

УДК 621.926

**В. И. Козловский, П. Е. Вайтхович, Н. П. Саевич**  
Белорусский государственный технологический университет

### АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ БИСЕРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

В статье представлен алгоритм расчета, который позволяет с использованием таких основных начальных данных, как производительность, свойства измельчаемого материала, объем рабочей камеры, начальный и конечный размер частиц, определять основные конструктивные и технологические параметры горизонтальной бисерной мельницы. Полученные в результате расчета данные позволят разработать конструкторскую документацию и определить энергозатраты мельницы в целом.

На начальном этапе расчета в зависимости от производительности и эффективности диспергирования определяется скорость подачи суспензии, диаметр мелющих тел и диаметр корпуса. Далее определяются основные параметры ротора: диаметр перемешивающих дисков, расстояние между ними, частота вращения ротора, параметры работы динамического сепаратора. Исходя из полученных данных и рабочего объема мельницы рассчитывается количество перемешивающих дисков. На заключительном этапе определяются потребляемая мощность и диаметр вала ротора.

Составленный алгоритм показывает взаимосвязь основных конструктивных и технологических параметров горизонтальной бисерной мельницы и позволяет оценить влияние их друг на друга.

**Ключевые слова:** бисерная мельница горизонтальная, алгоритм расчета, технологические и конструктивные параметры, эффективность диспергирования.

**V. I. Kozlovskiy, P. Ye. Vaytsekhovich, N. P. Saevich**  
Belarusian State Technological University

### HORIZONTAL BEAD MILL CALCULATION ALGORITHM

The article presents a calculation algorithm that allows using the basic initial data such as productivity, properties of the crushed material, the volume of the working chamber, the initial and final particle size, to determine the main structural and technological parameters of a horizontal bead mill. The data obtained as a result of the calculation will allow developing design documentation and determining the energy consumption of the mill as a whole.

At the initial stage of the calculation, depending on the performance and dispersion efficiency, the feed rate of the suspension, the diameter of the grinding media and the diameter of the housing are determined. Next, the main parameters of the rotor are determined: the diameter of the mixing disks, the distance between them, the rotor speed, the parameters of the dynamic separator. Based on the data obtained and the working volume of the mill, the number of mixing disks is calculated. At the final stage, the power consumption and the diameter of the rotor shaft are determined.

The compiled algorithm shows the relationship between the main structural and technological parameters of a horizontal bead mill and allows us to evaluate their influence on each other.

**Key words:** horizontal bead mill, calculation algorithm, technological and design parameters, dispersion efficiency.

**Введение.** Создание любого измельчающего агрегата начинается с расчета основных конструктивных и технологических параметров, которые в дальнейшем будут использоваться для разработки конструкторской документации, оценки целесообразности его использования. Начальными данными для расчета являются: производительность, свойства измельчаемого материала, начальный и конечный размеры частиц. Кроме того, могут указываться различные ограничения, например, как геометрических параметров рабочего органа, так и габаритных размеров самого агрегата.

Создание алгоритма расчета является своеобразным заключительным этапом изучения измельчающего агрегата. Наличие алгоритма расчета позволяет не только значительно сократить время

на конструирование нового образца мельницы, но и дает возможность определить взаимосвязь между основными технологическими и конструктивными параметрами и использовать их для создания оптимального измельчающего агрегата.

Анализ литературных источников [1–4] показал, что полных и комплексных алгоритмов расчета бисерных мельниц не существует. Большинство их исследований сводится к изучению зависимости одного или нескольких технологических параметров от конструктивных соотношений основных узлов мельницы. Кроме того, такому изучению в основном подвергались бисерные мельницы вертикального типа. Что касается горизонтальных, то сведения о них носят в большинстве рекламный характер.

Проведенные нами за последние годы теоретические и экспериментальные исследования горизонтальных бисерных мельниц позволили получить достаточно большую базу данных о влиянии различных конструктивных и технологических параметров на процесс измельчения, которая может быть использована для создания их алгоритма расчета [5].

**Основная часть.** При конструировании горизонтальных бисерных мельниц начальными данными в основном являются: производительность ( $Q$ , м<sup>3</sup>/ч), объем рабочей камеры ( $V$ , м<sup>3</sup>), свойства измельчаемого материала, начальный и конечный размеры частиц.

При диспергировании материала в бисерной мельнице не всегда получается продукт необходимого конечного размера. Поэтому данные измельчители в основном работают периодически и материал пропускают сквозь несколько раз, пока не будет достигнут необходимый конечный размер продукта. В связи с этим такой параметр, как конечный размер частиц, в данном случае не совсем удобен, его можно заменить на эффективность диспергирования:

$$E = 100 - R_d, \quad (1)$$

где  $R_d$  – аналог остатка на сите с отверстиями  $d$ , мкм.

Критерий эффективности в таком виде показывает, какое количество продукта за один проход имеет граничный размер, равный или меньший, чем необходимо. Его удобнее использовать при определении необходимого количества проходов материала через мельницу.

На первом этапе (рисунок) в зависимости от эффективности диспергирования по эмпирическим формулам можно предварительно определить скорость подачи суспензии ( $v_c$ , м/с) и диаметр мелющих тел ( $D_{ш}$ , мм) [6, 7]. Например, для диспергирования мела при окружной скорости вращения дисков  $v_d = 10$  м/с:

– при  $0,097 \leq v_c \leq 0,226$

$$E = -1165,5v_c^2 + 171,7v_c + 94,8; \quad (2)$$

– при  $0,5 \leq D_{ш} \leq 3,0$

$$E = -19,83 \ln(D_{ш}) + 84,247. \quad (3)$$

Далее определяется площадь поперечного сечения ( $S = Q / v_c$ , м<sup>2</sup>) и диаметр рабочей камеры ( $D_k = (4S / \pi)^{0,5}$ , м).

Второй этап (рисунок) заключается в определении геометрических и технологических параметров ротора: диаметра перемешивающих дисков и расстояния между ними, частоты вращения ротора, основных размеров динамического сепаратора.

Построение профилей распределения скоростей среды в зоне дисков [8] показало, что максимальное возмущающее воздействие, характеризующееся значительным изменением скорости среды, диск оказывает только на расстоянии 15–20 мм. Таким образом, оптимальное расстояние между двумя соседними дисками ( $l_d$ , мм) не должно превышать 30–40 мм.

В результате проведенного компьютерного моделирования оптимальным соотношением диаметра диска  $d_d$  и корпуса  $D_k$  можно считать [8]:

$$d_d / D_k = (0,65 - 0,74). \quad (4)$$

По поводу частоты вращения следует обратиться к экспериментальным данным, которые показали, что наибольшая эффективность диспергирования достигается при линейной скорости вращения дисков  $v_d$ , равной 10 м/с. Зная диаметр дисков, можно определить частоту вращения ротора по формуле

$$n = \frac{v_d}{\pi d_d}. \quad (5)$$

Методика расчета динамического сепаратора подробно описана в работе [9]. Она позволяет на основе теоретического и компьютерного анализа движения загрузки в бисерной мельнице определить границу разделения материала:

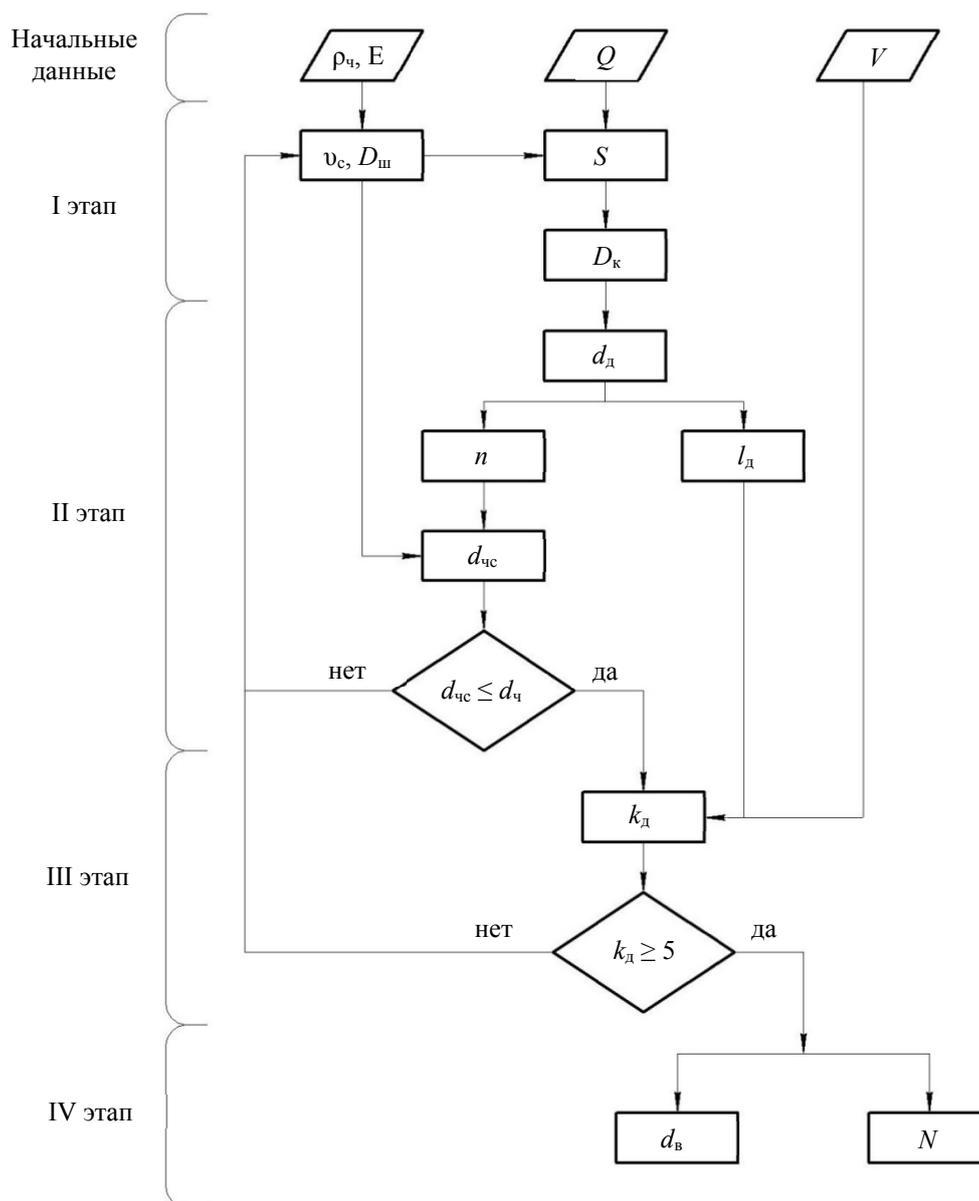
$$d_{чс} = \frac{3}{4} c_{\chi} k_{\phi} R_c \frac{\rho_c v_r^2}{\rho_m v_{\phi}^2}, \quad (6)$$

где  $c_{\chi}$  – коэффициент сопротивления движению частицы в жидкости;  $k_{\phi}$  – коэффициент формы;  $R_c$  – радиус сепаратора по внешним кромкам пальцев, мм;  $v_r$  и  $v_{\phi}$  – составляющие скорости в радиальном и окружном направлениях соответственно, м/с;  $\rho_c$  – плотность среды внутри мельницы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_m$  – плотность измельчаемого материала, кг/м<sup>3</sup>.

Если рассчитанный по формуле (6) диаметр частиц меньше либо равен конечному, то параметры подобраны верно, если больше – необходимо понизить значение скорости подачи суспензии и произвести перерасчет.

Третий этап (рисунок) расчета заключается в определении количества дисков в зависимости от параметров, рассчитанных выше, и объема рабочей камеры. На основе анализа промышленных установок и с целью создания продолжительной зоны диспергирования количество перемешивающих дисков должно быть не менее пяти. Если оно меньше, то также понижается значение скорости подачи суспензии и производится перерасчет.

На четвертом этапе (рисунок) производится расчет затрат мощности на перемешивание ( $N$ , Вт) и определение диаметра вала ( $d_b$ , м).



Алгоритм расчета горизонтальной бисерной мельницы

Выражение (7) для определения затрат мощности было получено при теоретическом анализе движения среды, обтекающей вращающийся диск [8].

$$N = 0,616\pi\rho_c\omega^2r^4k_d\sqrt{v\omega}, \quad (7)$$

где  $r$  – радиус дисков, м;  $k_d$  – количество дисков;  $v$  – кинематическая вязкость среды, Па·с;  $\omega$  – угловая скорость вращения диска, рад/с.

Как можно заметить, при анализе этого выражения основными параметрами, которые могут оказывать воздействие на потребляемую мощность, являются угловая скорость и радиус диска. Также можно отметить, что при проведении экспериментальных исследований было получено довольно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений мощности.

Диаметр вала ( $d_b$ , мм) ротора играет очень важную роль в процессе работы горизонтальной бисерной мельницы. Основной его недостаток – это большая консоль, на которой помимо перемешивающих дисков располагается динамический сепаратор. Хотя в процессе работы и происходит самоцентрирование вала, но при пуске и остановке мельницы возникает его смещение относительно оси и, как следствие, радиальное биение. Оно приводит не только к быстрому выходу из строя подшипников качения, но и износу дорогостоящего торцевого уплотнения. Поэтому диаметр вала должен определяться из условий виброустойчивости, жесткости и прочности [10]. Можно отметить, что основными параметрами, влияющими на него, являются не только масса сепаратора и дисков, но и расстояние между подшипниками качения.

**Заключение.** В предложенном алгоритме расчета используются методики и формулы, позволяющие определить, исходя из основных технологических данных, оптимальные технологические и конструктивные параметры горизонтальных бисерных мельниц. По полученным значениям можно

разработать конструкторскую документацию, а также просчитать энергозатраты на процесс измельчения материалов всей установки [8]. Кроме того, полученный алгоритм отражает взаимосвязь основных параметров мельницы и, анализируя его, можно оценить влияние их друг на друга.

### Список литературы

1. Hiem A., Powlak A. The effect of the number of contact points grinding elements on the rate of grinding in ball mills // *Physicochem. Probr. Miner. Process.* 2004. No. 38. P. 147–155.
2. Kwade A., Schwedes J. Autogenzerkleinerung in Ruhrwerksmühlen // *Chem. Ing. Techn.* 1996. No. 7. P. 12–14.
3. Уилдер М., Микола З. Преимущества и экономическая эффективность новой технологии диспергирования // *Лакокрасочные материалы и их применение.* 2003. № 7. С. 46–48.
4. Фромхерз Х., Спорнбергер С. Прогрессивные технологии обеспечивают эффективность диспергирования // *Лакокрасочные материалы и их применение.* 2002. № 3. С. 16–19.
5. Козловский В. И. Оптимизация процесса сверхтонкого помола в шаровой мельнице с мешалкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / В. И. Козловский; Белорус. гос. технол. ун-т. Минск, 2017. 25 с.
6. Козловский В. И., Вайтехович П. Е. Влияние конструктивных особенностей шаровой мельницы с мешалкой на ее эффективность // *Лакокрасочные материалы и их применение.* 2015. № 7. С. 43–45.
7. Козловский В. И., Вайтехович П. Е., Камлюк Т. В. Влияние размера мелющих тел на эффективность диспергирования материала в шаровой мельнице с мешалкой // *Труды БГТУ.* 2016. № 3: Химия и технология неорганических веществ. С. 136–141.
8. Козловский В. И., Вайтехович П. Е. Определение энергозатрат на вращение рабочего органа шаровой мельницы с мешалкой // *Химическое и нефтегазовое машиностроение.* 2016. № 5–6. С. 14–17.
9. Козловский В. И., Вайтехович П. Е. Определение границы разделения материала в динамическом сепараторе горизонтальной бисерной мельницы // *Вестник ГРГУ имени Янки Купалы. Сер. 6, Техника.* 2018. № 2. С. 61–67.
10. Васильцов Э. А., Ушаков В. Г. Аппараты для перемешивания жидких сред: справоч. пособие. Ленинград: Машиностроение, 1979. 272 с.

### References

1. Hiem A., Powlak A. The effect of the number of contact points grinding elements on the rate of grinding in ball mills. *Physicochem. Probr. Miner. Process*, 2004, no. 38, pp. 147–155.
2. Kwade A., Schwedes J. Autogenzerkleinerung in Ruhrwerksmühlen. *Chem. Ing. Techn.*, 1996, no. 7, pp. 12–14.
3. Wilder M., Mykola Z. Advantages and economic efficiency of new dispersion technology. *Lakokrasochnyye materialy i ikh ispol'zovaniye* [Paint-and-lacquer materials and their use], 2003, no. 7, pp. 46–48 (In Russian).
4. Fromkherz H., Spornberger S. Breakthrough technologies provide efficiency of dispersion. *Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye* [Paint-and-lacquer materials and their use], 2002, no. 3, pp. 16–19 (In Russian).
5. Kozlovskiy V. I. *Optimizatsiya protsesssa sverkhtonkogo pomola v sharovoy melnitse s meshalkoy. Avtoref. dis. kand. nauk* [Optimization of the process of ultrafine grinding in a ball mill with a stirrer]. Abstract diss. cand. of techn. sci. Minsk, 2017. 25 p. (In Russian).
6. Kozlovskiy V. I., Vaytsekhovich P. Ye. Influence of characteristics of ball mill with mixer on its efficiency. *Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye* [Paint-and-lacquer materials and their use], 2015, no. 7, pp. 43–45 (In Russian).
7. Kozlovskiy V. I., Vaytsekhovich P. Ye., Kamlyuk T. V. Influence of size of grinding bodies on efficiency of material dispersion in ball mill with mixer. *Trudy BGTU* [Proceeding of BSTU], 2016, no 3: Chemistry and Technology of Inorganic Substances, pp. 136–141 (In Russian).
8. Kozlovskiy V. I., Vaytsekhovich P. Ye. Determination of energy consumption for rotation of the working body of a ball mill with a mixer. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and petroleum engineering], 2016, no. 5–6, pp. 14–17 (In Russian).

9. Kozlovskiy V. I., Vaytsekhovich P. Ye. Determination of the separation boundary of the material in a dynamic separator of a horizontal bead mill. *Vestnik GRGU imeni Yanki Kupaly* [Vestnik of Yanka Kupala State University of Grodno], 2016, series 6, *Technics*, no. 2, pp. 61–67 (In Russian).

10. Vasil'tsov E. A., Ushakov V. G. *Apparaty dlya peremeshivaniya zhidkikh sred* [Apparatus for mixing liquid media: a reference guide]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1979. 272 p.

#### **Информация об авторах**

**Козловский Виталий Игоревич** – старший преподаватель кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: mr.vit.koz@mail.ru

**Вайтехович Петр Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: vpe51@mail.ru

**Саевич Николай Петрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: saevichm@belstu.by

#### **Information about the authors**

**Kozlovskiy Vitaliy Igor'yevich** – senior lecturer, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Productions, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mr.vit.koz@mail.ru

**Vaytsekhovich Petr Yevgen'yevich** – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Productions. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vpe51@mail.ru

**Saevich Nikolay Petrovich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Processes and Apparatus of Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: saevichm@belstu.by

*Поступила 09.04.2020*