



МАШИНА ЖАСАУ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2022_4_40
MPHTI 55.33.41

С.Р. Байгереев¹, Г.А. Гурьянов¹, А.Д. Сулейменов², В.А. Ким³

¹Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: sbaigereyev@edu.ektu.kz

E-mail: gguryanov@edu.ektu.kz

²Торайгыров университет, г. Павлодар, Казахстан

*E-mail: ansar_muslim_91@mail.ru**

³ТОО «ПСК «Инженерные решения», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: k-v-a@list.ru

**УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ В НОВОЙ
ВИБРОВРАЩАТЕЛЬНОЙ МЕЛЬНИЦЕ**

**ЖАҢА ДІРІЛДІ-АЙНАЛМАЛЫ ҰСАҚЫШТЫҢ ГЕОМЕТРИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ПАЙДАЛАНУ
ПАРАМЕТРЛЕРІНЕН ҰСАҚТАУ ЭНЕРГИЯСЫНЫҢ ТӘУЕЛДІЛІГІН АНЫҚТАУ**

**ESTABLISHING THE DEPENDENCE OF GRINDING ENERGY ON GEOMETRIC AND
OPERATIONAL PARAMETERS IN A NEW VIBROTORY MILL**

Аннотация. На сегодняшний день вопрос повышения эффективности тонкого измельчения материалов является актуальной задачей. Продукты процесса измельчения находят широкое использование в горнодобывающей, химической, строительной и др. отраслях. Данная статья посвящена теоретическому исследованию новой вибровращательной мельницы для тонкого измельчения материалов. Цель статьи заключается в определении математической зависимости величины энергии измельчения от основных характеристик мельницы. Как показали результаты исследований, наибольшее влияние на значение энергии измельчения оказывает угол наклона секций камеры. Результаты научной работы могут быть применены при создании реальной конструкции мельницы, что послужит обоснованием параметров измельчителя для получения требуемой тонкости помола.

Ключевые слова: мельница; энергия измельчения; мелющий шар; вибрация; удар; истирание.

Аңдатпа. Бүгінгі таңда материалдарды ұсақ ұнтақтау тиімділігін арттыру мәселесі өзекті мәселе болып табылады. Ұнтақтау процесінің өнімдері тау-кен, химия, құрылыс және басқа да салаларда кеңінен қолданылады. Бұл мақала материалдарды ұсақ ұнтақтау үшін жаңа вибровращательная ұсақтағышты теориялық зерттеуге арналған. Мақаланың мақсаты – ұнтақтау энергиясының ұсақтағыштың негізгі сипаттамаларына математикалық тәуелділігін анықтау. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, камера секцияларының көлбеу бұрышы ұнтақтау энергиясының мәніне ең үлкен әсер етеді. Ғылыми жұмыстардың нәтижелерін ұнтақтаудың қажетті ұсақтығын алу үшін ұнтақтағыштың параметрлеріне негіздеме ретінде қызмет ететін ұсақтағыштың нақты конструкциясын жасауға қолдануға болады.

Түйін сөздер: ұсаққыш; ұсақтау энергиясы; ұсақтағыш шар; діріл; соққы; үйкеліс.

Abstract. Nowadays the issue of increasing the efficiency of fine grinding of materials is an actual one.

The products of the grinding process are widely used in mining, chemical, construction and other industries. This article is dedicated to a theoretical study of a new vibro-rotary mill for fine grinding of materials. The purpose of the article is to determine the mathematical dependence of the grinding energy on the main characteristics of the mill. As the research results showed, the angle of inclination of the chamber sections has the greatest influence on the value of the grinding energy. The results of scientific work can be applied to create a real design of the mill, which will serve as a rationale for the parameters of the grinder to obtain the required product fineness.

Keywords: grinding energy; grinding ball; vibration; collision; attrition.

Введение. Шаровые мельницы являются одним из наиболее распространенных видов измельчительного оборудования с ударно-истирающим способом разрушения и применяются для выполнения различных технологических процессов. Высокая популярность данного вида измельчительной техники обосновывается простотой конструкции и высокой эффективностью за счет применения мелющих тел, усиливающих эффект измельчения [1].

Конструктивно шаровые мельницы представляют собой цилиндрические барабаны, заполненные мелющими телами. При вращении барабана смесь измельчаемого материала и мелющих тел, вращаясь по круговой траектории вместе с барабаном, отрывается от стенок и падает по параболической траектории. Процесс измельчения происходит при ударном и истирающем взаимодействии мелющих тел с частицами измельчаемого материала.

В настоящее время во многих сферах производства (горнодобывающей, строительной, химической) возникает необходимость в применении частиц материала сверхтонкого размера. Например, в строительной отрасли требуемая тонкость помола составляет не более 7 мкм, в горнодобывающей – не более 2 мкм, в химической – не более 5 мкм. В этой связи повышение эффективности работы шаровых мельниц является актуальной задачей [2-10].

Основным принципом повышения тонкости помола является увеличение энергии измельчения [11]. В шаровых мельницах энергия измельчения частиц зависит от высоты падения мелющих тел, определяемой скоростью вращения барабана.

Как показывают исследования, одной из проблем, приводящих к снижению энергии разрушения частиц, является повышение концентрации мелющих тел в периферийной части камеры при высоких значениях угловой скорости вращения барабана [12]. В этом случае имеет место так называемое «налипание» мелющих тел на стенку барабана, что ведет к снижению эффективности измельчения.

Для предотвращения указанной проблемы существуют различные варианты технических решений конструкций шаровых мельниц. Рассмотрим наиболее перспективные из них.

На рис. 1 представлен один из вариантов усовершенствования конструкции шаровых мельниц, который заключается во внедрении дополнительного углового параметра α между продольной осью камеры измельчения и горизонталью [13].

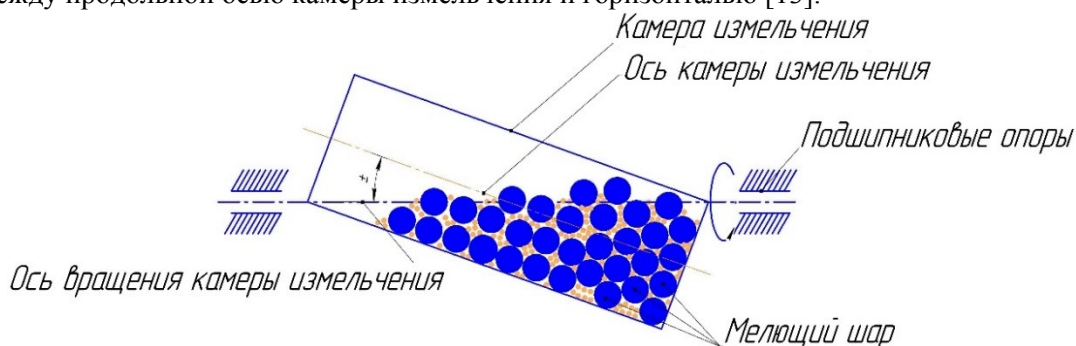
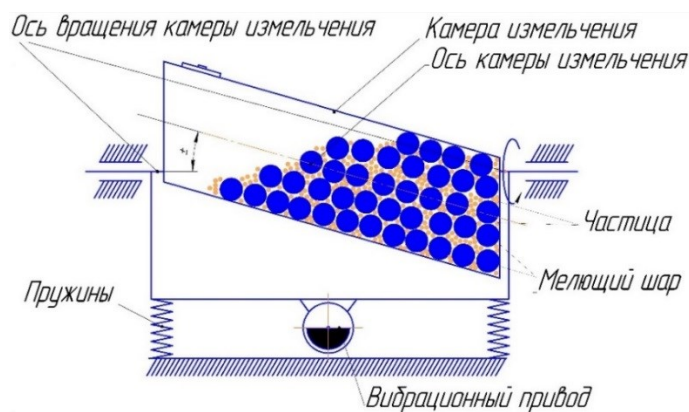


Рисунок 1. Шаровая мельница с наклонной камерой [13]

В данном случае обеспечивается сложное движение загрузки за счет возможности движения мелющих тел и частиц материала в продольном направлении. В отличие от классической конструкции шаровой мельницы, в рассматриваемой машине обеспечена дополнительная возможность движения загрузки в продольном направлении или, иными словами, повышена степень свободы загрузки. Недостатком данной конструкции является недостаточная сила удара мелющих тел для получения требуемого значения удельной поверхности.

Усовершенствованным вариантом данной конструкции шаровой мельницы является измельчитель, изображенный на рис. 2 [14].

**Рисунок 2.** Шаровая мельница с наклонной камерой вибровращательного типа [14]

В данной мельнице движущиеся мелющие тела описывают сложную траекторию в результате одновременного поступательного, вращательного и колебательного движений во всех трех плоскостях. В результате повышается эффективность помола, которая может быть выражена в увеличении степени измельчения или приросте удельной поверхности. Недостатком данной мельницы является низкая скорость продольного перемещения материала при высоких скоростях вращения камеры, что приводит к снижению полезного влияния на процесс измельчения как продольного перемещения материала, так и динамической составляющей нагружения в продольном направлении, характеризуемых силами удара и истирания.

Для реализации данного способа авторами предложена V-образная конструкция шаровой мельницы, общий вид которой изображен на рис. 3 [15].

Особенность предлагаемой конструкции заключается в том, что заполненная мелющими телами (шарами) камера помола выполнена в виде двух цилиндрических секций, соединенных торцами под углом друг к другу и имеющих возможность совершать одновременно вращательное и вибрационное движения.

За счет конструирования корпуса мельницы V-образной формы разрушение частиц материала организуется путем двухстороннего сжатия последних движущимися мелющими шарами в центральной части камеры.

Устройство для тонкого измельчения материалов работает следующим образом (рис. 3). Через загрузочно-выгрузочное устройство 14 в камеру 3 помола загружают мелющие тела и

исходный материал, а затем закрывают крышкой. Вибратор 13 создает вертикальные колебания подвижной рамы 10 и установленной на ней камеры 3 помола. Одновременно с этим привод 2 через муфту 8 и вал 9 вращает камеру 3 помола. За счет установки боковых цилиндрических поверхностей 6, 7 под углом друг к другу и вследствие качательного движения каждой цилиндрической секции, загрузка совершает продольно-возвратное движение от краев к середине камеры 3 помола и обратно. Вследствие вертикального-вибрационного и вращательного движения камеры 3 помола, загрузка совершает движение в направлении перпендикулярном оси вращения камеры 3 помола. По причине указанных движений загрузки мелющие тела оказывают на измельчаемый материал ударное и истирающее действие. За счет сложной траектории движения загрузки в камере помола 3 идет непрерывное перемешивание материала и мелющих тел. При этом за счет вращения камеры 3 помола и установки секции под углом друг к другу создается качательное движение каждой секции, материал совершает продольно-возвратное движение, а именно: сначала делится на две части, перемещаясь от середины к краям камеры 3 помола, потом, перемещаясь от краев к середине камеры 3 помола, эти части загрузки сталкиваются и соударяются друг с другом, вследствие чего создаются дополнительные продольные динамические нагрузки на измельчаемый материал. Силы сжатия материала между мелющими телами повышаются, что в сочетании с силами трения увеличивает тонкость помола и удельную поверхность измельчаемого материала и интенсифицирует процесс измельчения, т.е. увеличивает его скорость и уменьшает время достижения требуемой тонкости измельчения (удельной поверхности), тем самым повышается эффективность помола. По истечении заданного времени и достижения необходимой тонкости помола крышку открывают и готовый продукт выгружают из камеры 3 помола через загрузочно-разгрузочное устройство 14.

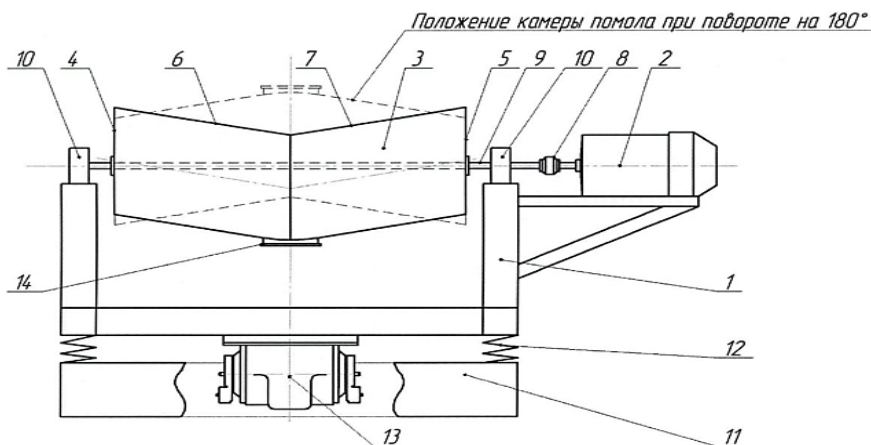


Рисунок 3. Общий вид новой шаровой мельницы V-образной формы [15]

Материалы и методы исследования. В данной статье авторами поставлена задача исследования зависимости энергии измельчения от геометрических и эксплуатационных параметров предлагаемого измельчителя.

Энергия разрушения частиц, которая определяется кинетической энергией движения мелющих шаров, определяется по следующей формуле [16]:

$$E = \frac{1}{2}mv^2, \quad (1)$$

где: m – масса мелющих шаров, кг; v – скорость движения мелющих шаров, м/с.

Скорость движения мелющих шаров v в формуле (1) определяется суммой двух составляющих. Первая составляющая – скорость движения мелющих шаров, возникающая под действием наклонной силы:

$$v_g = \frac{147,15}{n} \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

где n – частота вращения камеры, об/мин.

Вторая составляющая – скорость движения мелющих шаров, создаваемая вертикальным периодическим перемещением камеры:

$$v_v = A \cdot \omega \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

где ω – частота колебаний камеры, Гц.

Тогда общая скорость движения мелющих шаров для определения энергии измельчения по формуле (1) будет выглядеть следующим образом:

$$v = \left(\frac{147,15}{n} + A\omega \right) \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

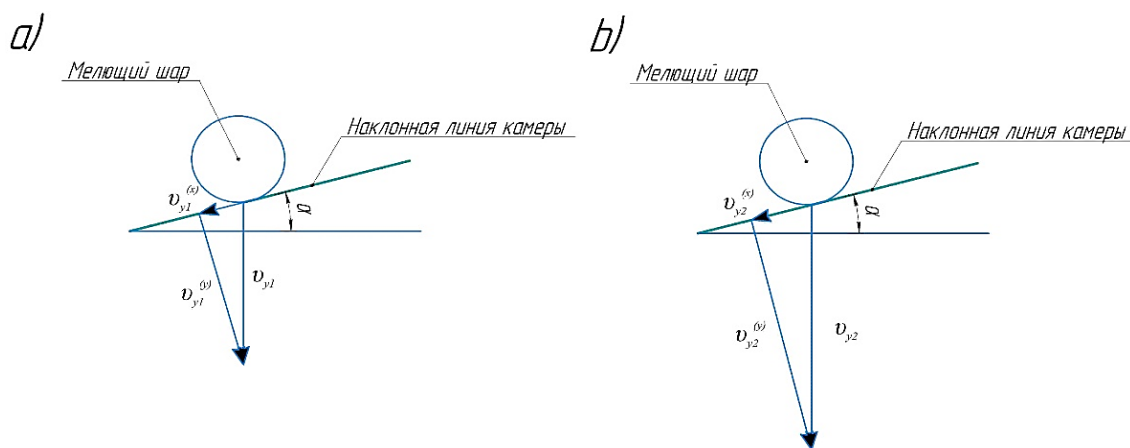


Рисунок 4. Определение проекций скоростей движения мелющих шаров на наклонную линию камеры: а – скорость движения мелющих шаров под действием силы тяжести; б – скорость движения мелющих шаров под действием вибрационной силы

В соответствии с формулой (1) с учетом (4) энергию измельчения можно определить по следующей зависимости:

$$E = m \cdot \left(\frac{147,15}{n} + A\omega \right)^2 \cdot \sin^2 \alpha. \quad (5)$$

Результаты и их обсуждения. Анализируя полученную формулу (5) для определения численного значения энергии измельчения в новой вибровращательной мельнице, можно сделать вывод, что энергия измельчения зависит от следующих параметров:

- 1) массы мелющих шаров, m ;
- 2) угла наклона секций относительно горизонтальной оси, α ;
- 3) амплитуды колебаний камеры, A ;
- 4) частоты вращения дебалансного вала, δ .

Влияние массы мелющих шаров. При определении степени влияния массы мелющих

шаров на энергию разрушения частиц измельчаемого материала примем допущение, что расположение шаров формирует так называемую квадратную конфигурацию.

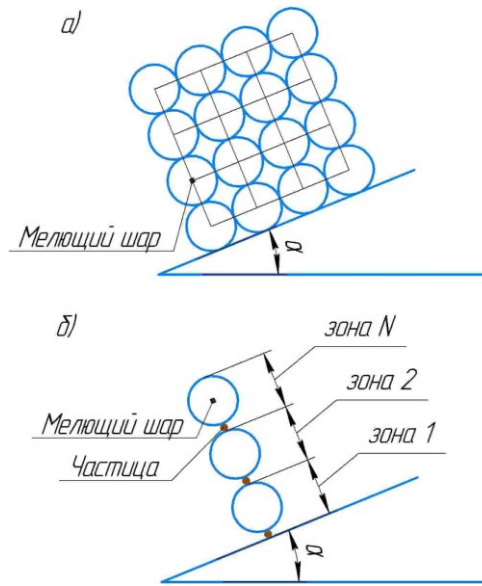


Рисунок 5. Схема расположения мелющих шаров (а);
схема зонирования мелющих шаров и частиц (б)

Схему, представленную на рис. 5, можно условно разделить на определенные зоны. Каждая зона включает в себя одну частицу и один мелющий шар. В момент встречного соударения мелющих шаров произойдет остановка первого мелющего шара, что по принципу цепной реакции приведет к последовательной остановке последующих. При этом в данной системе, первая частица, расположенная в первой зоне, испытает на себе суммарную массу всех предыдущих шаров, а частицы последующих зон – значение массы в зависимости от количества предыдущих шаров. Таким образом, энергия измельчения в разных зонах расположения мелющих шаров будет отличаться.

С учетом принятых исходных данных, при длине секции камеры 160 мм и диаметре стальных мелющих шаров 10 мм можно выделить 16 зон. При этом диапазон возможного изменения суммарной массы мелющих шаров в зависимости от зоны составит от 0,0165 до 0,264 кг.

Влияние угла наклона секций камеры. Как следует из зависимости (2), между значениями угла наклона секций камеры и энергии измельчения существует прямо пропорциональная зависимость. Теоретически диапазон варьирования значения угла наклона секций камеры составляет $0 < \alpha < 900$.

С применением формулы (5) проведем исследование характера изменения энергии измельчения от угла наклона секций камеры в различных зонах. При вычислении указанной зависимости примем следующие значения амплитуды колебаний камеры, угловой скорости вращения дебалансного вала и частоты вращения камеры: $A=4,5$ мм, $\omega=314,16$ рад/с и $n=22$ об/мин.

Графическая интерпретация результатов расчета приведена на рис. 6.

Как следует из графика, представленного на рис. 6, угол наклона секций камеры нового измельчителя оказывает значительное влияние на энергию измельчения. Отметим, что

характер графика изменения энергии разрушения становится более крутым при увеличении массы мелющих шаров, т.е. в последних зонах.

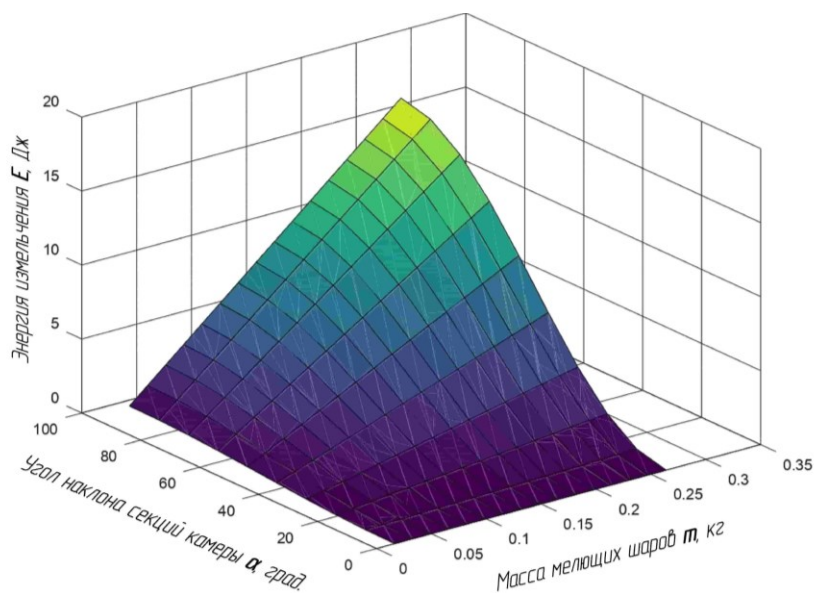


Рисунок 6. Зависимость энергии измельчения от угла наклона секций камеры и массы мелющих шаров

В качестве примера в табл. 1 приведены количественные значения энергии разрушения мелющими шарами $m = 0,264$ кг при изменении угла наклона секций камеры α .

Из данных, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что энергия измельчения увеличилась на 99,97 % при увеличении значения α с 1 до 890.

Таблица 1. Численные значения энергии разрушения при соответствующих величинах угла наклона секций камеры

Угол наклона секций камеры, α , град	Энергия разрушения, Е, Дж
1	0,0053
5	0,1316
10	0,5226
15	1,1610
20	2,0274
25	3,0954
30	4,3328
35	5,7018

Окончание табл. 1

Угол наклона секций камеры, α , град	Энергия разрушения, Е, Дж
40	7,1608
45	8,6656
50	10,1703
55	11,6294
60	12,9983
65	14,2357

70	15,3038
75	16,1702
80	16,8085
85	17,1995
89	17,3258

Влияние амплитуды колебаний камеры. Проведем исследование характера изменения энергии измельчения при варьировании амплитуды. Исследования влияния амплитуды колебаний камеры в предлагаемой конструкции измельчителя проведем в различных зонах расположения частиц при изменении амплитуды в диапазоне от 1,5 до 4,5 мм, который, как правило, применяется в вибрационных мельницах. При проведении расчетов значение угла наклона примем постоянным $\alpha=600$.

Трехмерный график изменения энергии разрушения в зависимости от изменения амплитуды и массы мелющих шаров представлен на рис. 7.

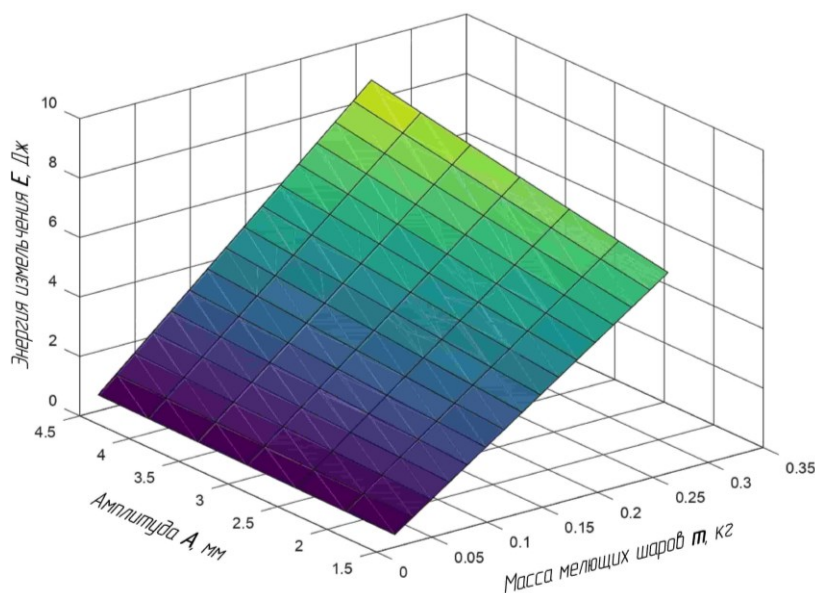


Рисунок 7. График зависимости энергии разрушения от амплитуды и массы мелющих шаров

Из графика (рис. 7) видно, что энергия измельчения изменяется незначительно при регулировании амплитуды колебаний камеры.

В табл. 2 приведена количественная информация о зависимости энергии измельчения от амплитуды при $m=0,264$ кг.

Таблица 2. Численные значения энергии разрушения при соответствующих значениях амплитуды колебания камеры

Амплитуда колебаний камеры, A , мм	Энергия разрушения, E , Дж
1,5	10,1502
2	10,6005
2,5	11,0605
3	11,5303

3,5	12,0099
4	12,4992
4,5	12,9983

На основании данных, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод, что с увеличением амплитуды с минимального значения диапазона до максимального, энергия измельчения при установленных исходных данных изменилась всего на 21,91 %. Полученный результат объясняется тем, что аналитическая зависимость (5) учитывает только ударные воздействия мелющих шаров на частицу, но не принимает во внимание истирающее воздействие, что обеспечивается в результате колебательного движения шаров.

Влияние угловой скорости вращения дебалансного вала. Угловая скорость дебалансного вала определяется по следующей зависимости:

$$\omega = \frac{\pi n}{30}, \quad (6)$$

где n – частота вращения дебалансного вала, об/мин.

Проведем исследование характера зависимости угловой скорости вращения дебалансного вала при диапазоне изменения n от 1000 до 3000 об/мин, т.е. при варьировании угловой скорости вращения дебалансного вала от 104,72 до 314,16 рад/с. График зависимости приведен на рис. 8.

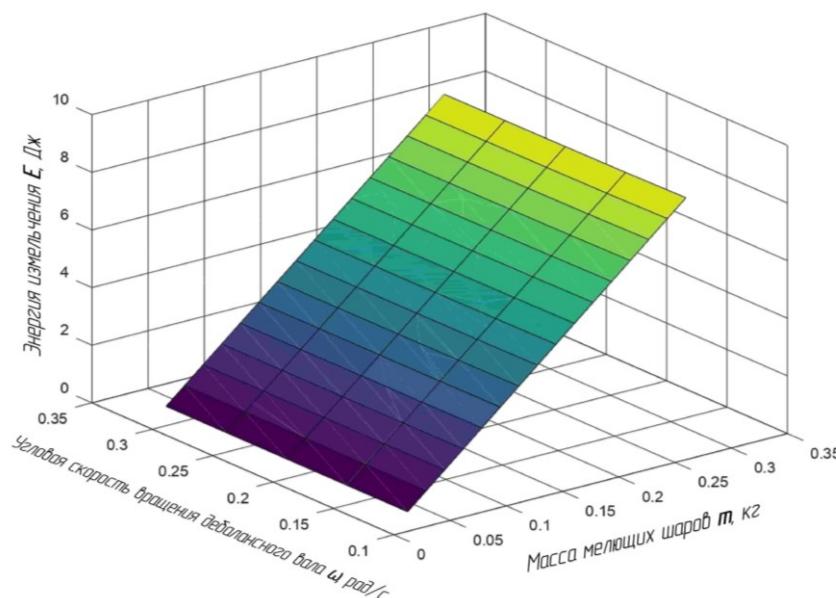


Рисунок 8. График зависимости энергии разрушения от угловой скорости вращения дебалансного вала и массы мелющих шаров

Как следует из графика (рис. 8), тренд изменения энергии измельчения при регулировании угловой скорости вращения дебалансного вала также незначительный, как и при изменении амплитуды колебаний камеры.

Численные значения энергии измельчения при соответствующих величинах угловой скорости вращения дебалансного вала при $m=0,264$ кг, $A=4,5$ мм, $n=22$ об/мин, $\alpha=450$ приведены табл. 3.

Из табл. 3 следует, что энергия измельчения при увеличении угловой скорости

вращения дебалансного вала от минимального значения до максимального при принятых исходных данных увеличилась на 21,91 %.

Таблица 3. Численные значения энергии разрушения при соответствующих значениях угловой скорости вращения дебалансного вала

Угловая скорость вращения дебалансного вала, ω , рад/с	Энергия измельчения, Е, Дж
104,72	10,1502
150	10,7362
200	11,4023
250	12,0885
300	12,7947
314,16	12,9983

Многофакторный вычислительный эксперимент. Для дальнейшего исследования параметров нового измельчителя проведем многофакторный вычислительный эксперимент в соответствии с матрицей, представленной в табл. 4.

Таблица 4. Матрица многофакторного вычислительного эксперимента

Случаи вычислительного эксперимента	α , град	A, мм	ω , рад/с
Случай №1	1 (min)	1,5 (min)	104,72...314,16 (var)
Случай №2	45 (med)	3 (med)	104,72...314,16 (var)
Случай №3	89 (max)	3,5 (max)	104,72...314,16 (var)
Случай №4	1-89 (var)	1,5 (min)	104,72 (min)
Случай №5	1-89 (var)	3 (med)	209,44 (med)
Случай №6	1-89 (var)	4,5 (max)	314,16 (max)
Случай №7	1 (min)	1,5-4,5	104,72 (min)
Случай №8	45 (med)	1,5-4,5	209,44 (med)
Случай №9	89 (max)	1,5-4,5	314,16 (max)

Как следует из табл. 4, матрица состоит из 9 частных случаев. Уровни варьирования факторов соответствуют наименьшему (min), среднему (med) и наибольшему (max) значениям параметров в пределах выбранных диапазонов.

Согласно планированию многофакторного вычислительного эксперимента (табл. 4), каждый случай соответствует вычислению тонкости помола при различных комбинациях уровней варьирования факторов в рамках соответствующего принятого диапазона. Результаты вычислений многофакторного вычислительного эксперимента представлены в табл. 5-13.

Таблица 5. Расчетные данные (случай № 1)

ω , рад/с	104,72	209,44	314,16
v , мм/с	0,1194	0,1222	0,1249

Е, Дж	0,0038	0,0039	0,0041
-------	--------	--------	--------

Таблица 6. Расчетные данные (случай № 2)

ω , рад/с	104,72	209,44	314,16
v , мм/с	4,9517	5,1739	5,3960
Е, Дж	6,4732	7,0669	7,6869

Таблица 7. Расчетные данные (случай № 3)

ω , рад/с	104,72	209,44	314,16
v , мм/с	7,1588	7,6299	8,1011
Е, Дж	13,5295	15,3691	17,3258

Таблица 8. Расчетные данные (случай № 4)

α , град	1	45	89
v , мм/с	0,1195	4,9517	7,0017
Е, Дж	0,0038	6,4732	12,9424

Таблица 9. Расчетные данные (случай № 5)

α , град	1	45	89
v , мм/с	0,1195	4,9517	7,0017
Е, Дж	0,0038	6,4732	12,9424

Таблица 10. Расчетные данные (случай № 6)

α , град	1	45	89
v , мм/с	0,1414	5,7292	8,1011
Е, Дж	0,0053	8,6656	17,3258

Таблица 11. Расчетные данные (случай № 7)

A , мм	1,5	3	4,5
v , мм/с	0,1195	0,1222	0,1249
Е, Дж	0,0038	0,0039	0,0041

Таблица 12. Расчетные данные (случай № 8)

A , мм	1,5	3	4,5
v , мм/с	4,9517	5,1739	5,3960
Е, Дж	6,4732	7,0669	7,6869

Таблица 13. Расчетные данные (случай № 9)

A , мм	1,5	3	4,5
v , мм/с	7,1588	7,6299	8,1011
Е, Дж	13,5295	15,3691	17,3258

Заключение. Из результатов многофакторного эксперимента следует, что максимальные

значения энергии измельчения получаются при максимальных значениях диапазонов входных параметров.

Таким образом, в данной статье получены следующие результаты:

1. Проведен анализ существующих конструкций вибровращательных мельниц.
2. На основании результатов анализа представлена новая конструкция вибровращательной мельницы, особенность которой заключается в V-образной форме камеры измельчителя.

3. Выведена математическая зависимость для определения энергии разрушения частиц измельчаемого материала мелющими шарами. Руководствуясь полученной математической зависимостью, следует констатировать, что в новой конструкции вибровращательной мельницы возможно получение энергии измельчения 17 Дж. Оценка тонкости помола, соответствующая полученному значению энергии измельчения, будет осуществлена после разработки соответствующей теории измельчения.

4. Проведены исследования влияния основных параметров измельчителя (массы мелющих шаров, угла наклона секций камеры, амплитуды колебаний, угловой скорости вращения дебалансного вала) на значение энергии измельчения.

Список литературы

1. Ибрагимова З.А. Исследование параметров износостойкости тяжелонагруженных зубчатых передач и разработка ресурсосберегающей технологии их изготовления: дис. ... д-ра филос. (PhD), спец. 6D071200 «Машиностроение». – Алматы, 2014. – С. 11.
2. C.T. Jayasundara, R.Y. Yang, A.B. Yu, J. Rubenstein, Effects of disc rotation speed and media loading on particle flow and grinding performance in a horizontal stirred mill // *International Journal of Mineral Processing*. – 2010. – Vol. 96. – Pp. 27-35.
3. Гурьянов Г.А. On the issue of design effective fine grinding equipment based on the rationalization its functioning principles [Текст] / Г.А. Гурьянов, С.П. Байгереев // *Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева*. – 2017. – № 2. – С. 52-57.
4. M. Riley, S. Pinkney, S. Blackburn, N.A. Rowson. Spatial distributions of media kinetic energy as measured by positron emission particle tracking in a vertically stirred media mill // *Minerals Engineering*. – 2016. – № 98. – С. 177-186.
5. Okay Altun, Hakan Benzer, Udo Enderle. The effects of chamber and stirrer design on dry horizontal stirred mill performance // *Minerals Engineering*. – 2014. – № 69. – С. 24-28.
6. K. Ohenoja, M. Illikainen, Effect of operational parameters and stress energies on stirred balls milling of talc // *Powder Technology*. – 283 (2015) . – Pp. 254-259.
7. B. Abdeev, S. Baigereyev, G. Guryanov, Generalized dynamic theory of a solid particle grinding by pulse-force compression with two non-deformable balls // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 4 (2018) . – Pp. 278-289.
8. A. Racz, B. Csoke, Application of the product related stress model for product dispersity control in dry stirred balls milling // *International Journal of Mineral Processing*. – 157 (2016) . – Pp. 28-35.
9. Ch. Patel, Z. Murthy, M. Chakraborty, Effects of operating parameters on the production of barium sulfate nanoparticles in stirred balls mill // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 18 (2012) . – Pp. 1450-1457.
10. K. Ohenoja, M. Illikainen, Effect of operational parameters and stress energies on stirred balls milling of talc // *Powder Technology*. – 283 (2015) . – Pp. 254-259.
11. Гурьянов Г.А., Байгереев С.П. Примеры формулирования и реализации принципов совершенствования измельчителей тонкого помола: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию д-ра техн. наук, проф. КазАДИ им. Л.Б. Гончарова Киялбаева Абды Киялбаевича на тему: «Актуальные проблемы развития строительства и эксплуатации автомобильных дорог», Алматы. – 2017. – С. 217-221.
12. M.H. Wang, R.Y. Yang, A.B. Yu. DEM investigation of energy distribution and particle breakage in tumbling ball mills // *Powder Technology*. – 2012. – V. 223. – Pp. 83-91.
13. А.с. 1827288 СССР, МПК В02С 17/02. Шаровая мельница [Текст] / Ларионов Е.Д., Бородин Н.А.,

- Долгих А.А. - 4926078/33; заявлено 08.04.93; опубл. 15.07.93, Бюл.№ 26. – С.1.
14. Гаврунов А.Ю., Богданов В.С. Вибровращательная мельница с продольно-поперечным движением мелющих тел // Вестник ТГТУ. – 2013. – Т. 19. – № 4. – С. 864-869.
 15. Патент РК № 2017/0343.2, 29.12.2017. Устройство для тонкого измельчения материалов / Гурьянов Г.А., Кумыкова Т.М., Сулейменов А.Д. ; Бюл. № 26 (II).
 16. Сивухин Д. В. Общий курс физики. – М.: Физматлит, 2005. – Т. I. Механика. – С. 37. – 560 с.

References

1. Ibragimova Z.A. Issledovanie parametrov iznosostojkosti tyazhelonagruzhennyh zubchatyh pere-dach i razrabotka resursosberegayushchej tekhnologii ih izgotovleniya: dis. ... d-ra filos. (PhD), spec. 6D071200 «Mashinostroenie». – Almaty, 2014. – S.11.
2. C.T. Jayasundara, R.Y. Yang, A.B. Yu, J. Rubenstein, Effects of disc rotation speed and media loading on particle flow and grinding performance in a horizontal stirred mill, *International Journal of Mineral Processing*. – 2010. – Vol. 96. – Pp. 27-35.
3. Gur'yanov G.A. On the issue of design effective fine grinding equipment based on the rationalization its functioning principles [Tekst] / G.A. Gur'yanov, S.R. Bajgereev // *Vestnik Vostochno-Kazahstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva*. – 2017. – № 2. – S. 52-57.
4. M.Riley, S.Pinkney, S.Blackburn, N.A.Rowson. Spatial distributions of media kinetic energy as measured by positron emission particle tracking in a vertically stirred media mill // *Minerals Engineering*. – 2016. – № 98. – С. 177-186.
5. Okay Altun, Hakan Benzer, Udo Enderle. The effects of chamber and stirrer design on dry horizontal stirred mill performance // *Minerals Engineering*. – 2014. – № 69. – С. 24-28.
6. K. Ohenoja, M. Illikainen, Effect of operational parameters and stress energies on stirred balls milling of talc, *Powder Technology*. – 283 (2015) . – 254-259.
7. B. Abdeev, S. Baigereyev, G. Guryanov, Generalized dynamic theory of a solid particle grinding by pulse-force compression with two non-deformable balls // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 4 (2018). – Pp. 278-289.
8. A. Racz, B. Csoke, Application of the product related stress model for product dispersity control in dry stirred balls milling // *International Journal of Mineral Processing*. – 157 (2016) . – Pp. 28-35.
9. Ch. Patel, Z. Murthy, M. Chakraborty, Effects of operating parameters on the production of barium sulfate nanoparticles in stirred balls mill // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 18 (2012) . – Pp. 1450-1457.
10. K. Ohenoja, M. Illikainen, Effect of operational parameters and stress energies on stirred balls milling of talc // *Powder Technology*. – 283 (2015) . – Pp. 254-259.
11. Gur'yanov G.A., Bajgereev S.R. Primery formulirovaniya i realizacii principov sovershenstvovaniya izmel'chitelej tonkogo pomola: Sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 60-letiyu d-ra tekhn. nauk, prof. KazADI im. L.B. Goncharova Kiyalbaeva Abdy Kiyalbaevicha na temu: «Aktual'nye problemy razvitiya stroitel'stva i ekspluatatsii avtomobil'nyh dorog», Almaty. – 2017. – S. 217-221.
12. M.H. Wang, R.Y. Yang, A.B. Yu. DEM investigation of energy distribution and particle breakage in tumbling ball mills // *Powder Technology*. – 2012. – V. 223. – Pp. 83-91
13. A.s. 1827288 SSSR, MPK B02C 17/02. SHarovaya mel'nica [Tekst]/ Larionov E.D., Borodin N.A., Dolgih A.A. - 4926078/33; zayavleno 08.04.93; opubl. 15.07.93, Byul. № 26. – S. 1
14. Gavrunov A.YU., Bogdanov V.S. Vibrovrashchatel'naya mel'nica s prodol'no-poperechnym dvizheniem melyushchih tel // *Vestnik TGTU*. – 2013. – Т. 19. № 4. – S. 864-869.
15. Патент РК № 2017/0343.2, 29.12.2017. Ustrojstvo dlya tonkogo izmel'cheniya materialov / Gur'yanov G.A., Kумыкова Т.М., Sulejmenov A.D.; Byul. № 26 (II).
16. Sivuhin D. V. Obshchij kurs fiziki. – М.: Fizmatlit, 2005. – Т. I. Mekhanika. – S. 37. – 560 s.