

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ СУХИХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЗАДАННОЙ СТЕПЕНИ ПОМОЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВАКУУМА

---

Юрий Викторович Родионов<sup>1</sup>  
Дмитрий Вячеславович Никитин<sup>1</sup>  
Сергей Иванович Данилин<sup>2</sup>  
Юрий Анатольевич Чумиков<sup>1</sup>  
Анастасия Игоревна Скоморохова<sup>1</sup>  
Юрий Юрьевич Родионов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет

<sup>2</sup>Мичуринский государственный аграрный университет

Растительные порошки широко используются в промышленности, в частности в сельском хозяйстве, пищевой и фармацевтической отраслях. С их помощью можно создавать широкий ассортимент продукции функционального назначения, что важно для поддержания здоровья различных категорий населения страны. Растительные порошки сохраняют в своем составе биологически активные вещества и при этом имеют высокий срок хранения, их очень легко транспортировать на дальние расстояния. Важной характеристикой при производстве качественного растительного порошка является получение частиц заданной степени помола. Частицы порошка различной степени помола позволяют значительно интенсифицировать диффузионные и биохимические процессы в создаваемом пищевом продукте. Предложена методика теоретического расчета двухступенчатой дисково-шаровой вакуумной мельницы для получения растительных порошков различной степени помола. Выполнен анализ факторов, оказывающих влияние на производительность шаровой мельницы, и определены основные параметры для практического расчета. Представлена экспериментальная энергосберегающая установка, позволяющая получать растительные порошки с заданной степенью помола. Определен ряд основных геометрических, кинематических и динамических параметров разработанной мельницы. Приведена формула для расчета вакуумного транспортного трубопровода, учитывающая плотность и концентрацию сыпучего материала. С целью наиболее эффективного использования установки предложен алгоритм расчета мощности с учетом определения потерь давления в линии. Дано обоснование выбора одноступенчатого жидкостнокольцевого вакуумного насоса с регулируемым нагнетательным окном, позволяющего изменять параметры достигаемого вакуума. Разработанная методика расчета позволит спроектировать энергоэффективную установку двухступенчатого измельчения сухого растительного сырья, характеризующуюся универсальностью использования с точки зрения получения растительного порошка заданной степени помола.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: растительные порошки, двухступенчатое измельчение, степень помола, вакуум, теоретический расчет.

## THEORETICAL CALCULATION OF VACUUM APPLICATION IN A TWO-STAGE CRUSHER OF DRY PLANT MATERIALS WITH A GIVEN DEGREE OF GRINDING

Yuriy V. Rodionov<sup>1</sup>  
Dmitriy V. Nikitin<sup>1</sup>  
Sergey I. Danilin<sup>2</sup>  
Yuriy A. Chumikov<sup>1</sup>  
Anastasiya I. Skomorokhova<sup>1</sup>  
Yuriy Yu. Rodionov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tambov State Technical University

<sup>2</sup>Michurinsk State Agrarian University

Vegetable powdery products are widely used in different branches of industry, in particular in agriculture, food and pharmaceutical sectors of industry. With vegetable powders, specialists can create a wide range of functional

products, which is important for maintaining health care activities of various categories of citizens. Plant-based powders retain biologically active substances, have a high shelf life, they can be easily transported over long distances. In the production of high-quality vegetable powder, it is important to obtain particles of a given degree of grinding. Powder particles of various degree of grinding can significantly intensify the diffusion and biochemical processes in the created food product. A method of theoretical calculation of a two-stage disc-ball vacuum crusher for obtaining vegetable powders of various degree of grinding is proposed. The analysis of the factors influencing the performance of the ball mill was carried out, and the main parameters for calculation were defined. An experimental energy-saving device is presented, which allows obtaining vegetable powders with a given degree of grinding. The authors determined a number of basic geometric, kinematic and dynamic parameters of the disc-ball crusher, deduced formula for calculating the vacuum transmission pipeline, taking into account the density and concentration of bulk material. In order to best exploit the advantages of the disc-ball mill, an algorithm for calculating its power was proposed, taking into account the determination of pressure losses in the line. The rationale for choosing a single-stage liquid ring vacuum pump with an adjustable pump discharge, which allows changing the parameters of the obtained vacuum, is presented. The developed calculation method will make it possible to design an energy-efficient device of two-stage grinding of dry vegetable raw materials, characterized by versatility of use in terms of obtaining a given degree of grinding of vegetable powder.

KEYWORDS: vegetable powdery products, two-stage grinding, degree of grinding, vacuum, theoretical calculation.

### **В**ведение

Процесс приготовления различных композиций с использованием измельченного растительного сырья широко используется в промышленности, в частности в сельском хозяйстве, пищевой и фармацевтической отраслях.

При получении смесей в производстве кормов для животных возрастают требования к однородности, так как усложняется их рецептура, включающая большее количество ингредиентов с высокой биологической активностью. При этом сельхозпроизводители должны гарантировать одинаковое количество питательных веществ, удовлетворяющих физиологическую потребность животного. Известно, что однородный состав корма для цыплят и поросят раннего возраста является важным фактором, влияющим на рост и потребление корма.

В пищевой промышленности использование растительных порошков в рецептуре позволяет расширить и разнообразить ассортимент продукции, способствует ее обогащению питательными веществами, способствующими улучшению и поддержанию иммунной системы организма [12]. Важным параметром при создании качественного пищевого продукта является степень помола растительного порошка. Например, для получения лекарственных порошков степень помола должна находиться в пределах до 50 мкм, для соков и добавок в хлебобулочных изделиях – от 200 до 10 мкм [1, 7]. Частицы порошка различной степени помола позволяют значительно интенсифицировать диффузионные и биохимические процессы в создаваемом пищевом продукте [9].

Существующие измельчители характеризуются разнообразием схем действия, конструктивных различий, широтой производительности по конечному продукту. Потребность в оборудовании для измельчения растет пропорционально увеличению масштаба переработки сельскохозяйственного сырья. С целью получения порошков заданной степени помола предлагается использовать двухступенчатое измельчение сухих растительных материалов с вакуумным отводом частиц.

Цель работы заключается в усовершенствовании методики теоретического расчета двухступенчатой дисково-шаровой вакуумной мельницы с учетом факторов, оказывающих влияние на ее производительность.

### **Материалы и методы**

Для разработки методики расчета двухступенчатой дисково-шаровой мельницы с вакуумным отводом частиц воспользуемся закономерностями теории измельчения [6, 8], вакуумирования [11, 13], законами прикладной механики и теории течения газов [2, 3, 10].

Процесс грубого измельчения растительного сырья изучался на дисковом измельчителе. Для тонкого измельчения использовалась шаровая мельница.

Предлагается методика расчета двухступенчатого измельчения, включающая две ступени: первая ступень – дисковый измельчитель, вторая ступень – двухсекционная шаровая цилиндриконическая мельница.

### Результаты и их обсуждение

Основной характеристикой помола является степень измельчения, определяемая по формуле

$$i_{\text{п}} = \frac{D}{d}, \quad (1)$$

где  $D$  – размер куска до измельчения, м;  
 $d$  – размер куска после измельчения, м.

При двухступенчатом помоле общая степень измельчения определяется произведением степени измельчения каждой ступени

$$i_0 = i_1 \cdot i_2, \quad (2)$$

где  $i_1$  – степень измельчения первой ступени;  
 $i_2$  – степень измельчения второй ступени.

При этом степень помола второй ступени определяется произведением степеней помола по секциям

$$i_2 = i_{2-1} \cdot i_{2-2}, \quad (3)$$

где  $i_{2-1}$  – степень измельчения первой секции шаровой мельницы;  
 $i_{2-2}$  – степень измельчения второй секции шаровой мельницы.

Диаметр шаров каждой секции шаровой мельницы определяем по следующим формулам:

- первая секция:

$$d_{\text{шmax}2-1} = 6,00\sqrt[3]{d_{\text{max}2-1}}, \quad (4)$$

где  $d_{\text{max}2-1}$  – максимальный размер куска измельченного материала в первой секции, м.

- вторая секция:

$$d_{\text{шmax}2-2} = 6,00\sqrt[3]{d_{\text{max}2-2}}, \quad (5)$$

где  $d_{\text{max}2-2}$  – максимальный размер куска измельченного материала во второй секции, м.

Используем рациональное соотношение между длиной  $L$  и диаметром барабана  $D_{\text{вн}}$  1,6, а секции делятся в соотношении 1 : 0,6. Степень заполнения шарами и материалом – по 30%.

Мельница представляет собой цилиндриконическую обечайку, находящуюся на валах, которые являются впускающим 1 и выпускающим 2 патрубками, причем выпускающий патрубок представляет собой заборное устройство с перфорированным коническим окончанием (рис. 1). На впускающем и выпускающем патрубках-валах находятся подшипники качения 3. На впускном патрубке-вале периодически устанавливается жиклер 4, который меняется в зависимости от создаваемого давления разрежения и, соответственно, степени помола частиц. Цилиндрическая и коническая секции разделены перфорированной сеткой 5. В цилиндрической секции находятся шары большего диаметра 6, в конической секции расположены шары меньшего диаметра 7. Расчет диаметра шаров осуществляется по формулам 4 и 5.

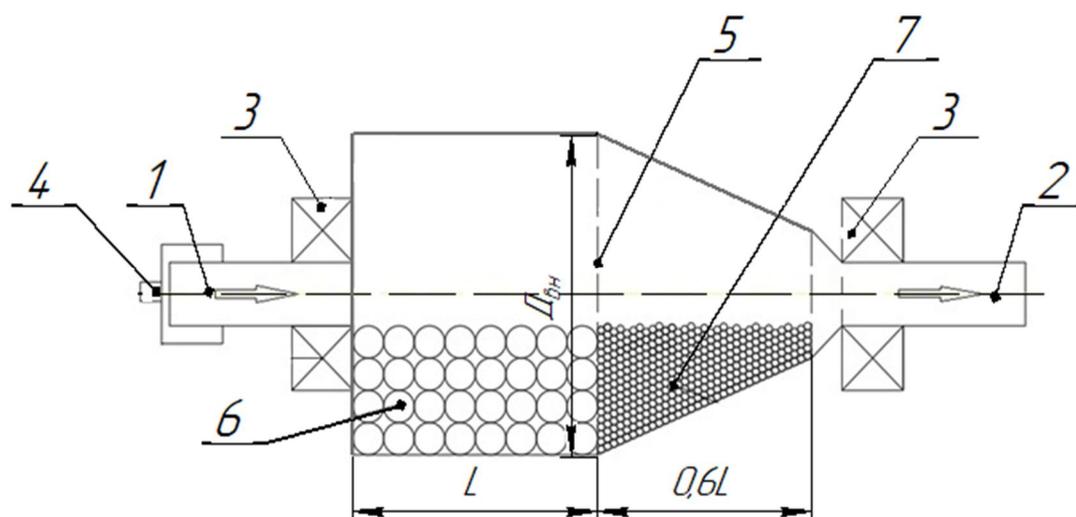


Рис. 1. Схема шаровой мельницы: 1 – впускающий патрубок; 2 – выпускающий патрубок; 3 – подшипники качения; 4 – жиклер; 5 – решетка перфорированная; 6 – крупные шары; 7 – мелкие шары

Используя зависимость силы тяжести и центробежной силы шаров с учетом двух их типов и принимая во внимание работу всей массы, получаем формулу частоты вращения барабана ( $\text{мин}^{-1}$ )

$$n = \frac{35}{\sqrt{D_{\text{вн}}}}, \quad (6)$$

где  $D_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр барабана, м.

На производительность шаровой мельницы влияют следующие факторы: физические свойства и размеры частиц измельчаемого материала, параметров конструкции, способ футеровки, эксплуатационные условия работы, частота вращения и степень заполнения шаровой мельницы мелющими телами, а также конструкция первой ступени установки.

Производительность шаровой мельницы определяем по теории подобия, используя данные, полученные на экспериментальной установке по критерию Фруда.

Влияние на производительность также будет оказывать движение аэросмеси измельченных частиц заданной степени помола. Элементы вакуумного транспорта показаны на схеме установки (рис. 2). Измельчение осуществляется с помощью дискового измельчителя 1 и шаровой мельницы 3. Предварительно измельченный материал подается в мельницу через бункер-накопитель 2. Из шаровой мельницы порошок с заданной степенью помола поступает в циклон-накопитель 4 за счет разрежения, создаваемого жидкостнокольцевым вакуумным насосом (ЖВН) с регулируемым нагнетательным окном 5.

Измельчение материала шарами позволяет постоянно разрыхлять сыпучий растительный материал.

Вакуумно-транспортную систему двухступенчатого измельчения сухого растительного материала, как показано в работе [5], делим на четыре участка:

- участок всасывания *A*;
- участок установившегося течения материала *B*;
- участок торможения *B*;
- участок удаления воздушной смеси *Г*.

При организации удаления частиц заданной степени помола необходимо определить их скорость витания (м/с), из условия (7) [4]

$$Q_B = \frac{G_M \cdot v_{\text{ср}}^2}{2p} \leq S_{\Phi}(p), \quad (7)$$

где  $G_M$  – производительность установки по растительному сыпучему материалу, кг/с;

$v_{\text{ср}}$  – усредненная скорость материала, м/с;

$p$  – начальное давление воздуха на входе в транспортный трубопровод, кПа;

$S_{\Phi}(p)$  – фактическая быстрота действия (производительность) при полученном давлении всасывания, м<sup>3</sup>/с.

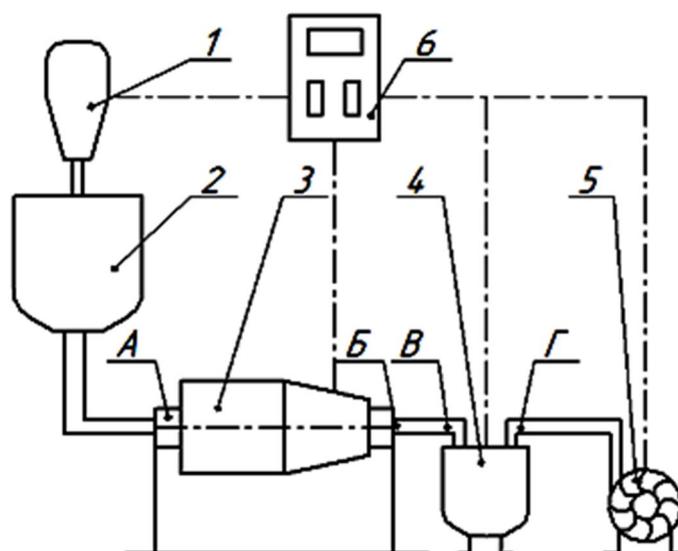


Рис. 2. Схема установки: 1 – измельчитель дисковый; 2 – бункер-накопитель; 3 – мельница шаровая; 4 – циклон-накопитель; 5 – вакуумный насос; 6 – панель управления; А – участок всасывания; Б – участок установившегося течения материала; В – участок торможения; Г – участок удаления воздушной смеси

Для определения значения давления всасывания воспользуемся формулой (8)

$$p_{\text{вс}} = p_{\text{кр}} + \Delta p, \quad (8)$$

где  $p_{\text{кр}}$  – критическое давление поднятия частиц, кПа;

$\Delta p$  – общие потери давления потерь в установке, кПа.

Обязательным условием транспортирования измельченного сырья является превышение критической скорости (9) [14]:

$$v_{\text{кр}} = B \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot D_{\text{вн}}}{v_{\text{вит}}^2}} \cdot \sqrt[9]{\frac{\rho_{\text{см}} - \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{тв}}}{\rho_{\text{в}}}\right)^2} \cdot K, \quad (9)$$

где  $B$  – коэффициент, м/с [9];

$\rho_{\text{см}}$  – значение плотности транспортируемой аэросмеси, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{в}}$  – значение плотности воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{тв}}$  – значение плотности твердых частиц, кг/м<sup>3</sup>;

$v_{\text{вит}}$  – скорость витания частиц, м/с;

$K$  – дополнительный безразмерный коэффициент, учитывающий физико-химические свойства измельчаемых сухих растительных материалов [4].

Для того чтобы определить значение скорости витания частиц в установке, воспользуемся формулой (10) [4]:

$$v_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{C_X \cdot A_M \cdot \rho_B}}, \quad (10)$$

где  $m$  – масса частицы, кг;

$g$  – ускорение свободного падения, м<sup>2</sup>/с;

$C_X$  – безразмерный коэффициент сопротивления при обтекании частицы воздушным потоком [2];

$A_M$  – площадь миделева сечения частицы, м<sup>2</sup>.

Общие потери давления определяем по формуле (11) [4]:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ТЕХ}} + \Delta p_{\text{ТТ}} + \Delta p_{\text{ВТ}}, \quad (11)$$

где  $\Delta p_{\text{ТЕХ}}$  – потери давления в оборудовании для измельчения, кПа;

$\Delta p_{\text{ТТ}}$  – потери давления в трубопроводе, кПа;

$\Delta p_{\text{ВТ}}$  – потери давления в трубопроводе перемещения воздушного потока, кПа.

Потери давления в оборудовании для измельчения определяются по формуле (12)

$$\Delta p_{\text{ТЕХ}} = \sum_{i=1}^{z_k} \xi_i \cdot \rho_i \cdot \frac{v_i^2}{2}, \quad (12)$$

где  $\xi_i$  – коэффициент сопротивления  $i$ -го типа оборудования измельчения [6];

$\rho_i$  – плотность воздушного потока, входящего в  $i$ -е оборудование измельчения, кг/м<sup>3</sup>;

$v_i$  – скорость воздушного потока, входящего в  $i$ -е измельчительное оборудование, м/с.

Потери давления в трубопроводе определяются по формуле (13)

$$\Delta p_{\text{ТТ}} = \sum_{j=1}^{z_k} \left( \lambda_{\text{ТТ}j} \cdot \frac{u_{\text{кр}}^2 \cdot p_{\text{В}j} \cdot L_{\text{ТТ}i}}{2 \cdot d_{\text{ТТ}}} + \frac{\lambda \cdot u_{\text{кр}}^2 \cdot p_{\text{В}j} \cdot m_k \cdot L_{\text{ТТ}i}}{2 \cdot d_{\text{ТТ}}} \cdot \left( \frac{v_{\text{кр}}}{u_{\text{кр}}} \right) + \beta_i \cdot p_{\text{В}j} \cdot g \cdot m_k \cdot \left( \frac{u_{\text{кр}}}{v_{\text{кр}}} \right) \cdot L_{\text{ТТ}i} \right), \quad (13)$$

для условий:

$$\begin{cases} \beta = 0 \text{ при } i = 1 \\ \beta = 1 \text{ при } i = 2 \\ \beta = \sin \alpha + f \cdot \cos \alpha \text{ при } i = 3; \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \rho_{\text{В}j}^{\text{H}} = \rho_{\text{В}0} - \Delta \rho_{\text{В}j-1}^{\text{K}} \\ \rho_{\text{В}1} = \rho_{\text{В}0} = \rho_{\text{атм}} \text{ при } j = 1 \\ \Delta \rho_{\text{В}j} = f(\Delta \rho_{\text{ТТ}j}) \\ \lambda_{\text{ТТ}j} = f(\Delta \rho_{\text{В}j}) \\ \rho_{\text{В}j} = \frac{\rho_{\text{В}j}^{\text{H}} + \rho_{\text{В}j+1}^{\text{H}}}{2}, \end{cases} \quad (15)$$

где  $z_k$  – число участков;

$f$  – коэффициент трения сухого сыпучего материала;

$i$  – тип участка ( $i = 1$  – участок горизонтальный,  $i = 2$  – участок вертикальный,  $i = 3$  – участок наклонный);

$\alpha$  – угол наклона к горизонту транспортного трубопровода, град;

$L_{\text{ТТ}i}$  – длина  $i$ -го транспортного участка, м;

$m_k$  – концентрация сухого сыпучего материала;

$\rho_{\text{В}0}$  – плотность воздуха в начале транспортного трубопровода, кг/м<sup>3</sup>;

- $\rho_{Вj}^H$  – плотность воздуха на  $j$ -м участке начала транспортного трубопровода, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_{Вj+1}^H$  – плотность воздуха на  $j+1$  участке начала транспортного трубопровода, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_{Вj}$  – средняя плотность воздуха на  $j$ -м участке транспортного трубопровода, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\Delta\rho_{Вj-1}^K$  – потери давления на  $j-1$  участке в конце транспортного трубопровода, кПа;  
 $\rho_{атм}$  – плотность воздуха при атмосферном давлении, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\lambda_{Гj}$  – коэффициент трения чистого газа для  $j$ -го участка;  
 $\lambda$  – коэффициент пропорциональности;  
 $\Delta\rho_{Вj}$  – потери давления на  $j$ -м участке транспортного трубопровода, кПа [4].

В воздушном трубопроводе потери давления рассчитываем по формуле (16)

$$\Delta\rho_{ВТ} = \lambda_{Гi} \cdot \frac{u_{кр}^2 \cdot \rho_{В} \cdot L_{ВТ}}{2 \cdot d_{ВТ}}, \quad (16)$$

где  $\lambda_{Гi}$  – коэффициент трения чистого газа для  $i$ -го участка;

$L_{ВТ}$  – длина воздушного трубопровода, м.

Диаметр вакуумного транспортного трубопровода определяем по формуле (17)

$$d_{ТТ} = d_{ВТ} \cdot \sqrt{1 + m_k^2 \cdot \left(\frac{\rho_{В}}{\rho_{М}}\right)^2}, \quad (17)$$

где  $d_{ВТ}$  – диаметр всасывающего трубопровода, м;

$\rho_{М}$  – плотность сухого сыпучего материала, кг/м<sup>3</sup>.

Вакуумный насос выбираем по создаваемому давлению разрежения в зависимости от формы и геометрических размеров частицы. Для создания подъемной силы сухого сыпучего материала заданной степени помола применяем сменные жиклеры. Необходимость изменения параметров вакуума (значения разрежения) обуславливает использование ЖВН с автоматическим регулированием нагнетательного окна, позволяющего менять параметры разрежения (рис. 3).

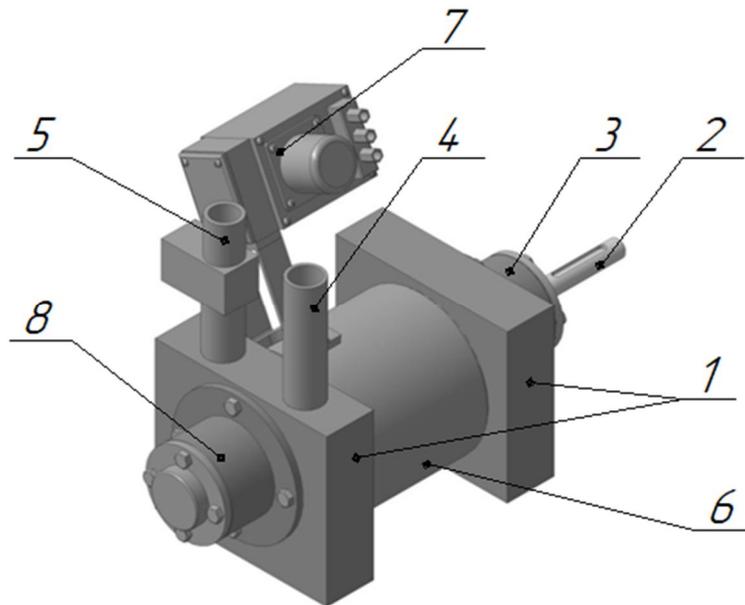


Рис. 3. Одноступенчатый ЖВН с устройством автоматического регулирования нагнетательного окна:  
 1 – крышки; 2 – вал; 3 – подшипниковая опора; 4 – впускной патрубок; 5 – выпускной патрубок;  
 6 – корпус; 7 – нагнетательное устройство; 8 – подшипниковая опора

Насос снабжен правой и левой крышками 1, в правой крышке выполнен выход вала 2, оборудованный подшипниковой опорой 3. В левой крышке крепятся соответственно впускной и выпускной патрубки 4, 5. Между крышками находится корпус 6 с нагнетательным устройством 7. Левая крышка также имеет подшипниковую опору 8.

В зависимости от производительности всей установки и степени помола ЖВН подбирается по скорости действия. У выбранной конструкции определяется мощность.

Мощность, затрачиваемую на измельчение в двухступенчатой мельнице, определяем по формуле (18)

$$N_0 = N_1 + N_2 + N_3, \quad (18)$$

где  $N_1$  – мощность, потребляемая электродвигателем дискового измельчителя первой ступени, кВт;

$N_2$  – мощность измельчения в двухсекционной шаровой мельнице с вакуумным отводом, кВт;

$N_3$  – мощность, затрачиваемая на процесс вакуумирования ЖВН с автоматически регулируемым окном, кВт.

Мощность, потребляемую электродвигателем дискового измельчителя первой ступени, считаем как

$$N_1 = 0,15G_{M1} \cdot i_1, \quad (19)$$

где  $G_{M1}$  – производительность первой ступени (дискового измельчителя), т/ч.

Мощность измельчения в двухсекционной шаровой мельнице с вакуумным отводом определяем как

$$N_2 = 5,0(Z_1 m_{ш2-1} + Z_2 m_{ш2-2}) \cdot \sqrt{D_{вн}}, \quad (20)$$

где  $Z_1$  – количество шаров первой секции;

$Z_2$  – количество шаров второй секции;

$m_{ш2-1}$  – масса шаров первой секции, кг;

$m_{ш2-2}$  – масса шаров второй секции, кг;

$D_{вн}$  – внутренний диаметр барабана, м.

Введенный в формулу коэффициент 5,0 определен экспериментально [2].

Мощность, затрачиваемую на процесс вакуумирования ЖВН с автоматически регулируемым окном, определяем как

$$N_3 = N_{сж} + N_{БЛ} + N_{Л} + N_{мех}, \quad (21)$$

где  $N_{сж}$  – мощность сжатия в вакуум-насосе, кВт;

$N_{БЛ}$  – мощность сил трения в безлопаточном пространстве, кВт;

$N_{Л}$  – мощность вращения жидкостного кольца в лопаточном пространстве, кВт;

$N_{мех}$  – мощность преодоления механического трения, кВт.

Считая, что механические потери в ЖВН составляют до 5% от всех затрат, мощность можно определить по формуле (22)

$$N_3 = 1,05(N_{сж} + N_{БЛ} + N_{Л}). \quad (22)$$

Мощность сжатия вакуумного насоса с устройством автоматического регулирования нагнетательного окна определяем при  $p_{сж} = p_n$

$$N_{сж} = p \cdot S \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[ (p_n / p)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \quad (23)$$

где  $p$  – давление всасывания, кПа;

$p_{сж}$  – давление сжатия, кПа;

$k$  – показатель политропы процесса;

$S$  – быстрота действия (производительность) вакуумного насоса, м<sup>3</sup>/с;

$p_n$  – давление нагнетания, кПа.

Мощность трения жидкости в безлопаточном пространстве

$$N_{\text{БЛ}} = M \cdot \omega / 1000, \quad (24)$$

где  $M$  – момент сил трения, действующий в слоях жидкости рабочей полости насоса, Н·м;

$\omega$  – угловая скорость рабочего колеса насоса, с<sup>-1</sup>.

Мощность, затрачиваемая на перемещение жидкостного кольца в лопаточном пространстве

$$N_{\text{Л}} = Q_{\text{ж}} \cdot H_{\text{T}} \cdot (1 - \eta_{\text{к}} \cdot k_{\eta}) \cdot \rho_{\text{ж}} / 1000, \quad (25)$$

где  $Q_{\text{ж}}$  – расход жидкости через рабочее колесо насоса, кг/с;

$H_{\text{T}}$  – теоретический напор, создаваемый рабочим колесом вакуум-насоса, м;

$\eta_{\text{к}}$  – КПД рабочего колеса;

$k_{\eta}$  – коэффициент пересчета, зависящий от числа Рейнольдса;

$\rho_{\text{ж}}$  – плотность рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

### Заключение

Разработанная методика расчета позволит спроектировать энергоэффективную установку двухступенчатого измельчения сухого растительного сырья, характеризующуюся универсальностью использования с точки зрения получения растительного порошка заданной степени помола.

---

### Библиографический список

1. Иванова Е.П. Разработка технологии приготовления сухой закваски на основе растительного сырья для производства хлебобулочных изделий функционального назначения : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук : 05.18.01 / Е.П. Иванова. – Мичуринск, 2016. – 20 с.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник / А.Г. Касаткин. – 11-е изд., стер., дораб., перепеч. с изд. 1973 г. – Москва : Альянс, 2005. – 750 с.
3. Механические вакуумные насосы : учебник / Е.С. Фролов, И.В. Автономова, В.И. Васильев и др. ; под общ. ред. Е.С. Фролова. – Москва : Машиностроение, 1989. – 283 с.
4. Особенности расчета технологии вакуумного транспортирования сухих сыпучих растительных материалов в режиме сплошного слоя / П.С. Платинин, Ю.В. Родионов, В.П. Капустин, Д.В. Никитин // Наука в центральной России. – 2016. – № 6 (24). – С. 54–65.
5. Повышение эффективности механизации транспортирования сухих сыпучих растительных материалов / Ю.В. Родионов, В.П. Капустин, А.В. Кобелев и др. // Инновационная техника и технология. – 2017. – № 1 (10). – С. 9–15.

6. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. – 2-е изд., перераб. – Москва : Химия, 1977. – 368 с.
7. Химический состав российских пищевых продуктов : справочник / Ин-т питания РАМН ; под ред. И.М. Скурихина, В.А. Тутельяна. – Москва : ДеЛи принт, 2002. – 235 с.
8. Ходаков Г.С. Физика измельчения : монография / Г.С. Ходаков. – Москва : Наука, 1972. – 305 с.
9. Шиманова А.А. Теоретическое обоснование работы всасывающего заборного устройства пневмотранспортной установки / А.А. Шиманова // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 11–2. – С. 466–471.
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя ; пер. Г.А. Вольперта с 5-го нем. изд., испр. по 6-му (амер.) изд. ; под ред. Л. Г. Лойцянского. – Москва : Наука, 1974. – 711 с.
11. Effect of vacuum grinding and storage under oxygen free condition on antioxidant activity and bacterial communities of strawberry puree / A.N. Kim, W.S. Hu, K.Y. Lee, O.K. Koo, W.L. Kerr, S.G. Choi // *LWT*. – 2020. – 110495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110495>.
12. Karam M.C. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review / M.C. Karam, J. Petit, D. Zimmer, E.B. Djantou, J. Scher // *Journal of Food Engineering*. – 2016. – Vol. 188. – Pp. 32–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.001>.
13. Effect of vacuum-grinding on the stability of anthocyanins, ascorbic acid, and oxidative enzyme activity of strawberry / A.N. Kim, K.Y. Lee, E.J. Jeong, S.W. Cha, B.G. Kim, W.L. Kerr, S.G. Choi // *LWT*. – 2021. – Vol. 136 (1). 110304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110304>.
14. Superfine grinding affects physicochemical, thermal and structural properties of Moringa Oleifera leaf powders / X. Huang, K. Liang, Q. Liu, J. Qiu, J. Wang, H. Zhu // *Industrial Crops and Products*. – 2020. – Vol. 151. – No. 112472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112472>.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Юрий Викторович Родионов – доктор технических наук, профессор кафедры механики и инженерной графики ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: [rodionow.u.w@rambler.ru](mailto:rodionow.u.w@rambler.ru).

Дмитрий Вячеславович Никитин – кандидат технических наук, доцент кафедры механики и инженерной графики ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: [vacuum2008@yandex.ru](mailto:vacuum2008@yandex.ru).

Сергей Иванович Данилин – кандидат сельскохозяйственных наук, зав. кафедрой технологии производства, хранения и переработки продукции растениеводства ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, e-mail: [danilin@mgau.ru](mailto:danilin@mgau.ru).

Юрий Анатольевич Чумиков – студент ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: [chumikovi@mail.ru](mailto:chumikovi@mail.ru).

Анастасия Игоревна Скоморохова – студент ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: [nasta373@mail.ru](mailto:nasta373@mail.ru).

Юрий Юрьевич Родионов – аспирант ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, e-mail: [rodionow.u.w@rambler.ru](mailto:rodionow.u.w@rambler.ru).

Дата поступления в редакцию 18.08.2021

Дата принятия к печати 28.09.2021

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Yuriy V. Rodionov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Russia, Tambov, e-mail: [rodionow.u.w@rambler.ru](mailto:rodionow.u.w@rambler.ru).

Dmitriy V. Nikitin, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Russia, Tambov, e-mail: [vacuum2008@yandex.ru](mailto:vacuum2008@yandex.ru)

Sergey I. Danilin, Candidate of Agricultural Sciences, Head of the Dept. of Technologies of Production, Storage and Processing of Plant Products, Russia, Michurinsk, e-mail: [danilin@mgau.ru](mailto:danilin@mgau.ru).

Yuriy A. Chumikov, Student, Tambov State Technical University, Russia, Tambov, e-mail: [chumikovi@mail.ru](mailto:chumikovi@mail.ru).

Anastasiya I. Skomorokhova, Student, Tambov State Technical University, Russia, Tambov, e-mail: [chumikovi@mail.ru](mailto:chumikovi@mail.ru)

Yuriy Yu. Rodionov, Postgraduate Student, Michurinsk State Agrarian University, Russia, Michurinsk, e-mail: [rodionow.u.w@rambler.ru](mailto:rodionow.u.w@rambler.ru).

Received August 18, 2021

Accepted after revision September 28, 2021