

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⁻¹ до 23,7 мин⁻¹; $x_3(\omega)$ – 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 ω 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 ω 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) 2⁴[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 ω , частоты вращения помольной камеры n или коэффициента загрузки барабана мельницы материалом φ_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 ω частоты вращения помольной камеры приводит к увеличению потребляемой мощности привода. Например, с увеличением коэффициента загрузки материалом φ_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 φ_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 φ_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; Δ - 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 φ_1 с 0,46 до 0,65 происходит повышение количества соударений мелющих тел и, естественно, повышается производительность вибрационного измельчения. При дальнейшем увеличении φ_1 удельный расход энергии возрастает, так как, вследствие увеличения колеблющейся массы, повышается потребляемая мощность привода мельницы.

При уменьшении частоты вращения 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.

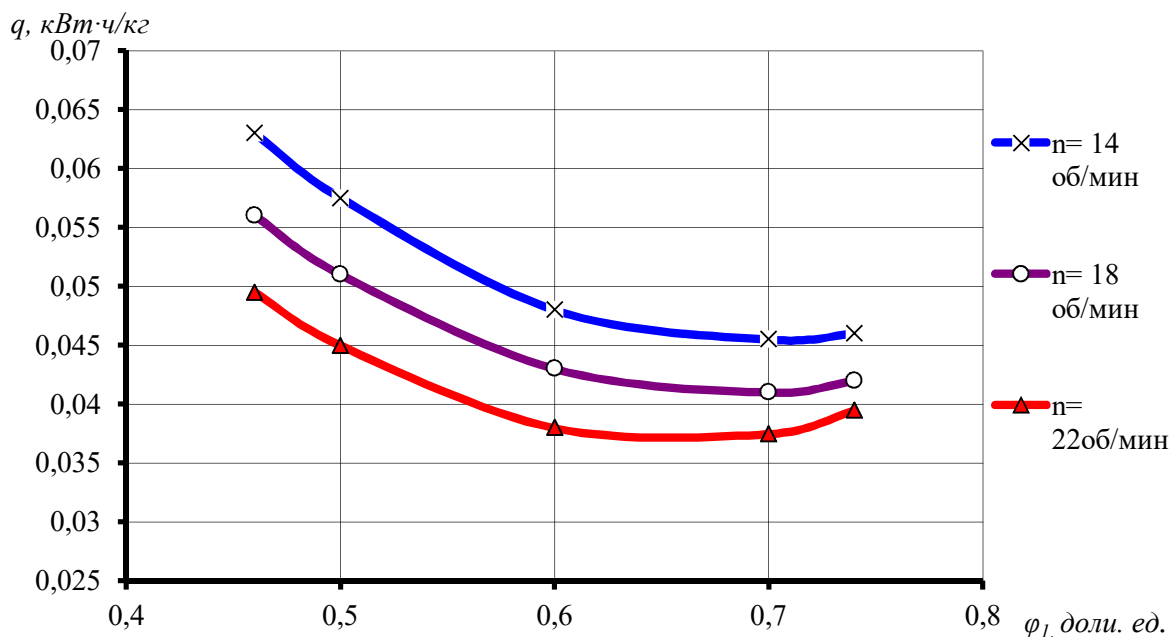


Рис. 1. Графики зависимости $q=f(\varphi_1)$ при $\omega=50$ Гц и $\varphi_2=0,14$

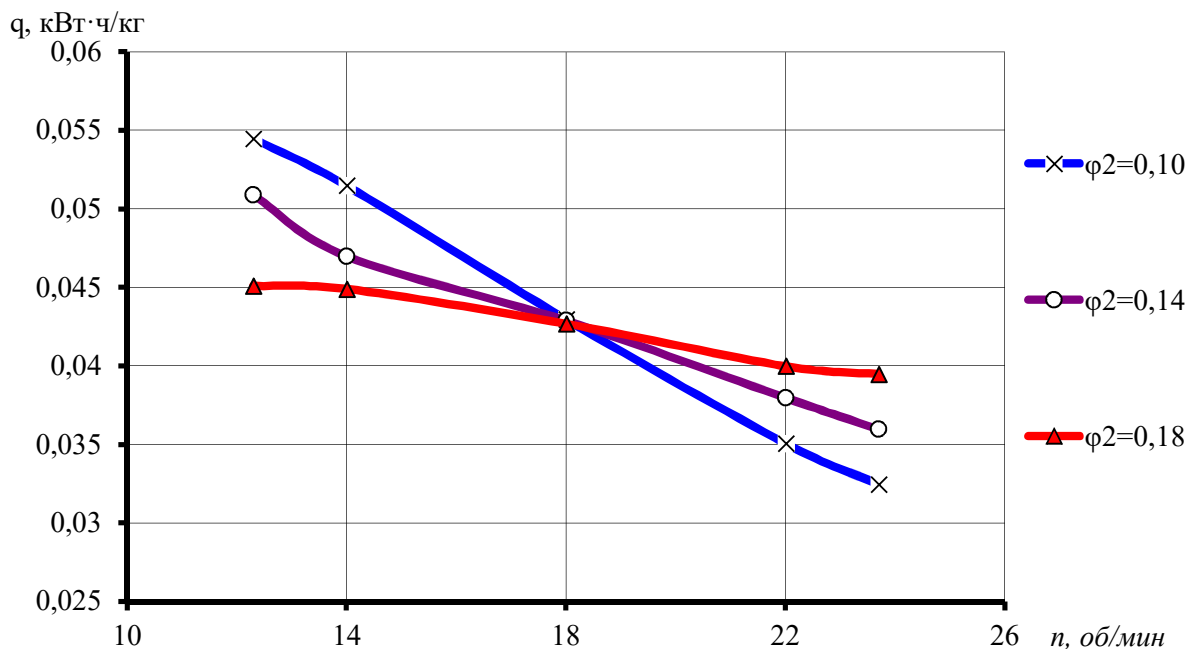


Рис. 2. Графики зависимости $q=f(n)$ при $\omega=50$ Гц и $\varphi_1=0,6$

На рис. 2 представлена зависимость удельного расхода энергии установки от частоты вращения помольной камеры при различных величинах коэффициента загрузки материалом φ_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 φ_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 φ_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 φ_2 не влияет величину удельного расхода энергии q (рис. 2).

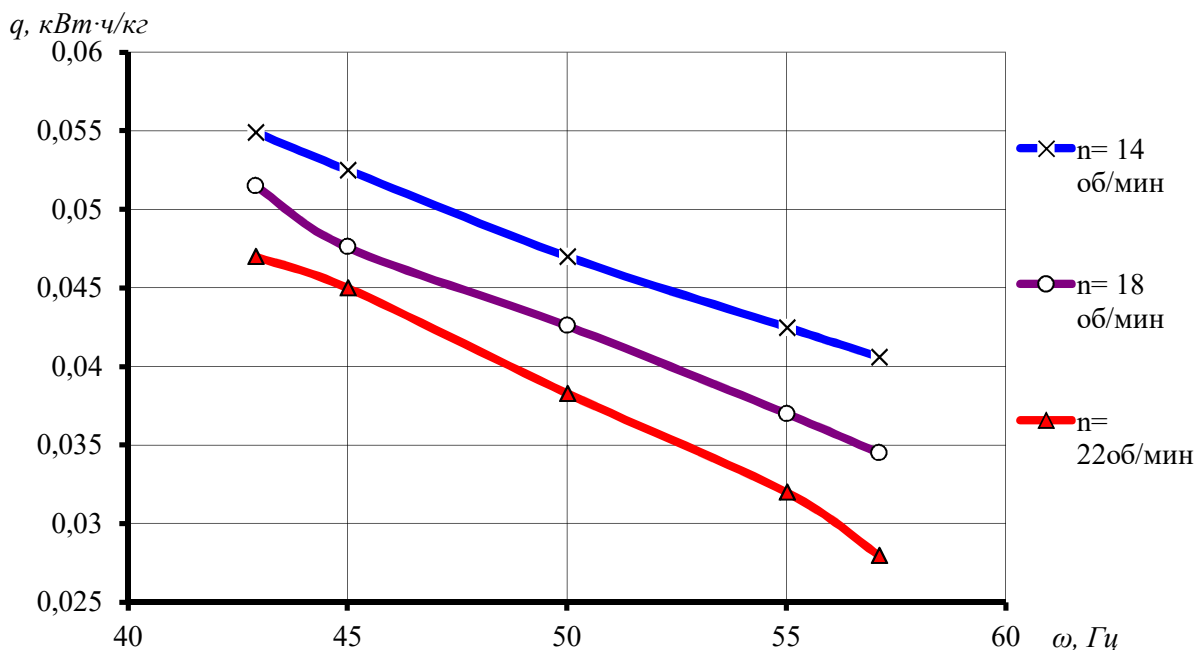


Рис. 3. Графики зависимости $q=f(\omega)$ при $\varphi_1=0,6$ и $\varphi_2=0,14$

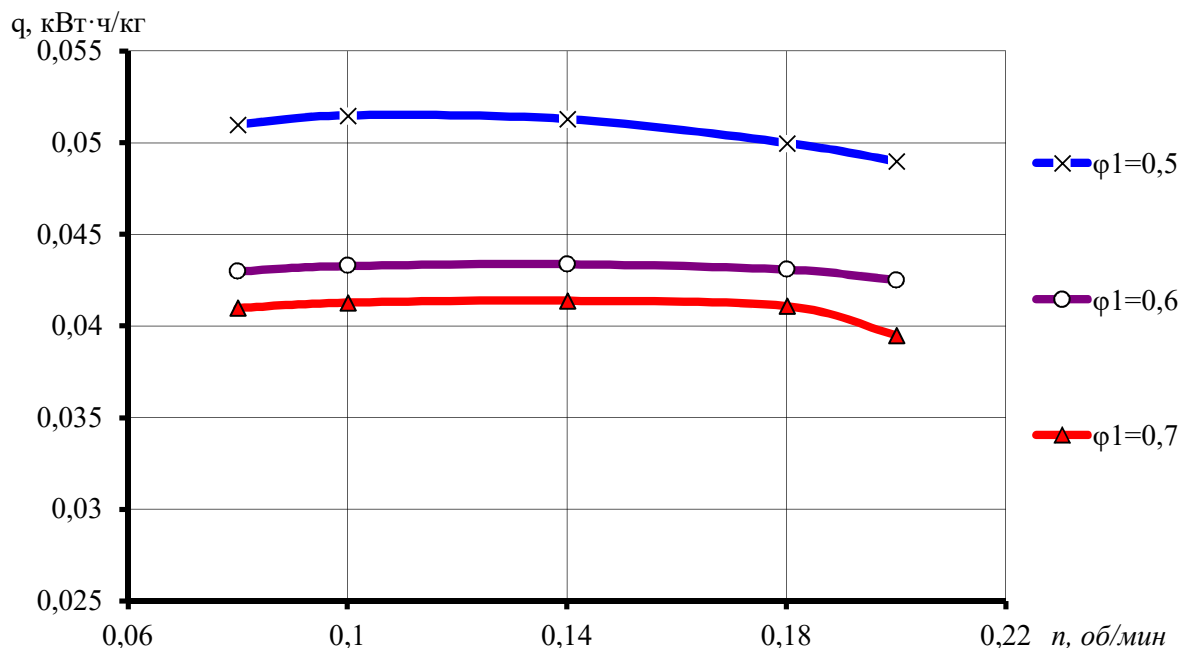
На рис. 3 представлена зависимость удельного расхода энергии q от частоты вибрации помольной камеры при различной частоте вращения.

Из графиков (рис. 3) видно, что зависимость $q=f(\omega)$ линейная нисходящая, что говорит о взаимном влиянии основного и второстепенного факторов ω и n на величину расхода энергии q . Снижение удельного расхода энергии q объясняется тем, что при увеличении частоты вибрации ω энергонапряженность процесса измельчения возрастает, глубина проникновения колебаний увеличивается, повышая эффективность процесса измельчения в установке. При увеличении частоты вибрации ω 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 ω , что дает заметное повышение эффективности вибрационного измельчения.

На рис. 4 представлена зависимость функции удельного расхода энергии от коэффициента загрузки φ_2 материалом и коэффициента загрузки φ_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 φ_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 φ_1 мелющих тел.

Рис.4. Графики зависимости $q=f(\phi_2)$ 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 ϕ_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 ϕ_1 на удельный расход энергии q , который при уменьшении ϕ_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 ϕ_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 ω 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

энергоемких 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.