

**Герасимов Михаил Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин, руководитель учебно-научно-исследовательской лаборатории «Инновационные вибрационные технологии и машины»

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: mail\_mihail@mail.ru

**Горшков Павел Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

gorshkov\_p@mail.ru

**Бражник Юлия Викторовна**, старший преподаватель кафедры механического оборудования.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

**Грудина Виктория Андреевна**, аспирант кафедры технологии стекла и керамики.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: gruvik7@mail.ru



DOI: 10.12737/article\_590878fb37a9b6.87287023

Гаврунов А.Ю., канд. техн. наук,  
Богданов Н.Э., магистрант,  
Карагодина К.И., аспирант,  
Шеховцова Ю.А., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ВИБРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЕ НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ЭНЕРГИИ

nikita.bogdanov.rus@gmail.com

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований вибрационной мельницы. Получены уравнения регрессии в кодированном и натуральном виде в результате проведения полного факторного эксперимента по центральному композиционному плану, проведена их интерпретация в графическом виде. Рассмотрено влияние основных факторов: частоты вибрации и вращения барабана мельницы, коэффициентов загрузки помольной камеры мелющими телами и измельчаемым материалом помольной камеры на удельный расход энергии. Дан всесторонний анализ влияния исследуемых факторов на параметр оптимизации. Показано какие из факторов являются наиболее существенными. Сделан вывод и даны рекомендации касающиеся рациональном режиме измельчения в вибрационно-вращательной мельнице.

**Ключевые слова:** вибрационная мельница, измельчаемый материал, мелющие тела, удельный расход энергии, производительность, тонкость помола.

**Введение.** В качестве объекта исследований была выбрана вибрационно-вращательная мельница [1]. На основании поисковых экспериментов [2–4] были определены факторы, которые оказывают наиболее существенное влияние на параметры оптимизации [5] – производительность, тонкость помола [6] и удельный расход энергии [7].

**Методология.** Такими факторами стали  $x_1(\varphi_1)$  – коэффициент загрузки барабана мельницы мелющими телами он изменялся в пределах 0,46–0,74;  $x_2(n)$  – частота вращения барабана мельницы; изменялась от 12,3 мин<sup>-1</sup> до 23,7 мин<sup>-1</sup>;  $x_3(\omega)$  – частота вибрации помольной камеры,

$$q = 0,043 - 0,005 \cdot x_1 - 0,005 \cdot x_2 - 0,006 \cdot x_3 - 0,0005 \cdot x_4 + 0,003 \cdot x_1^2 + 0,0002 \cdot x_2^2 - 0,0002 \cdot x_3^2 - 0,0004 \cdot x_4^2 + 0,0014 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,0009 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,0028 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,0033 \cdot x_3 \cdot x_4 \quad (1)$$

Анализируя полученное уравнение (1), величины факторов и знаков перед ними можно сделать вывод, что наибольшее влияние на величину удельного энергопотребления  $q$  оказывает фактор  $x_3$ , частота вибрации помольной камеры. Фактор  $x_3$  имеет отрицательный знак, что свидетельствует о снижении удельного энергопотребления  $q$  установки при его увеличении. Это объясняется тем, что при увеличении частоты вибрации  $\omega$  помольной камеры мощность вибропривода возрастает незначительно по сравнению с ростом производительности установки, которая обусловлена более интенсивным измельчением материала, что приводит к снижению значения удельного энергопотребления  $q$ . Например, при увеличении частоты вибрации помольной камеры  $\omega$  с 45 до 55 Гц, величины

пределы варьирования от 42,9 Гц до 57,1 Гц;  $x_4(\varphi_2)$  – коэффициент загрузки измельчаемым материалом, изменялся по отношению к массе мелющих тел в пределах от 0,08 до 0,2 [8, 9].

В результате реализации полного факторного эксперимента по центральному композиционному ортогональному плану (ЦКОП) 2<sup>4</sup>[10] были получены уравнения регрессии в кодированном и натуральном виде.

**Основная часть.** Уравнение регрессии, характеризующее зависимость удельного расхода энергии установки от изменения величины варьируемых факторов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  и  $x_4$ , в кодированном виде:

удельного энергопотребления  $q$  снижается с 0,049 до 0,037 кВт·ч/кг, а именно на 24 %.

Наибольшее влияние среди коэффициентов парного взаимодействия оказывают сочетания факторов  $x_2x_4$  и  $x_3x_4$ , имеющие положительные знаки. Это говорит о повышении удельного энергопотребления  $q$  установкой при одновременном увеличении частоты вибрации  $\omega$ , частоты вращения помольной камеры  $n$  и коэффициента загрузки барабана мельницы материалом  $\varphi_2$ . С увеличением количества материала в помольной камере при неизменном количестве мелющих тел эффективность их работы снижается, вследствие чрезмерного заполнения межшарового пространства материалом, тонкость помола готового продукта загроубляется [11]. Приведённая к 10-ти процентному остатку на сите

008 производительность установки снижается [12]. Увеличение частоты вибрации  $\omega$  частоты вращения помольной камеры приводит к увеличению потребляемой мощности привода. Например, с увеличением коэффициента загрузки материалом  $\varphi_2$  с 0,08 до 0,14 наблюдается незначительное повышение удельного энергопотребления  $q$  с 0,042 до 0,043 кВт·ч/кг, то есть на 2,3 %.

Однако, влияние фактора  $x_1$  - коэффициента загрузки мелющими телами, и фактора  $x_2$  - частоты вращения помольной камеры, так же заметно изменяет поведение функции отклика. Оба фактора имеют одинаковую величину коэффициентов и отрицательные знаки. Это говорит о том, что при увеличении  $x_1$  и  $x_2$  удельное энергопотребление  $q$  снижается. Увеличение коэффициента загрузки мелющими телами  $\varphi_1$  с 0,46 до 0,7 приводит к значительному снижению энергопотребления  $q$  с 0,056 до 0,041 кВт·ч/кг, а именно на 27 %. В данном случае это объясняется тем, что с увеличением количества мелющих тел пропорционально возрастает частота воздействия мелющих тел на измельчаемый материал, что повышает эффективность процесса измельчения. Этот эффект возрастает с частоты вращения помольной камеры. Приведённая к  $R_{008} = 10$  % производительность возрастает, удельный расход энергии снижается. Это очевидно и не требует дополнительных пояснений. Например, при увеличении частоты вращения помольной камеры  $n$  с 12,3 до 22 об/мин наблюдается снижение удельного энергопотребления

$$q = 0,3964 - 0,4649 \cdot \varphi_1 - 0,004 \cdot n - 0,0018 \cdot \omega - 1,0735 \cdot \varphi_2 + 0,3 \cdot \varphi_1^2 + 0,0001 \cdot n^2 - 0,25 \cdot \varphi_2^2 + 0,0175 \cdot n \cdot \varphi_1 - 0,0001 \cdot \omega \cdot \varphi_1 - 0,015 \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2 + 0,0035 \cdot n \cdot \varphi_1 + 0,0165 \cdot \omega \cdot \varphi_2. \quad (7)$$

На рис. 1, 2, 3 и 4 представлены наиболее характерные графические зависимости изменения удельного энергопотребления  $q$  от основных параметров установки  $\varphi_1, n, \omega, \varphi_2$ .

На рис. 1 представлена зависимость удельного энергопотребления установки от коэффициента загрузки мелющих тел и частоты вращения помольной камеры.

Из графика (рис. 1) следует, что зависимость  $q=f(\varphi_1)$  имеет экстремальный характер. При значениях коэффициента заполнения  $\varphi_1$  мелющими телами 0,6–0,7 наблюдается наименьшее удельное энергопотребление  $q$  установкой.

Минимальное значение  $q$  достигается при среднем значении коэффициента загрузки мелющими телами  $\varphi_1=0,65$ , одновременно наименьшее значение  $q$  наблюдается при частоте вращения помольной камеры  $n=22$  об/мин. Экстремальный характер зависимости  $q=f(\varphi_1)$  объясняется тем, что при уменьшении коэффициента загрузки шарами эффективность процесса измельчения падает, происходит недоизмельче-

$q$  с 0,05 до 0,038 кВт·ч/кг или в процентном соотношении – на 25 %.

Для более детального исследования уравнения (1) и интерпретации в графическом виде данное уравнение необходимо перевести из кодированного вида в натуральный. Для этого воспользуемся формулой [13]:

$$x_k = \frac{x_n - x_{cp}}{\Delta}, \quad (2)$$

где  $x_k$  - обозначение фактора варьирования в кодированном виде;  $x_n$  - обозначение фактора варьирования в натуральном виде;  $x_{cp}$  - значение нулевого уровня варьирования фактора;  $\Delta$  - шаг варьирования.

На основании формулы (2). получим выражения для каждого фактора варьирования:

$$x_1 = \frac{\varphi_1 - 0,6}{0,1}, \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{n - 18}{4}, \quad (4)$$

$$x_3 = \frac{\omega - 50}{5}, \quad (5)$$

$$x_4 = \frac{\varphi_2 - 0,14}{0,04}, \quad (6)$$

Рассчитав дисперсию воспроизводимости, произведем оценку значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента, незначимые коэффициенты приравняем к нулю, не пересчитывая оставшиеся.

Тогда уравнение регрессии (1) в натуральном виде будет иметь следующий вид:

ние материала, снижается производительность мельницы, что, в свою очередь, при том же уровне потребляемой мощности привода приводит к повышению удельного расхода энергии -  $q$ .

Меньшее влияние на  $q$  оказывает частота вращения  $n$  помольной камеры. Удельный расход энергии  $q$  возрастает при низких скоростях вращения барабана мельницы, что, в результате приводит к снижению загрузке помола готового продукта, и снижению производительности. При увеличении коэффициента заполнения мелющими телами  $\varphi_1$  с 0,46 до 0,65 происходит повышение количества соударений мелющих тел и, естественно, повышается производительность вибрационного измельчения. При дальнейшем увеличении  $\varphi_1$  удельный расход энергии возрастает, так как, вследствие увеличения колеблющейся массы, повышается потребляемая мощность привода мельницы.

При уменьшении частоты вращения  $n$  помольной камеры от 18 до 14 об/мин происходит

снижение интенсивности движения мелющих тел, в результате происходит агрегация и образование временных застойных зон, потребляемая мощность привода снижается, удельный расход энергии существенно возрастает. При

увеличении частоты вращения  $n$  до 22 об/мин интенсификация измельчения возрастает за счет циркуляции мелющих тел, возрастают истирающие нагрузки, увеличивается суммарная кинетическая энергия мелющих тел.

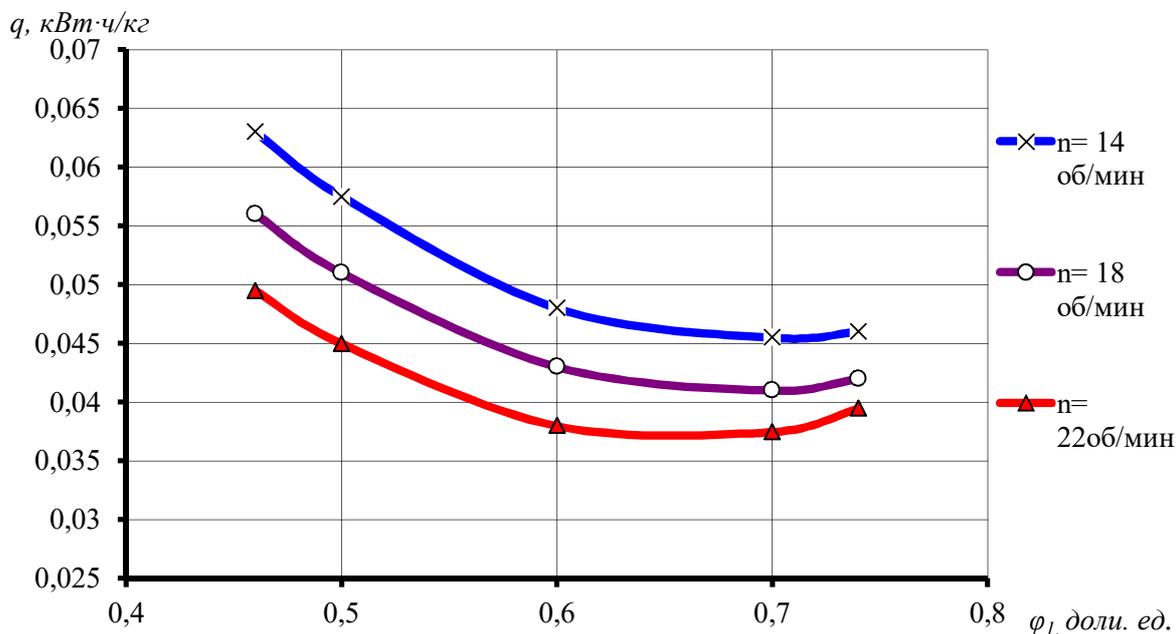


Рис. 1. Графики зависимости  $q=f(\varphi_1)$  при  $\omega=50$  Гц и  $\varphi_2=0,14$

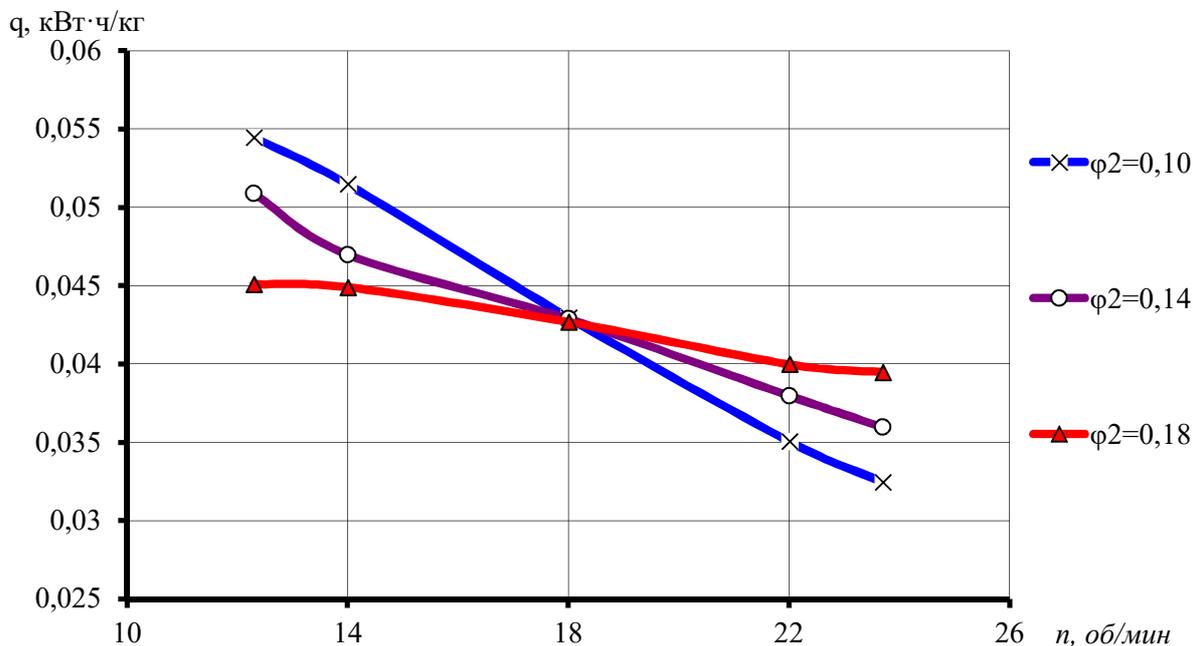


Рис. 2. Графики зависимости  $q=f(n)$  при  $\omega=50$  Гц и  $\varphi_1=0,6$

На рис. 2 представлена зависимость удельного расхода энергии установки от частоты вращения помольной камеры при различных величинах коэффициента загрузки материалом  $\varphi_2$ .

Из графика (рис. 2) видно, что зависимость  $q=f(n)$  имеет ниспадающий характер, другими

словами, при увеличении частоты вращения  $n$  помольной камеры удельный расход энергии  $q$  снижается тонкость помола готового продукта и производительность мельниц, вследствие интенсификации движения мелющих тел в помольной камере, возрастают. Например, при увеличении частоты вращения  $n$  с 12,3 до 23,7 об/мин удель-

ный расход энергии  $q$  снижается с 0,05 до 0,036 кВт·ч/кг, а именно на 28 %. Наибольшее значение удельного расхода энергии  $q$  наблюдается при частоте вращения 12,3 об/мин и коэффициенте заполнения материала 0,1. Это естественно и не требует дополнительных пояснений.

Второстепенное влияние на функцию отклика  $q$  оказывает коэффициент загрузки материалом  $\varphi_2$ , который закономерно изменяет значение функции  $q$  в пределах 18 % от 0,039 до

0,032 кВт·ч/кг, обеспечивая наименьшее значение удельного расхода энергии  $q$  при повышенной частоте вращения 23,7 об/мин. Величина  $q$  сильнее изменяется при увеличении коэффициента  $\varphi_2$ , с 0,1 до 0,18. Например при  $n = 12,3$  об/мин.,  $\varphi_2 = 0,1$ ,  $q = 0,055$  кВт·ч/т, а при  $\varphi_2 = 0,18$   $q$  снижается до 0,045 кВт·ч/т, т.е на 18 %.

При частоте вращения помольной камеры 18 об/мин, изменение коэффициента загрузки материалом  $\varphi_2$  не влияет величину удельного расхода энергии  $q$  (рис. 2).

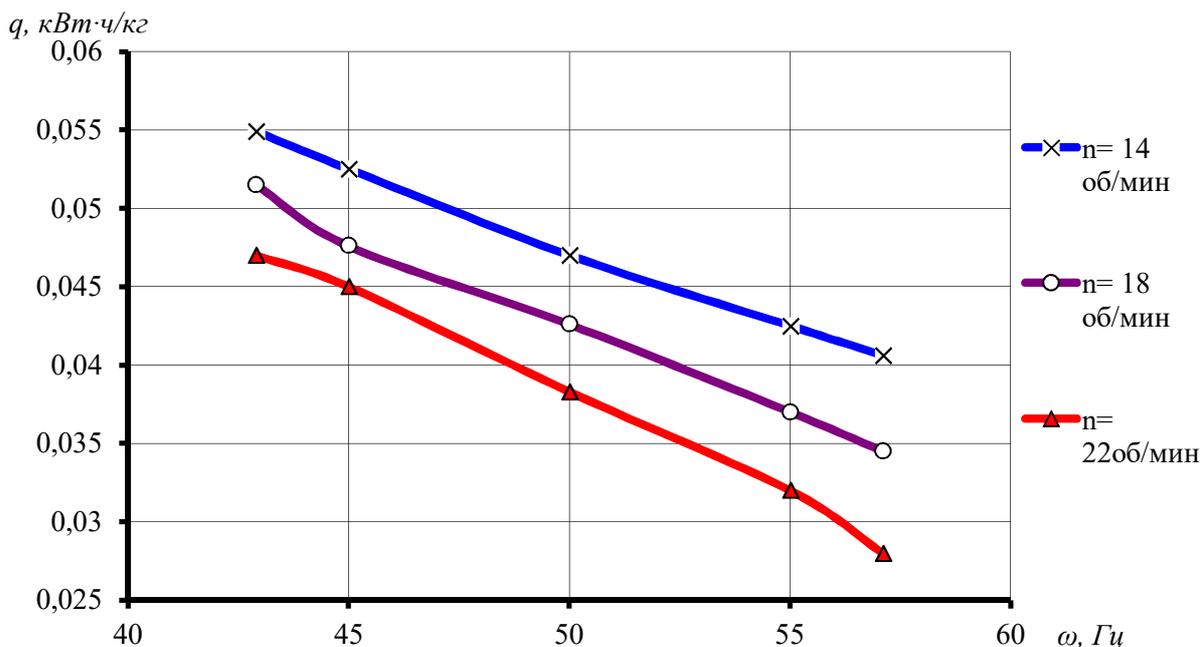


Рис. 3. Графики зависимости  $q=f(\omega)$  при  $\varphi_1=0,6$  и  $\varphi_2=0,14$

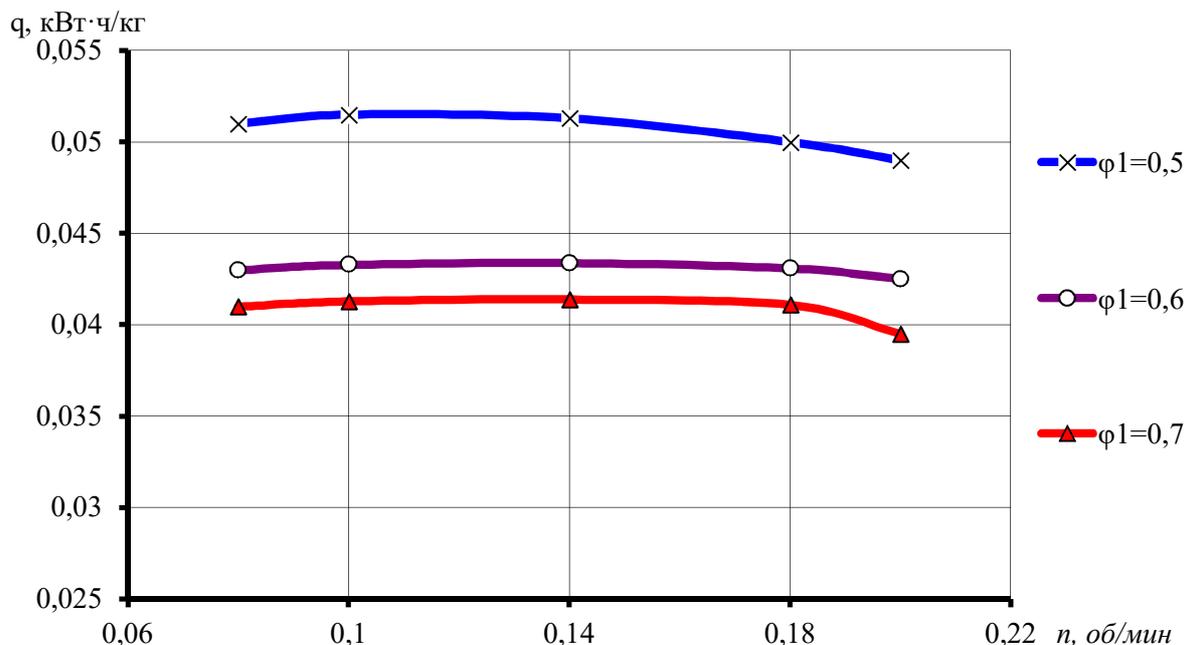
На рис. 3 представлена зависимость удельного расхода энергии  $q$  от частоты вибрации помольной камеры при различной частоте вращения.

Из графиков (рис. 3) видно, что зависимость  $q=f(\omega)$  линейная нисходящая, что говорит о взаимном влиянии основного и второстепенного факторов  $\omega$  и  $n$  на величину расхода энергии  $q$ . Снижение удельного расхода энергии  $q$  объясняется тем, что при увеличении частоты вибрации  $\omega$  энергонапряженность процесса измельчения возрастает, глубина проникновения колебаний увеличивается, повышая эффективность процесса измельчения в установке. При увеличении частоты вибрации  $\omega$  с 42,9 до 57,1 Гц величина удельного расхода энергии  $q$  снижается с 0,051 до 0,034 кВт·ч/кг, а именно на 33 %. Так же график 3 показывает, что с увеличением частоты вращения  $n$  с 14 до 22 об/мин наблюдается снижение удельного расхода энергии с 0,041 до 0,028 кВт·ч/кг, что составляет 32 %. Это объяс-

няется тем, что частота вращения  $n$  помольной камеры является фактором, оказывающим существенное влияние на параметры оптимизации, наряду с наиболее влиятельным из них – частотой вибрации  $\omega$ , что дает заметное повышение эффективности вибрационного измельчения.

На рис. 4 представлена зависимость функции удельного расхода энергии от коэффициента загрузки  $\varphi_2$  материалом и коэффициента загрузки  $\varphi_1$  мелющими телами.

Из графика (рис. 4) видно, что зависимость  $q=f(\varphi_2)$  имеет экстремальный вид, близкий к линейному. Однако, незначительная кривизна линий говорит о небольшом влиянии фактора  $\varphi_2$  на величину удельного расхода энергии  $q$ . Изменяющееся количество материала в помольной камере дает небольшие изменения общей потребляемой мощности приводов, что объясняет его незначительное влияние, в отличие от коэффициента загрузки  $\varphi_1$  мелющих тел.

Рис.4. Графики зависимости  $q=f(\varphi_2)$  при  $\omega=50$  Гц и  $n=18$  об/мин

Наименьшие значения функции  $q$  0,042 и 0,041 кВт·ч/кг находятся в звездных точках, со значениями коэффициента загрузки  $\varphi_2$  материалом 0,08 и 0,2, а ее экстремальное значение 0,043 кВт·ч/кг лежит в диапазоне коэффициента от 0,1 до 0,18, что составляет разницу в 4,5 %.

Также на рисунке 4 показано влияние коэффициента загрузки мелющими телами  $\varphi_1$  на удельный расход энергии  $q$ , который при уменьшении  $\varphi_1$  с 0,6 до 0,5 вызывает увеличение удельного расхода энергии на измельчение с 0,041 до 0,05 кВт·ч/кг, а при увеличении  $\varphi_1$  с 0,6 до 0,7 снижает его значение с 0,041 до 0,039 кВт·ч/кг - снижение составляет 5 %. Это происходит благодаря изменению количества мелющих тел в помольной камере, которое напрямую влияет на степень измельчения готового продукта, качественные характеристики которого определяют производительность установки, тем самым обеспечивая более энергоэффективное вибрационное измельчение.

**Выводы.** Проанализировав уравнение регрессии (1) и графические зависимости (рис. 1, 2, 3 и 4) можно сделать вывод, что при увеличении частоты вращения помольной камеры и использовании более интенсивных частот вибрации  $\omega$  процесс позволяет снизить удельный расход энергии.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2329361 Российская Федерация, МПК7 В 02 С 17/06. Вибровращательная мельница / Богданов В.С., Гаврунов А.Ю. (Россия); заявитель и патентообладатель БГТУ

им. В.Г. Шухова; заявл. 21.12.10; опубл. 21.12.10, Бюл. № 16; приоритет 21.12.10. 4 с.

2. Пономарев, А.Б. Методология научных исследований: учеб. пособие. Пермь: Изд. Перм. нац. исслед. поли-техн. ун-та, 2014. 186 с.

3. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Изд. Машиностроение, 1981. 184 с.

4. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. / Пер. с нем. К. Хартман. М.: МИР, 1977. 314 с.

5. Тюпиков В.Г. Моделирование и оптимизация процессов измельчения в вибрационных мельницах: дисс. канд. техн. наук: 05.17.08. М.: Изд. РХТУ, 2000. 219 с.

6. Богданов В.С., Ильин, А.С., Семикопенко И.А. Процессы в производстве строительных материалов и изделий. Белгород: Изд. Везелица, 2007. 512 с.

7. Богданов В.С., Гаврунов А.Ю., Шаптала В.Г. Кинематика движения загрузки в вращательной мельнице // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 100-102.

8. Austin L., Yekeler M., Dumm T.F., Hogg R. The Kinetics and Shape Factors of Ultrafine Dry Grinding in a laboratory tumbling ball mill. Particle & Particle Systems Characterization, Volume 7, Issue 1-4, 1990. Pp. 242-247.

9. Beenken W., Gock E., Kurrer K. The outer mechanics of the eccentric vibration mill. Intern. J. of Mineral Processing. 1996. Pp. 44-45.

10. Мухачёв В.А. Планирование и обработка результатов эксперимента: Учебное пособие. Томск: Изд. Томск. гос. ун-та систем управления

и радиоэлектроники, 2007. 118 с.

11. Фролов К.В., Гончаревич И.Ф. Теория вибрационной техники и технологии. М.: 1981. 319 с.

12. Потураев В.Н., Францук В.П., Надутый В.П. Вибрационная техника и технология в

энергоёмких производствах. Днепропетровск: Изд. НГА Украины, 2002. 186 с.

13. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. 2-е, перераб. и доп. Л.: Изд. Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. 304 с.

---

---

**Gavrunov A.Y., Bogdanov N.E., Karagodina K.I., Shekhovtsova Y.A.**  
**EFFECT OF THE MODE OF THE GRINDING PROCESS IN A VIBRATION MILL**  
**ON A SPECIAL ENERGY CONSUMPTION**

*This article presents the results of experimental studies of a vibratory mill. Regression equations are obtained in coded and natural form as a result of the complete factorial experiment in the central composition plan, and their interpretation was shown graphically. The influence of the main factors is considered: the vibration frequency and rotation of the mill drum, the grinding factors of the grinding chamber, grinding bodies and the grindable material for the specific energy consumption. Was made a comprehensive analysis of the influence of the factors studied on the optimization parameter. It is shown which of the factors are the most significant. A conclusion is drawn and recommendations are given concerning the rational grinding regime in a vibratory rotational mill.*

**Key words:** vibrating mill, grinding material, grinding bodies specific energy consumption, productivity, fineness of grinding.

---

---

**Гаврунов Алексей Юрьевич**, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры механического оборудования.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Богданов Никита Эдуардович**, магистрант института магистратуры.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: nikita.bogdanov.rus@gmail.com

**Карагодина Карина Игоревна**, аспирант кафедры механического оборудования.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: artemenkokarina@yandex.ru

**Шеховцова Юлия Александровна**, аспирант кафедры механического оборудования.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.