей.

Методы и материалы: Описание процесса измельчения и оценка его энергоэффективности проводятся на основе феноменологического, или термодинамического, подхода, оперирующего фундаментальными термодинамическими характеристиками измельчаемого материала и построенного на аналогии между процессами измельчения и сублимации.

Результаты: На основе термодинамического подхода и предложенной физической аналогии между процессами измельчения и сублимации разработан и апробирован универсальный критерий оценки энергоэффективности процесса измельчения, который применим для сопоставления процессов измельчения частиц различной крупности в мельничном оборудовании различного типа.

Выводы: На основе предложенного универсального критерия оценки энергоэффективности измельчения стали возможны постановка и решение задач по совершенствованию процессов измельчения и помольного оборудования для энергетической и смежных отраслей промышленности.

Ключевые слова: энергосбережение, критерий эффективности, измельчение частиц, сублимация, энергетический закон, энтальпия.

Analysis of grinding energy efficiency based on the thermodynamic approach

A.N. Belyakov¹, V.P. Zhukov¹, N. Otwinowski², D.V. Tupitzyn¹

¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia

² Institute of Thermal Machinery, Częstochowa University of Technology, Częstochowa, Poland
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Abstract

Background: All known approaches to estimating powder material grinding efficiency deal with a limited range of particle sizes and a limited number of grinding equipment classes. Therefore, it is urgent to develop a universal criterion to the estimation of grinding efficiency.

Methods and materials: The description of the grinding process and estimation of its energy efficiency are based on the phenomenological or thermodynamic approach using the fundamental thermodynamic characteristics of materials to be ground and based on the analogy between grinding and sublimation.

Results: Based on the thermodynamic approach and the proposed analogy between grinding and sublimation, we have developed a universal criterion of grinding efficiency that can be used to compare the process of grinding particles of different sizes in different types of equipment.

Conclusions: The proposed criterion of grinding efficiency evaluation makes it possible to state and solve problems of improving the grinding processes and equipment in power industry and related areas.

Key words: energy saving, efficiency criterion, grinding, sublimation, energy law, enthalpy.

Ранее нами было предложено описание кинетики процесса измельчения в рамках феноменологического, или термодинамического, подхода [1], в основу которого положена физическая аналогия между процессами измельчения и сублимации [2, 3]. Предложенная аналогия позволила существенно сократить объем эмпирической информации, необходимой для расчета процесса измельчения, за счет использования табличных характеристик физических свойств измельчаемого материала. Ниже сделана попытка на основе термодинамического подхода

разработать критерий оценки энергетической эффективности измельчения, позволяющий сравнивать процессы измельчения частиц различной крупности, включая наноразмерные порошки, а также использовать этот критерий для совершенствования технологического оборудования. Актуальность разработки такого критерия и его использования для оценки эффективности измельчения связана с необходимостью ставить и решать задачи комплексной оптимизации порошковых технологий с точки зрения обеспечения максимального энергосбережения.

Целью исследования является выбор и обоснование универсального критерия энергетической эффективности измельчения, а также разработка методики для его определения.

Для достижения цели последовательно решаются следующие задачи:

- разработка на основе аналогии между процессами измельчения и сублимации универсального критерия для оценки энергетической эффективности измельчения порошкообразных материалов, при расчете которого существенно снижается объем эмпирической информации за счет использования табличных характеристик физических свойств измельчаемого материала;

- выбор и обоснование набора исходных данных, разработка методики расчета критерия эффективности измельчения как монофракционных, так и полифракционных порошков;

- с использованием предложенной методики проведение анализа энергетической эффективности процесса измельчения в лабораторных и промышленных установках.

Объектом исследования является процесс измельчения, предметом исследования – критерий оценки энергетической эффективности процесса измельчения, разработанный в рамках термодинамического подхода.

При термодинамическом подходе к описанию процесса измельчения [1, 4] в качестве параметра, характеризующего крупность частиц измельчаемого порошка, предлагается использовать средний размер зерен, который может определяться с использованием различных методов усреднения [4]. Следует отметить, что метод усреднения существенным образом влияет на результаты оценки эффективности измельчения. Без потери общности результатов на первом этапе рассматриваются частицы линейной структуры [1]. Обозначим число молекул в порции вещества единичной массы через N . Одна разорванная межмолекулярная связь при линейной структуре увеличивает число частиц на единицу. Соответственно, K разорванных межмолекулярных связей приводит к образованию $K+1$ частиц. Средний размер зерен $\langle d \rangle$ определяется как отношение суммарной длины частиц к числу частиц:

$$\langle d \rangle = \frac{Nd_o}{K+1}, \quad (1)$$

где N – число молекул в порции вещества единичной массы; d_o – линейный размер молекулы; K – число разорванных связей.

В качестве термодинамического аналога процесса разрушения рассматривается процесс сублимации, или процесс фазового перехода вещества из твердого состояния в газообразное [2, 3]. При сублимации, аналогично процессу измельчения, происходит разрыв межмолекулярных связей, обусловленный подводом энергии. Термодинамической характеристикой процесса сублимации [3] является удельная теплота испарения при сублимации. Известно, что удельная теплота испарения при сублимации показывает количество энергии, необходимое для разрыва всех межмолекулярных связей в единице массы твердого вещества для его перевода в газообразное состояние. В термодинамике количество энергии, затрачиваемое на фазовый переход, определяется разностью энтальпий системы в начале и конце процесса [3]. Для описания перехода вещества из жидкой фазы в пар традиционно используется параметр состояния, получивший в термодинамике название степени сухости. Значение этого параметра показывает массовую долю пара в пароводяной смеси [2]. Степень сублимации (x) определяется как отношение числа частиц к числу молекул в выделенной системе. При полном переходе вещества в газообразное состояние, в котором число частиц равно числу молекул, степень сублимации равна единице ($x = 1$). Если число частиц в порции много меньше числа молекул, то знаменатель дроби становится много больше числителя, а дробь (степень сублимации) практически равна нулю ($x = 0$). Степень сублимации $x = 0,5$ означает, что число частиц составляет половину от числа молекул и средняя частица состоит из двух молекул. Таким образом, степень сублимации, принимая возможные значения от нуля до единицы, охватывает все возможные состояния системы при измельчении. Эту характеристику предлагается в дальнейшем (наряду со средним размером зерен) использовать как параметр состояния системы частиц при измельчении.

Степень сублимации, согласно приведенному выше определению, может быть рассчитана по формуле

$$x = \frac{K+1}{N}. \quad (2)$$

Подставляя выражение (1) в (2), получаем связь между средним размером частиц и степенью сублимации:

$$x = \frac{d_o}{\langle d \rangle}. \quad (3)$$

С учетом предложенной аналогии между процессами измельчения и сублимации зависимость энергии измельчения от степени сублимации может быть представлена, согласно известной [3] термодинамической зависимости для энергии фазового перехода, в виде

$$\Delta h = r_t \cdot \Delta x = r_t (x'' - x'), \quad (4)$$

где Δh – удельная энтальпия, или энергия измельчения; r_t – удельная теплота испарения при сублимации; x' , x'' – степень сублимации порошка до и после разрушения соответственно.

Известная зависимость подвода энергии от времени $\Delta h(t)$ позволяет с учетом (4) описать кинетику процесса измельчения следующим выражением:

$$x''(t) = x' + \Delta h(t) / r_t.$$

Подставляя выражение для степени сублимации (3) в формулу (4), получим зависимость энергии измельчения от среднего размера частиц:

$$\Delta h = r_t d_0 \left(\frac{1}{\langle d'' \rangle} - \frac{1}{\langle d' \rangle} \right), \quad (5)$$

где $\langle d' \rangle$, $\langle d'' \rangle$ – средний размер зерен до и после измельчения соответственно.

Предложенное термодинамическое описание процесса измельчения (5) совпадает с известным энергетическим законом измельчения Риттингера [4–7]. Коэффициент пропорциональности в законе Риттингера, определяемый обычно по экспериментальным данным, можно выразить с учетом (5) через удельную теплоту испарения сублимации:

$$C_R = r_t d_0. \quad (6)$$

Термодинамический подход к описанию энергии измельчения (5) предлагается использовать для оценки теоретически необходимой энергии измельчения и для оценки энергетической эффективности измельчения. В качестве критерия энергетической эффективности процесса измельчения предлагается использовать отношение энергии, которая теоретически необходима для измельчения, к энергии, которая фактически затрачена на измельчение материала. Данное отношение является энергетическим коэффициентом полезного действия процесса измельчения. В числителе дроби в качестве теоретически необходимой энергии измельчения предлагается использовать энергию, найденную согласно (5). В знаменателе дроби подставляется затраченная энергия, значение которой определяется по литературным источникам или по результатам предварительных экспериментальных исследований:

$$\text{кпд} = \frac{N_t}{N_e} = \frac{1}{N_e} B r_t d_0 \left(\frac{1}{\langle d'' \rangle} - \frac{1}{\langle d' \rangle} \right), \quad (7)$$

где B – производительность мельницы, кг/с; N_e – затраченная энергия за единицу времени, Дж/с; N_t – теоретически необходимая для измельчения энергия, приведенная к единице времени.

Все возможные значения коэффициента полезного действия, определяемые согласно (7), находятся в диапазоне от нуля до единицы. При равенстве затраченной и теоретически необходимой энергий предложенный коэффициент полезного действия равен единице. При неэффективном измельчении, когда величина подводимой энергии намного больше теоретически необходимого значения, значение этого коэффициента близко к нулю. Таким образом, в сопоставляемых вариантах максимальная эффективность процесса измельчения определяется максимальным значением коэффициента полезного действия. Данный коэффициент, очевидно, может использоваться при сравнении эффективно-

сти процесса измельчения различных материалов в разных типах помольных установок.

Для определения значения предложенного критерия энергетической эффективности, или коэффициента полезного действия процесса измельчения, разработана методика, которая включает следующие операции:

1. Определение энергии, затраченной на измельчение N_e , в ходе экспериментальных исследований или из анализа литературных источников.

2. Определение среднего размера частиц до и после измельчения (d' , d''). (Усреднение размера для монофракционных и полифракционных порошков может проводиться по разным методикам, анализ применимости которых приводится ниже.)

3. Определение по литературным источникам значения удельной теплоты испарения при сублимации для анализируемых условий измельчения r_t . (Вместо теплоты сублимации с учетом (6) можно использовать коэффициент C_R из энергетического закона Риттингера, найденный на основании специальных экспериментальных исследований или из литературных источников [5–7].) Определение по справочным материалам характерного размера молекулы измельчаемого вещества d_0 .

4. Вычисление согласно (7) критерия энергетической эффективности процесса измельчения.

Остановимся более подробно на методике усреднения размера частиц измельчаемого и измельченного продукта. Традиционно [4] в качестве среднего размера используется среднее арифметическое значение, которое при равномерном распределении частиц по крупности внутри фракции [d_1 ; d_2] совпадает с математическим ожиданием этого распределения:

$$\langle d \rangle_1 = \frac{d_1 + d_2}{2}. \quad (8)$$

Второй подход к усреднению основан на гипотезе равенства энергии, необходимой для получения частиц среднего размера $\langle d \rangle_2$, и энергии, необходимой для получения фракции частиц с равномерным распределением зерен по размерам внутри этой фракции [d_1 ; d_2]. Равенство указанных энергий позволяет после преобразования получить выражение для среднего размера зерен:

$$\langle d \rangle_2 = \frac{d_2 - d_1}{\ln(d_2/d_1)}. \quad (9)$$

Для определения среднего размера полидисперсного порошка согласно гипотезе о равенстве энергий, необходимых для получения порошка с частицами среднего размера и для получения полидисперсного порошка, предлагается следующая формула:

$$\langle d \rangle_2 = \frac{1}{\sum_i f_i \frac{\ln(d_{i+1}/d_i)}{d_{i+1} - d_i}},$$

где f_i – массовая доля фракции $[d_i; d_{i+1}]$ в измельчаемом материале.

Еще один (третий) подход для определения среднего размера фракции основан на гипотезе, что суммарная площадь частиц среднего размера равна суммарной площади частиц фракции:

$$\langle d \rangle_3 = d_2 \sqrt{\frac{2 \cdot \ln(d_2/d_1)}{(d_2/d_1)^2 - 1}}. \quad (10)$$

Расчетный анализ для сопоставления предложенных методик проведен для следующих исходных данных: нижняя граница фракции d_1 изменялась с заданным шагом от 0 до 1; верхняя граница принята постоянной и равной единице: $d_2 = 1$; распределение зерен внутри фракции $[d_1; d_2]$ равномерное. Результаты расчетного анализа в виде зависимости среднего размера фракции $[d_1; d_2]$ от значения размера нижней границы фракции (d_1) приведены на рис.1 для различных методик усреднения (согласно (8)–(10)). Штриховыми линиями на рис. 1 показаны значения нижней (кривая 4) и верхней (кривая 5) границ фракций. Таким образом, ширина фракции соответствует расстоянию между штриховыми линиями 4 и 5. Графики, которые помечены цифрами 1, 2, 3, показывают значения средних размеров зерен фракции, полученные согласно формулам (8), (9), (10) соответственно.

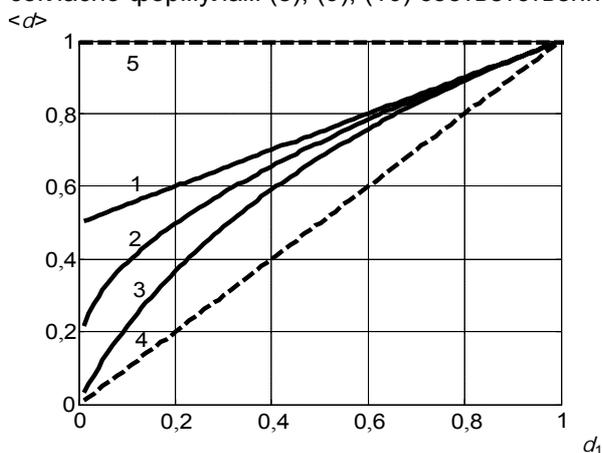


Рис. 1. Зависимости среднего размера фракции $[d_1; d_2]$ от значения размера нижней границы фракции d_1 при различных методах усреднения: 1 – $\langle d \rangle = \langle d \rangle_1$ – согласно (8); 2 – $\langle d \rangle = \langle d \rangle_2$ – согласно (9); 3 – $\langle d \rangle = \langle d \rangle_3$ – согласно (10); 4 – $\langle d \rangle = d_1$; 5 – $\langle d \rangle = d_2 = 1$

Оценка методик усреднения проводилась по критерию минимального разброса, или минимальному значению дисперсии значений коэффициента полезного действия, для различных условий проведения опыта при измельчении антрацита на приборе ОР ВТИ. Наименьшее значение дисперсии соответствует усреднению размеров зерен согласно методике (9), которая

использовалась в дальнейшем для оценки энергетической эффективности.

Использование разработанной методики для оценки энергетической эффективности продемонстрировано на примерах измельчения графита, антрацита и соли мертвого моря на лабораторном приборе ОР ВТИ, в молотковой дробилке, центробежной мельнице и шаровой барабанной мельнице.

Результаты экспериментов на приборе ОР ВТИ представлены в [8]. Остальные экспериментальные данные были заимствованы из опубликованных литературных источников [5–7], [9–10].

При проведении исследований на лабораторном приборе ОР ВТИ (рис. 2) измельчению подвергалась фракция антрацита $[1,6; 2,0]$ мм. Исходная порция материала предварительно загружалась в размольную камеру 2. Измельчение производилось посредством удара сбрасываемого размольного стержня 6 о размалываемый материал. При этом затраченная на измельчение энергия определялась как потенциальная энергия размольного стержня через произведение его массы на высоту сбрасывания и на ускорение свободного падения.

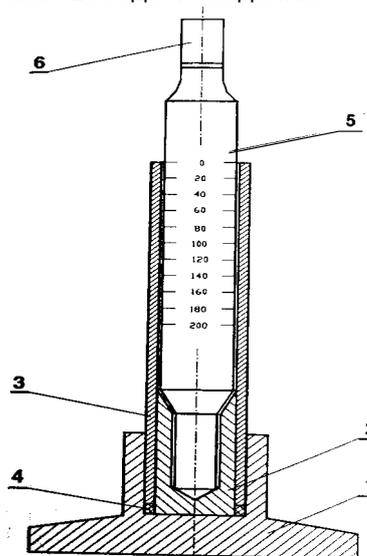


Рис. 2. Общий вид прибора ОР ВТИ: 1 – подставка; 2 – размольная камера; 3 – направляющая трубка; 4 – выверочное кольцо; 5 – размольный стержень; 6 – дополнительный груз к размольному стержню

Продукты измельчения подвергались ситовому анализу, результаты которого в виде доли прохода частиц через контрольные сита представлены для разных значений подводимой энергии в табл. 1.

Значения коэффициента полезного действия, рассчитанные в соответствии с разработанной методикой, представлены на рис. 3 в виде зависимости коэффициента полезного действия от величины подводимой энергии. Следует отметить низкое абсолютное значение коэффициента полезного действия, которое составляет менее одного процента. Это свидетельствует о существенных резервах совершенствования процесса измельчения. Незначительный разброс

значений коэффициента полезного действия от среднего значения при значительной вариации величины удельной подведенной энергии свидетельствует о правильности и обоснованности выбора методики усреднения размера зерен и методики расчета самого коэффициента полезного действия.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований измельчения фракции антрацита [1,6; 2,0] мм на приборе ОР ВТИ при разном подводе энергии к измельчаемому материалу

| Размер частиц d, мм | Доля частиц измельченного на ОР ВТИ материала с размером меньше ячеек контрольного сита d при разном подводе энергии E, Дж/кг | | | | | | |
|------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | E=1420 | E=1600 | E=1950 | E=2600 | E=3030 | E=3600 | E=5180 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,16 | 0,0083 | 0,0150 | 0,0306 | 0,0643 | 0,0885 | 0,1244 | 0,2163 |
| 0,40 | 0,0104 | 0,0293 | 0,1078 | 0,1514 | 0,1911 | 0,2484 | 0,3766 |
| 0,63 | 0,0488 | 0,1106 | 0,1991 | 0,2909 | 0,3597 | 0,4395 | 0,6041 |
| 1,00 | 0,0812 | 0,1789 | 0,3060 | 0,4492 | 0,5269 | 0,6187 | 0,7371 |
| 1,25 | 0,1179 | 0,2285 | 0,3767 | 0,5170 | 0,6158 | 0,7342 | 0,8455 |
| 1,60 | 0,3692 | 0,4507 | 0,5174 | 0,7189 | 0,7876 | 0,9150 | 0,9668 |
| 2,00 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |

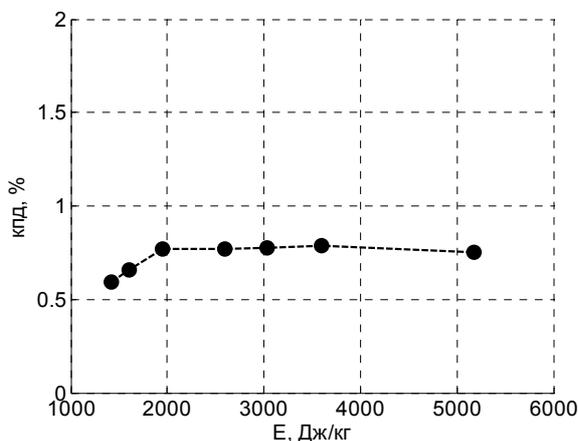


Рис. 3. Зависимость значения коэффициента полезного действия измельчения в приборе ОР ВТИ от величины удельно энергоподвода к измельчаемому материалу

Дальнейшая апробация предложенного критерия и методики его определения проводилась на примерах измельчения антрацита и соли мертвого моря в шаровой барабанной мельнице, лабораторной центробежной мельнице и лабораторной дробилке. Исходные данные и результаты расчета приведены в табл. 2. Анализ полученных результатов показал, что наиболее эффективным измельчение при максимальном значении коэффициента полезного действия реализуется в лабораторном приборе ОР ВТИ. Значение критерия эффективности в этом случае оказалось практически на порядок выше значений этого же коэффициента для других размольных установок. Очевидно, это связано с наиболее эффективным использованием подведенной энергии и достаточно точным определением энергии, которая собственно подводится от размольного стержня к измельчаемому материалу. В то же время энергетическая эффективность шаровой барабанной мельницы оказалась примерно одинаковой по сравнению с этим показа-

телем для молотковой дробилки и центробежной мельницы.

Таблица 2. Сопоставление энергетической эффективности измельчения различных материалов в различных установках

| Тип измельчителя (измельчаемый материал) | <d'>, мм | <d''>, мм | Ne, кДж/кг | кпд, % |
|---|----------|-----------|------------|--------|
| ОР ВТИ (антрацит) | 1,8 | 0,3–0,8 | 1,42–5,18 | 0,729 |
| Ударная мельница Pin mill n = 6000 об/мин(соль) | 2,3 | 0,215 | 8,125 | 0,0519 |
| Ударная мельница Pin mill n = 10000 об/мин(соль) | 2,3 | 0,84 | 1,238 | 0,0611 |
| Молотковая дробилка (соль) | 2,3 | 0,38 | 2,722 | 0,0807 |
| Шаровая барабанная мельница Ш-50 (антрацит) | 10 | 0,1 | 127,12 | 0,0699 |

Проведенный анализ показал, что предложенный коэффициент энергетической эффективности позволяет на основании фундаментальных термодинамических характеристик измельчаемого вещества сравнивать эффективность измельчения различных материалов в различных помольных установках. Таким образом, предложенная методика, с одной стороны, позволяет оценить эффективность измельчения существующих мельничных установок, а с другой стороны, проводить предварительную оценку эффективности реконструкций и планируемых технологических мероприятий.

Авторы хотели бы выразить признательность профессору Х. Кальману и инженерам Е. Гранту и Д. Портникову из лаборатории транспортировки и обработки твердых частиц Университета Бен-Гуриона в Негеве (Израиль), любезно предоставивших результаты экспериментальных исследований по измельчению соли мертвого моря в лабораторной центробежной мельнице и молотковой дробилке.

Список литературы

1. Жуков В.П., Беляков А.Н. Термодинамический подход к описанию механических процессов в сыпучих средах // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 1. – С. 74–77.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1980. – 508 с.
3. Коновалов В.И. Техническая термодинамика. – Иваново, 2005. – 619 с.
4. Mizonov V., Zhukov V., Bernotat S. Simulation of Grinding: New approaches. – Ivanovo, 1997. – 108 p.
5. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / под ред. О.С. Богданова. – М.: Недра, 1982. – 368 с.
6. Лебедев А.Н. Пылеприготовление на электростанциях. – М.: Госэнергоиздат, 1949. – 352 с.
7. Летин Л.А., Роддатис К.Ф. Среднеходные и тихоходные мельницы. – М.: Энергоиздат, 1981. – 359 с.
8. Otwinowski H. Informational Entropy in the Modeling of Comminution Process. – Krakow: Dissertations Monographs, 2003. – 154 p.
9. Strength distribution of particles under compression / Y. Rozenblat, D. Portnikov, A. Levy, H. Kalman, S. Aman, J. Tomas // Powder Technology. – 2011. – 208(1). – P. 215–224.
10. Investigating the testing procedure limits for measuring particle strength distribution / D. Portnikov, H. Kalman, S. Aman, J. Tomas // Powder Technology. – 2013. – 237(0). – P. 489–496.

References

1. Zhukov, V.P., Belyakov, A.N. Termodinamicheskiy podkhod k opisaniyu mekhanicheskikh protsessov v syupuchikh sredakh [Thermodynamic approach to description of mechani-

cal processes in granular media]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 1, pp. 74–77.

2. Yavorskiy, B.M., Detlaf, A.A. *Spravochnik po fizike* [Physics reference book]. Moscow, Nauka, 1980. 508 p.

3. Konovalov, V.I. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Engineering thermodynamics]. Ivanovo, 2005. 619 p.

4. Mizonov, V., Zhukov, V., Bernotat, S. *Simulation of Grinding: New approaches*. Ivanovo, 1997. 108 p.

5. *Spravochnik po obogashcheniyu rud. Podgotovitel'nye protsessy* [Ore beneficiation reference book]. Moscow, Nedra, 1982. 368 p.

6. Lebedev, A.N. *Pyleprigotovlenie na elektrostantsiyakh* [Pulverization at power plants]. Moscow, Gosenergoizdat, 1949. 352 p.

7. Letin, L.A., Roddatis, K.F. *Srednekhodnye i tikhokhodnye mel'nitsy* [Medium-speed and slow-speed mills]. Moscow, Energoizdat, 1981. 359 p.

8. Otwinowski, H. *Informational Entropy in the Modeling of Com minution Process*. Krakow, Dissertations Monographs, 2003. 154 p.

9. Rozenblat, Y., Portnikov, D., Levy, A., Kalman, H., Aman, S., Tomas, J. *Strength distribution of particles under compression*. *Powder Technology*, 2011, 208(1), pp. 215–224.

10. Portnikov, D., Kalman, H., Aman, S., Tomas, J. *Investigating the testing procedure limits for measuring particle strength distribution*. *Powder Technology*, 2013, 237(0), pp. 489–496.

Беляков Антон Николаевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, докторант кафедры прикладной математики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,
телефон (4932) 26-97-45.

Жуков Владимир Павлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,
телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Otwinowski Henryk,

Institute of Thermal Machinery Częstochowa University of Technology, Poland,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: henryk_ot@go2.pl

Тупицын Дмитрий Владимирович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. Б, ауд. 209,
телефон (4932) 26-98-98,
e-mail: dvt@ispu.ru