

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.927

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-4-14>



Измельчитель вторичного плодово-ягодного сырья

*Н.В. Алдошин*¹✉, *А.С. Васильев*², *А.В. Кудрявцев*³, *В.В. Голубев*⁴, *Е.Н. Чумакова*⁵

¹ Федеральний научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

^{2,3,4,5} Тверская государственная сельскохозяйственная академия; г. Тверь, Россия

¹ naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>

² vasilevtgsha@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0936-2011>

³ akud@tvgscha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8341-0467>

⁴ slavasddg@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6421-6658>

⁵ elena.chumakova.ne@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4664-8887>

Аннотация. Вторичное плодово-ягодное и овощное сырье (выжимки) целесообразно перерабатывать с целью максимального извлечения из него биологически ценных витаминов, микроэлементов, пищевых волокон и незаменимых аминокислот. Сухие выжимки измельчают на том же оборудовании, что и зерно. Основными недостатками существующих измельчителей являются громоздкость, энергозатратность и высокая трудоемкость обслуживания. Необходимость создания новых измельчающих машин определяется различными характеристиками перерабатываемых объектов и разнообразными технологическими требованиями к исходному и готовому продуктам. С целью разработки перспективной конструкции устройства, измельчающего вторичное плодово-ягодное сырье, представленного сухими выжимками, авторы провели патентный поиск и анализ методов измельчения. В результате теоретических исследований разработали измельчитель, содержащий камеру измельчения цилиндрической формы, сообщающуюся в верхней ее части с загрузочным бункером и разгрузочной полостью готового продукта в нижней части. При испытании разработанного устройства измельчали сухие выжимки ягод брусники, клюквы, черники, смородины черной, жимолости и облепихи влажностью 10% и получили порошки дисперсностью не более 1 мм. Оценку крупности помола проводили на расसेве РЛ-4. Экспериментально установили высокую эффективность разработанного устройства. Степень измельчения вторичного плодово-ягодного сырья составила 98,3...98,8%. Расчетное значение фактически затрачиваемой энергии на измельчение ягодных выжимок влажностью 10% до фракции менее 1 мм составило 4,40 кВт·ч/т. Следующим этапом исследований является модернизация измельчителя с целью оптимизации энергетических показателей, затрачиваемых при измельчении вторичных растительных материалов разной влажности и химического состава, обладающих различными физико-механическими характеристиками (мякоть, семена, косточки и пр.).

Ключевые слова: сухие выжимки; измельчение; измельчитель; степень измельчения; дисперсность; вторичное плодово-ягодное сырье; порошки

Для цитирования: Алдошин Н.В., Васильев А.С., Кудрявцев А.В., Голубев В.В., Чумакова Е.Н. Измельчитель вторичного плодово-ягодного сырья // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 4-14. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-4-14>

ORIGINAL ARTICLE

Shredder for secondary fruit and berry raw materials*N.V. Aldoshin*¹, *A.S. Vasiliev*², *A.V. Kudryavtsev*³, *V.V. Golubev*⁴, *E.N. Chumakova*⁵¹ Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia^{2,3,4,5} Tver State Agricultural Academy; Tver, Russia¹ naldoshin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0446-1096>² vasilievtgsha@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0936-2011>³ akud@tvgscha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8341-0467>⁴ slavasddg@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6421-6658>⁵ elena.chumakova.ne@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4664-8887>

Abstract. It is feasible to process secondary fruit, berry, and vegetable raw materials (squeezes) to maximize the extraction of biologically valuable vitamins, trace elements, dietary fiber and essential amino acids. To shred dry squeezes, use can be made of the same equipment that is suitable for grain milling. The main disadvantages of the existing shredders include their bulkiness, energy consumption and high labor intensity of maintenance. The need to design advanced shredders is due to different characteristics of processed objects and various technological requirements to the initial and finished products. To develop a promising design of a unit for shredding secondary fruit and berry raw materials in the form of dry squeezes, the authors conducted a patent search and analyzed the methods of shredding. Having completed theoretical research, they developed a shredder containing a cylindrical shredding chamber communicating in its upper part with a loading hopper and a discharge cavity of the finished product in its lower part. When testing the developed unit, dry squeezes of cranberries, blueberries, black currants, honeysuckle, and sea buckthorn berries with a moisture content of 10% were shredded to obtain powders with a fineness of less than 1 mm. The fineness degree was evaluated on the RL-4 sieve. The experimental study has established high efficiency of the developed unit. The fineness degree of secondary fruit and berry raw materials amounted to 98.3 to 98.8%. The estimated amount of actually consumed energy for shredding berry squeezes with a moisture content of 10% to a fraction of less than 1 mm was 4.40 kWh/t. The next stage of research is the modernization of the shredder to optimize the energy consumption of shredding secondary plant materials of different moisture content and chemical composition with different physical and mechanical characteristics (pulp, seeds, pits, etc.).

Keywords: dry squeezes; shredding; shredder; fineness degree; fineness; secondary fruit and berry raw materials; powders

For citation: Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Kudryavtsev A.V., Golubev V.V., Chumakova E.N. Shredder for secondary fruit and berry raw materials. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(3):4-14 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-4-14>

Введение

Проблема качественного измельчения различных материалов стоит перед многими отраслями современного высокотехнологичного производства [1]. Различные материалы отличаются реологическими, физико-химическими и физико-механическими характеристиками, не позволяющими создать унифицированную конструкцию измельчающего механизма [2]. В агропромышленном комплексе измельчению подвергаются семена, растения, плоды и пр. Теоретические основы измельчения сельскохозяйственных материалов под воздействием рабочих органов машин были заложены академиком В.П. Горячкиным¹ и нашли свое дальнейшее отра-

жение в работах многих отечественных и зарубежных ученых² [3-5]. В пищевой и химической промышленности под измельчением принято понимать процесс механического разделения объекта воздействия на части и увеличения степени его дисперсности и поверхности с целью активизации ценных биолого-функциональных характеристик материала [6]. В настоящее время процесс измельчения реализуется на устройствах различного типа (молотковых, валковых, конусных, шаровых и др.), в которых в зависимости от их назначения и принципа действия применяются такие виды нагрузок, как резание, раздавливание, удар, раскалывание, излом, истирание. Нагрузки воздействуют на измельчаемый матери-

¹ Горячкин В.П. Собрание сочинений: В 3 т. М.: Колос, 1965. Т. 3. 384 с.

² Ящерицын П.И., Ефремов В.Д. Основы резания материалов: Учебное пособие. Минск: БГАТУ, 2008. 644 с.

ал комплексно в рамках единого технологического цикла [7, 8]. Необходимость в различных видах оказываемых нагрузок, а также в разных по принципу действия конструкциях и размерах машин вызывается существующими вариациями свойств и размеров измельчаемых материалов, разнообразными технологическими требованиями к исходному и готовому продуктам [9-12]. Среди ассортимента измельчаемых материалов по набору остаточных биологически ценных характеристик (содержание витаминов, микроэлементов, пищевых волокон, незаменимых аминокислот и других веществ) выделяются вторичные растительные ресурсы переработки плодово-ягодного и овощного сырья, объемы которых, например, в консервной промышленности варьируются в среднем на уровне 21...22% от первоначальной массы объекта воздействия³ [13]. На практике для измельчения вторичных растительных материалов

часто используют то же оборудование (мельницы, мукомолки, дезинтеграторы и пр.), что и при переработке зерна в муку. Однако многие из данных машин являются громоздкими, энергозатратными, имеющими высокую трудоемкость обслуживания, что требует разработки новых конструкций эффективных измельчителей⁴ [14].

Цель исследований: теоретическое обоснование и разработка перспективной конструкции измельчающего устройства для вторичного плодово-ягодного сырья, представленного сухими выжимками.

Материалы и методы

Теоретические исследования выполняли на основании результатов патентного поиска, а также методов механико-математического моделирования процессов взаимодействия объекта переработки (плодово-ягодные выжимки) и функционально-конструктивных элементов измельчающего устройства [14]. Для теоретического обоснования измельчителя рассмотрим модель взаимодействия его ножей и сухих выжимок ягод (рис. 1). Рассматривая движение измельчаемого вещества, представим технологический процесс в виде системы, состоящей из воздушно-вихревой зоны 1 и воздушно-продуктового слоя 2, образованного двумя зонами. По данным предварительных теоретических исследований⁵ [14], между рассматриваемыми зонами имеется некоторая поверхность радиусом r_a .

На основании анализа имеющихся научных работ для определения переменной приведенной окружной скорости в зоне 2 (воздушно-продуктовой) следует использовать выражение:

$$\bar{v}(\bar{r}) = \bar{r}(\psi_1 \bar{r}^3 + \psi_2 \bar{r}^2 + \psi_3 \bar{r} + \psi_4); \quad 0 \leq \bar{r} \leq \bar{r}_{\text{из}}. \quad (1)$$

Для частного случая изменения значений приведенной окружной скорости $\bar{v}_1(\bar{r})$ от радиуса \bar{r} запишем:

$$\bar{v}_1(\bar{r}) = \bar{r}(\psi_1 \bar{r}^3 + \psi_2 \bar{r}^2 + 1). \quad (2)$$

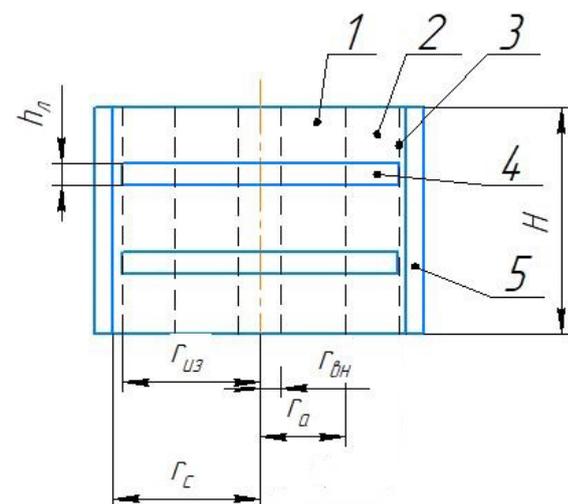


Рис. 1. Рабочие зоны взаимодействия ножей измельчителя и объекта измельчения:

- 1 – воздушно-вихревая зона;
- 2 – воздушно-продуктовая зона;
- 3 – воздушно-продуктовая зона в области между ножом и наружной обечайкой;
- 4 – лезвие рабочего органа; 5 – наружная обечайка

Fig. 1. Interaction zones of shredder blades with shredded objects:

- 1 – air-vortex zone; 2 – air-product zone;
- 3 – air-product zone in the area between the knife and the outer shell;
- 4 – blade of the working tool; 5 – outer shell

³ Камиллов Р.К. Обоснование методов и режимов сушки отходов и технология переработки плодов и овощей: Дис. ... канд. техн. наук. Махачкала, 2003. 182 с. EDN: NMJNKR; Джабоева А.С. Использование продуктов переработки дикорастущего сырья в производстве хлебобулочных изделий: Монография. Нальчик: Изд-во М. и В. Котляровых, 2008. 129 с. EDN: QNHLLB.

⁴ Сергеев Н.С., Николаев В.Н., Запелалов М.В., Сергеев Д.Н. Новое поколение измельчителей зерна и семян масличных культур для сельскохозяйственного производства: Монография. Челябинск: Южно-Уральский ГАУ, 2022. 196 с. EDN: LJZEDQ.

⁵ Камиллов Р.К. Обоснование методов и режимов сушки отходов и технология переработки плодов и овощей: Дис. ... канд. техн. наук. Махачкала, 2003. 182 с. EDN: NMJNKR; Джабоева А.С. Использование продуктов переработки дикорастущего сырья в производстве хлебобулочных изделий: Монография. Нальчик: Изд-во М. и В. Котляровых, 2008. 129 с. EDN: QNHLLB; Сергеев Н.С., Николаев В.Н., Запелалов М.В., Сергеев Д.Н. Новое поколение измельчителей зерна и семян масличных культур для сельскохозяйственного производства: Монография. Челябинск: Южно-Уральский ГАУ, 2022. 196 с. EDN: LJZEDQ.

Параметр приведенного радиуса \bar{r} можно определить, как и соотношение окружных скоростей:

$$\bar{r} = \frac{r}{r_a}; \quad \bar{\omega}(r) = \frac{\omega(r)}{\omega_0}, \quad (3)$$

где r – значение текущего радиуса внутренней поверхности, м; r_a – значение радиуса внутренней границы воздушно-продуктовой зоны, м; $\bar{\omega}(r)$ – показатель приведенной угловой скорости; $\omega(r)$ – значение угловой скорости потока, c^{-1} ; ω_0 – фактическое значение угловой скорости вала измельчающего устройства, c^{-1} .

На данном этапе сформулирована задача определения коэффициентов уравнения Ψ_1, Ψ_2 , значения которых можно определить из предположения равенства значений приведенных радиусов по выражению:

$$\bar{r} = \bar{r}_c; \quad \frac{d\bar{\omega}_c}{d\bar{r}} = \frac{\bar{v}_c(\bar{r})}{\bar{r}_c}; \quad \bar{v}_c = \bar{r}_c(\Psi_1\bar{r}_c^3 + \Psi_2\bar{r}_c^2 + 1). \quad (4)$$

Интегрируя данное выражение по показателю приведенного радиуса, определим, что

$$\bar{\omega}_c = \int_1^{\bar{r}_c} \frac{\bar{v}_c(\bar{r})}{\bar{r}_c} d\bar{r}. \quad (5)$$

После интегрирования и преобразования выражения (5) угловую скорость можно определить как

$$\bar{\omega}_c = \frac{\Psi_1}{4}(\bar{r}_c^4 - 1) + \frac{\Psi_2}{3}(\bar{r}_c^3 - 1) + \bar{r}_c - 1. \quad (6)$$

Принимая во внимание, что показатель приведенной угловой скорости определяем также из соотношения $\bar{\omega}_c = \bar{v}_c/\bar{r}_c$, с учетом выражения (4) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \bar{v}_c = \bar{r}_c(\Psi_1\bar{r}_c^3 + \Psi_2\bar{r}_c^2 + 1) \\ \bar{v}_c = \left(\frac{\Psi_1}{4}(\bar{r}_c^4 - 1) + \frac{\Psi_2}{3}(\bar{r}_c^3 - 1) + \bar{r}_c - 1\right)\bar{r}_c. \end{cases} \quad (7)$$

Решение системы уравнений (7) позволит определить искомые значения коэффициентов уравнений Ψ_1 и Ψ_2 :

$$\Psi_1 = \frac{(\bar{v}_c - \bar{r}_c)(\bar{r}_c^4 - 4\bar{r}_c + 3) - 3\bar{r}_c^2(4\bar{v}_c\bar{r}_c^3 - \bar{v}_c\bar{r}_c^4 + \bar{v}_c - 3\bar{r}_c^5 + 4\bar{r}_c^4 + \bar{r}_c)}{\bar{r}_c^4(\bar{r}_c^4 - 4\bar{r}_c + 3)}; \quad (8)$$

$$\Psi_2 = \frac{3(4\bar{v}_c\bar{r}_c^3 - \bar{v}_c\bar{r}_c^4 + \bar{v}_c - 3\bar{r}_c^5 + 4\bar{r}_c^4 + \bar{r}_c)}{\bar{r}_c^3(\bar{r}_c^4 - 4\bar{r}_c + 3)}. \quad (9)$$

Крутящий момент, создаваемый на лезвиях ножей (рабочих органов), определяется по значению усилий сопротивлению их перемещения в вертикальной плоскости (рис. 2), причем усилие сопротивления возникает вследствие различия значений скорости лопасти ножа относительно измельчаемого материала.

С учетом уравнения для определения значений скорости обтекания u_1 можем использовать известное равенство:

$$u(r) = \omega_0 r - v(r). \quad (10)$$

Значение крутящего момента на ножах измельчителя в зависимости от сил сопротивления P_1 вращению ротора в воздушно-вихревой зоне на отдельно взятом элементарном участке, расположенном на расстоянии dr , и горизонтального ножа толщиной h_n , запишется в виде:

$$dM_1 = P_1 r dr = \xi_{1,л} \frac{\rho_b u_1^2(r)}{2} h_n r dr, \quad (11)$$

где $\xi_{1,л}$ – значение коэффициента, характеризующего гидравлическое сопротивление вращению ножа в воздушно-вихревой зоне; ρ_b – значение плотности воздуха, $кг/м^3$.

Принимая, что $v(r) = \omega(r) \cdot r$, $\omega(r) = v(r) / r$, с учетом уравнения (3) можно записать, что скорость воздушного потока в зависимости от удаленности измельчаемого материала определится уравнением:

$$U(r) = \omega_0 \cdot r_a \cdot (\bar{r} - \bar{v}(r)). \quad (12)$$

Учитывая сравнительно невысокое взаимодействие смежных лезвий ножа, принимаем, что начало действия на измельчаемый материал – от приближенной к центру вращения точки, расположенной на расстоянии $r_{вн}$. Тогда крутящий момент на лезвиях ножей измельчителя в воздушно-вихревой зоне определится из формулы:

$$M_1 = z_n \xi_{1,л} h_n \frac{\rho_b \omega_0^2 r_a^3}{2} \int_{r_{вн}}^1 [\bar{r} - \bar{v}(\bar{r})]^2 \bar{r} d\bar{r}, \quad (13)$$

где Z_n – количество горизонтально расположенных ножей на валу измельчителя.

При устойчивом турбулентном движении можно принять, что значение $\xi_{1,л}$ имеет постоянное значение.

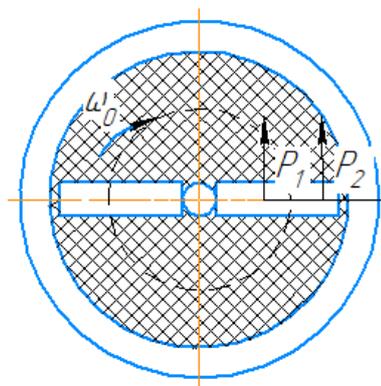


Рис. 2. Схема взаимодействия ножа измельчителя с воздушно-вихревой и воздушно-продуктовой зонами
Fig. 2. Interaction pattern of a shredder blade with the air-vortex and air-product zones

Следовательно, для упрощения расчетов примем значение толщины ножа постоянным: $h_n = const$.

Интегрируя выражение (13), после преобразования можно определить значение крутящего момента сопротивления среды перемещению ножей измельчителя применительно к воздушно-вихревой зоне по выражению:

$$M_1 = z_n \xi_{2n} h_n \frac{\rho_c \omega_0^2 r_a^3}{2} \times \left(\frac{\psi_1^2 (1 - \bar{r}_{вн}^{10})}{10} + \frac{2\psi_1 \psi_2 (1 - \bar{r}_{вн}^9)}{9} + \frac{\psi_2^2 (1 - \bar{r}_{вн}^8)}{8} \right). \quad (14)$$

Крутящий момент на лезвиях измельчителя в воздушно-продуктовой зоне определится аналогичным образом, причем значения коэффициентов будут отличаться.

Крутящий момент на ножах измельчителя зависит от сил сопротивления перемещению P_2 ножа в воздушно-продуктовой зоне на элементарном участке расстоянием dr горизонтально установленных ножей толщиной h_n из зависимости:

$$dM_2 = P_2 r dr = \xi_{2n} \frac{\rho_c u_2^2(r)}{2} h_n r dr, \quad (15)$$

где ξ_{2n} – значение коэффициента гидравлического сопротивления перемещению ножа в воздушно-продуктовой зоне; ρ_c – значение средней плотности в воздушно-продуктовой зоне, определяемое как

$$\rho_c = \rho_b + \frac{m_c}{V_c}, \quad (16)$$

где m_c – величина массы измельчаемого материала в воздушно-продуктовой зоне, кг; V_c – значение объема воздушно-продуктовой зоны, m^3 .

Перейдя к безразмерным переменным (2), (3), (12), проинтегрируем выражение в пределах от границы воздушно-продуктовой зоны с безразмерной координатой приведенного радиуса, равного $\bar{r} = 1$, до конца ножей, имеющих длину, соответствующую безразмерной координате $\bar{r} = \bar{r}_n$:

$$M_2 = z_n \xi_{2n} h_n \frac{\rho_c \omega_0^2 r_a^3}{2} \int_1^{\bar{r}_n} [\bar{r} - \bar{v}(\bar{r})]^2 \bar{r} d\bar{r}. \quad (17)$$

После интегрирования уравнения (17) и соответствующих преобразований получим:

$$M_2 = z_n \xi_{2n} h_n \frac{\rho_c \omega_0^2 r_a^3}{2} \left(\frac{\psi_1^2 (1 - \bar{r}_{вн}^8)}{8} + \frac{2\psi_1 \psi_2 (1 - \bar{r}_{вн}^7)}{7} + \frac{\psi_2^2 (1 - \bar{r}_{вн}^6)}{6} - \frac{\psi_1 (1 - 5\bar{r}_{вн}^6) + 6\bar{r}_{вн}^5 (1 + \psi_1)}{15} + \frac{2\bar{r}_{вн}^2 (4\bar{r}_{вн} + 3) + 1}{12} \right). \quad (18)$$

Для определения крутящих моментов от возникающих на ножах сил следует учитывать значение сопротивления измельчаемого материала в воздушно-продуктовой зоне. Определение крутящих моментов от внутреннего сопротивления можно определить в такой последовательности. На начальном участке в диапазоне расстояний от $\bar{r} = 1$ до $\bar{r} = \bar{r}_n$

$$dM_{2c} = dF_{2cl} \cdot \tau_{cl}, \quad (19)$$

где F_{2cl} – площадь поверхности соприкосновения слоев, m^2 ; τ_{cl} – касательные напряжения на поверхности соприкосновения слоев, N/m^2 .

$$dF_{2cl} = (2\pi H_r - Z_n \cdot F_n) \cdot dr, \quad (20)$$

где F_n – значение площади поперечного сечения ножа, m^2 .

$$\tau_{cl} = \xi_{cl} \cdot \rho_c \frac{v^2}{2}, \quad (21)$$

где ξ_{cl} – значение коэффициента гидравлического сопротивления взаимодействия от внутренних сил.

Из уравнений (19), (20), (21) получим зависимость для определения крутящего момента:

$$dM_{2c} = \xi_{cl} \cdot \rho_c \frac{v(r)^2}{2} (2\pi H_r - z_n \cdot F_n) \cdot dr. \quad (22)$$

С учетом перехода к значениям приведенных параметров, принимая во внимание зависимость (3), можно записать:

$$dM_{2c} = \xi_{cl} \cdot \rho_c \frac{v(r)^2 \cdot W_0^2 \cdot r_a^2}{2} (2\pi H_{\bar{r}} \cdot r_a - z_n \cdot F_n) \cdot d\bar{r}. \quad (23)$$

После преобразования с учетом выражения (2) получим зависимость:

$$dM_{2c} = \xi_{cl} \cdot \rho_c \cdot W_0^2 \cdot r_a^2 (\pi \cdot H \cdot r_a (\psi_1^2 \cdot \bar{r}^8 + 2\psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \bar{r}^7 + \psi_2^2 \cdot \bar{r}^6 + 2\psi_1 \bar{r}^5 + 2\psi_1 \bar{r}^4 + 2\psi_1 \bar{r}^3 + \bar{r})) \cdot d\bar{r}. \quad (24)$$

Проинтегрируем полученную зависимость на участке от $\bar{r} = 1$ до $\bar{r} = \bar{r}_n$. Получим:

$$M_{2c} = \xi_{cl} \cdot \rho_c \cdot W_0^2 \cdot r_a^2 \cdot \left(\pi \cdot H r_a \cdot \left(\frac{\psi_1^2 \cdot (\bar{r}_n^9 - 1)}{9} + \frac{\psi_1 \cdot \psi_2 (\bar{r}_n^8 - 1)}{4} + \frac{\psi_2 (\bar{r}_n^7 - 1)}{7} + \frac{\psi_3 (\bar{r}_n^6 - 1)}{3} + \frac{2\psi_2 (\bar{r}_n^5 - 1)}{5} + \frac{\bar{r}_n^3 - 1}{3} \right) - \frac{z_n \cdot F_n}{2} \cdot \left(\frac{\psi_1^2 (\bar{r}_n^8 - 1)}{8} + \frac{2\psi_1 \cdot \psi_2 (\bar{r}_n^8 - 1)}{8} + \frac{2\psi_1 \cdot \psi_2 (\bar{r}_n^7 - 1)}{7} + \frac{\psi_2 (\bar{r}_n^6 - 1)}{6} + \frac{2\psi_1 (\bar{r}_n^5 - 1)}{5} + \frac{\psi_2 (\bar{r}_n^4 - 1)}{2} + \frac{\bar{r}_n^2 - 1}{2} \right) \right). \quad (25)$$

Значение крутящего момента от сил гидравлического сопротивления на границах воздушно-вихревой и воздушно-продуктовой зон измельчаемого слоя,

то есть при значении приведенного радиуса $\bar{r} = 1$, определим по выражению:

$$M_a = 2\pi H r_a^2 \tau_a, \quad (26)$$

где H – рабочая высота рабочей зоны измельчаемого материала в зависимости от материала и степени загрузки, м; τ_a – касательные напряжения на участках между воздушно-вихревой и воздушно-продуктовой зонами, Н/м².

Касательные напряжения при вращательном движении определяются зависимостью:

$$\tau = \mu \left(-r \frac{d\omega}{dr} \right), \quad (27)$$

где μ – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Подставляя в выражение (27) зависимость (2), получим, что при $\bar{r} = 1$.

$$\tau_a = -\mu \omega_0 (3\psi_1 + 2\psi_2). \quad (28)$$

Окончательное значение крутящего момента на границе воздушно-вихревой зоны и воздушно-продуктовой зоны определится выражением:

$$M_a = -2\pi\mu\omega_0 H r_a^2 (3\psi_1 + 2\psi_2). \quad (29)$$

На участке 3 (рис. 1) будет действовать только момент внутреннего сопротивления воздушно-продуктового слоя – соответственно

$$dM_{3сл} = dF_{3сл} \cdot \tau_{сл}; \quad (30)$$

$$dF_{3сл} = 2\pi H \cdot r \cdot dr. \quad (31)$$

Из зависимостей (21), (30) и (31) с учетом уравнения (3) запишем:

$$dM_{3сл} = \xi_{сл} \cdot \rho_c \cdot \bar{v}^2(r) \cdot \omega_0^2 \cdot r_a \cdot \pi \cdot H \cdot \bar{r} \cdot d\bar{r}, \quad (32)$$

а выполнив преобразования с учетом уравнения (2), получим:

$$dM_{3сл} = \pi \xi_{сл} \cdot \rho_c \cdot H \cdot \bar{r}^3 (\psi_1 \bar{r}^3 + \psi_2 \bar{r}^2 + 1)^2 \cdot \omega_0^2 \cdot r_a^3 \cdot d\bar{r}$$

$$dM_{3сл} = \pi \xi_{сл} \cdot \rho_c \cdot H \cdot \omega_0^2 \cdot r_a^3 (\psi_1 \bar{r}^9 + 2\psi_1 \psi_2 \bar{r}^8 + \psi_2 \bar{r}^7 + 2\psi_1 \bar{r}^6 + 2\psi_2 \bar{r}^5 + \bar{r}^3). \quad (33)$$

Интегрируя уравнение на исследуемом участке $\bar{r} = \bar{r}_л$ до $\bar{r} = \bar{r}_c$, определим момент крутящий:

$$dM_{3сл} = \pi \xi_{сл} \cdot \rho_c \cdot H \cdot \omega_0^2 \cdot r_a^3 \left(\frac{\psi_1 (\bar{r}_c^{10} - \bar{r}_л^{10})}{10} + \frac{2\psi_1 \psi_2 (\bar{r}_c^9 - \bar{r}_л^9)}{9} + \frac{\psi_2 (\bar{r}_c^8 - \bar{r}_л^8)}{8} + \frac{2\psi_1 (\bar{r}_c^7 - \bar{r}_л^7)}{7} + \frac{\psi_2 (\bar{r}_c^6 - \bar{r}_л^6)}{6} + \frac{r_c^4 - r_л^4}{4} \right). \quad (34)$$

Тогда крутящий момент от сил сопротивления боковой стенки определен зависимостью:

$$M_c = 2\pi H r_{ct}^2 \tau_c, \quad (35)$$

где r_{ct} – значение радиуса рабочего объема измельчителя, м.

Касательные напряжения на боковой поверхности внутренней части корпуса измельчителя определены выражением:

$$\tau_c = \xi_c \rho_c \frac{v_c^2}{2}, \quad (36)$$

где ξ_c – значение коэффициента гидравлического сопротивления корпуса измельчителя от вращения материала в воздушно-продуктовой зоне.

Значение приведенной окружной скорости измельчаемого материала у внутренней стенки можно определить из выражения (34), с учетом (2), (3), (22), как

$$\bar{v}_c(\bar{r}) = \frac{1}{\bar{r}_c \omega_0 r_a^2} \sqrt{\frac{M_c}{\pi H \xi_c \rho_c}}. \quad (37)$$

Применительно к нашему случаю крутящий момент определится как

$$M_c = P_{из} r_{из}, \quad (38)$$

где $P_{из}$ – сила, возникающая при закручивании подвижной насадки, в результате перемещения измельчаемого материала вдоль боковой стенки, определяемая на удаленности $r_{из}$ от оси ротора измельчающего аппарата. Тогда

$$\bar{v}_c(\bar{r}) = \frac{1}{\bar{r}_c \omega_0} \sqrt{\frac{P_{из} \bar{r}_{из}}{\pi H \xi_c \rho_c r_a^3}}. \quad (39)$$

На основании экспериментальных данных разработанного типа измельчителя наиболее эффективно осуществляется работа при его заполнении измельчаемым материалом на 1/3, а в общем случае – не более чем на 1/k часть. Тогда объем материала в воздушно-продуктовой зоне –

$$V_{пр} = \frac{V_B}{2},$$

а в общем случае –

$$V_{пр} = \frac{V_B}{k-1}, \quad (40)$$

где k – степень заполнения измельчаемой массы объема рабочей зоны.

Объем слоя в воздушно-вихревой зоне определится как

$$V_B = \pi r_a^2 H. \quad (41)$$

Объем слоя в воздушно-продуктовой зоне –

$$V_{пр} = \pi (r_c^2 - r_a^2) H. \quad (42)$$

Из выражений (29) и (30) можно определить $r_a = r_c \sqrt{1,5}$, а в общем виде –

$$r_a = r_c \sqrt{\frac{k-1}{k}}. \quad (43)$$

При определении особенностей функционирования измельчающего устройства руководствовались требованиями ГОСТ Р ИСО 11448-2002⁶.

Результаты и их обсуждение

На основании теоретических исследований разработали лабораторный измельчитель для преобразования фруктово-ягодного жмыха в порошок [14]. Измельчитель содержит камеру измельчения I цилиндрической формы, сообщающуюся в верхней части с загрузочным бункером II и разгрузочной полостью готового продукта III в нижней ее части (рис. 3).

Внутри цилиндрического корпуса I камеры измельчения I по оси симметрии установлен вертикальный вал 2, соединенный с приводом 3. На вертикальном валу 2 соосно установлены два одинаковых ножа 4, изготовленных из углеродистой конструкционной стали повышенной твердости с углом заточки

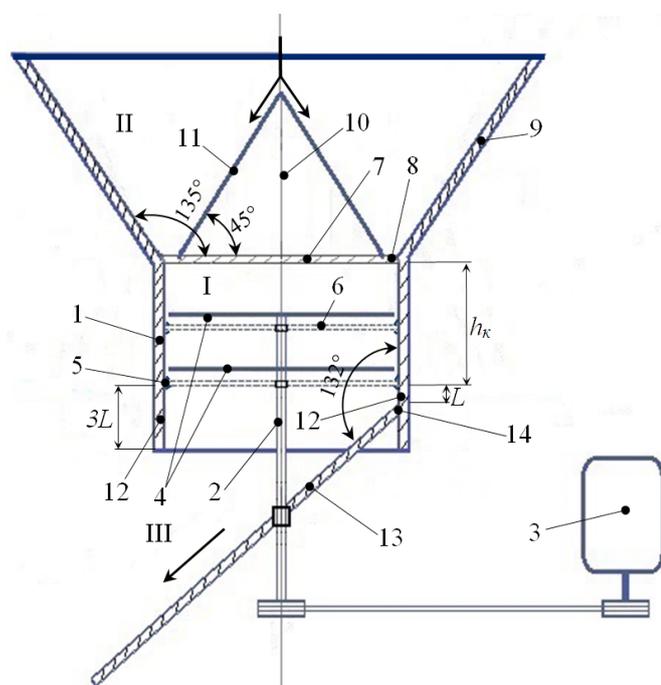


Рис. 3. Схема измельчителя:

- 1 – корпус камеры измельчения; 2 – вертикальный вал;
- 3 – привод; 4 – ножи; 5, 14 – пазы; 6 – сита;
- 7 – основание загрузочного бункера; 8 – загрузочное окно;
- 9 – загрузочный бункер; 10, 11 – конус и его образующая;
- 12 – внутренняя поверхность камеры измельчения;
- 13 – дека

Fig. 3. Design diagram of the shredder:

- 1 – shredding chamber body; 2 – vertical shaft;
- 3 – drive; 4 – knives; 5, 14 – grooves; 6 – sieves;
- 7 – loading hopper base; 8 – loading hole;
- 9 – loading hopper; 10, 11 – cone and its generatrix;
- 12 – inner surface of the shredding chamber; 13 – deck

⁶ГОСТ Р ИСО 11448-2002. Измельчители и дробилки передвижные с автономным приводом. Требования безопасности и методы испытаний. М.: Госстандарт России, 2002. 15 с.

рабочей грани 40°. Под каждым ножом 4 в плоскости, параллельной плоскости реза ножа 4, в пазу 5 цилиндрического корпуса I установлен с возможностью его съема классификатор в виде сменного сита 6 с уменьшающимся размером ячеек по направлению к разгрузочной полости готового продукта III.

Загрузочный бункер II выполнен в виде полого усеченного конуса, меньшим основанием 7 обращенного к камере измельчения I и сообщающегося с ней посредством одинаковых загрузочных окон 8, равномерно расположенных по периферии в основании 7 загрузочного бункера. Стенки 9 загрузочного бункера выполнены под углом 135° к его основанию 7. В центре основания 7 загрузочного бункера жестко установлен полый конус 10, с вершиной, обращенной в сторону подачи исходного материала. Образующая 11 конуса 10 составляет с его основанием угол 45°, который, по данным предварительных рекогносцировочных исследований, является углом естественного откоса для высушенного плодово-ягодного жмыха.

Разгрузочная полость готового продукта III образована внутренней поверхностью стенки 12 цилиндрического корпуса I под нижним сменным ситом 4 и поверхностью деки 13, выполненной в виде плоской металлической пластины с бортиками на боковой ее поверхности и повторяющей форму паза 14 в верхней ее части. Дека 13 верхней своей частью жестко установлена в пазу 14, выполненном на внутренней стенке цилиндрического корпуса I под углом 132° к его образующей, что соответствует углу естественного откоса порошка, полученного измельчением сухих ягодных выжимок, по металлической поверхности, равного 48°. Кроме того, паз 14 выполнен на внутренней стенке цилиндрического корпуса I на расстоянии L от нижнего сменного сита 6 при высоте цилиндрического корпуса H = h_к + 3L, где h_к – высота цилиндрического корпуса I до нижнего сменного сита 6. Данная зависимость получена экспериментальным путем. Выступающая над декой 13 стенка цилиндрического корпуса высотой 3L служит отражателем, обеспечивает направленную и равномерную загрузку деки 13 готовым ягодным порошком и препятствует забросу порошка непосредственно в камеру измельчения.

Измельчитель функционирует следующим образом. Чтобы получить готовый продукт с заданным размером частиц порошка, под каждым ножом 4 в пазу 5 цилиндрического корпуса I устанавливаются съемные сита 6 с заданным размером ячеек. Включают привод 3. Соединенный с приводом 3 вертикальный вал 2 с установленными жестко и соосно ножами 4 приводится во вращательное движение.

В загрузочный бункер I загружают предварительно просушенный сыпучий жмых, который конусом 10 распределяется на два потока. Благодаря выполнению стенок 9 загрузочного бункера под углом 135°, а стенок 11 – конуса 10, к его основанию 7 под углом 45° (равному углу естественного откоса сухих фруктово-ягодных выжимок по металлической поверхности) жмых перемещается к загрузочным окнам 8 загрузочного бункера 9 беспрепятственно, без налипания на стенки, непрерывно направленно и равномерно. Через равномерно выполненные в основании 7 загрузочные окна 8 исходный материал попадает в камеру измельчения I, где измельчается режущей кромкой первого ножа 4. Измельченные первым ножом 4 выжимки попадают на установленное в пазу 5 цилиндрического корпуса 1 сменное сито 6 с заданным размером ячеек. Просеянные измельченные выжимки далее попадают в плоскость следующего соосно установленного с предыдущим ножом на валу 2 ножа 4, измельчаются режущей кромкой второго ножа 4 и направляются на установленное под ним сменное сито 6 с более мелкими ячейками заданного размера, просеиваются и в виде порошка направляются в разгрузочную полость готового продукта III. В процессе работы измельчителя порошок, попадая на поверхность деки 13, установленной под оптимальным углом 48°, обеспечивающим эффективную выгрузку и наименьшее трение порошка о металлическую поверхность, совершает контролируемое перемещение. Готовый продукт загружается в тару.

Разработанный измельчитель лабораторно реализован и испытан на базе Тверской ГСХА. В рамках

экспериментального исследования поставлена задача получения ягодных порошков из сухих выжимок с заданным фракционным составом не более 1 мм. Для оценки функционирования заявленного измельчителя взяли образцы предварительно высушенных в сушильном шкафу до влажности 10% выжимок ягод брусники, клюквы, черники, смородины черной, жимолости и облепихи. В лабораторном измельчителе использовали сита с заданными размерами ячеек: верхнее – 3 мм, нижнее – 1 мм. После помола выжимок провели оценку крупности помола на рассеве РЛ-4 в соответствии с требованиями ГОСТ⁷. Результаты ситового анализа измельченного материала при однократном пропуске представлены на рисунке 4.

Установлено, что количество продукта с размером частиц менее 1 мм колебалось по размалываемым материалам от 98,3 до 98,8%, что является удовлетворительным показателем в системе производства мукомольных продуктов. Так, выход наиболее близкой по параметрам обойной сортовой хлебопекарной муки⁸ из зерна составляет порядка 95%. Степень измельчения продукта может корректироваться посредством замены ситового классификатора и изменения режима функционирования устройства.

При работе измельчающего устройства, как правило, на полезную работу расходуется только часть затрачиваемой энергии. Согласно существующим данным [3, 7] величина фракций при измельчении напрямую зависит от создаваемой мощности. При этом значение непосредственно затрачиваемой на процесс измельчения мощности может быть определено путем составления энергетического баланса⁹ [15].

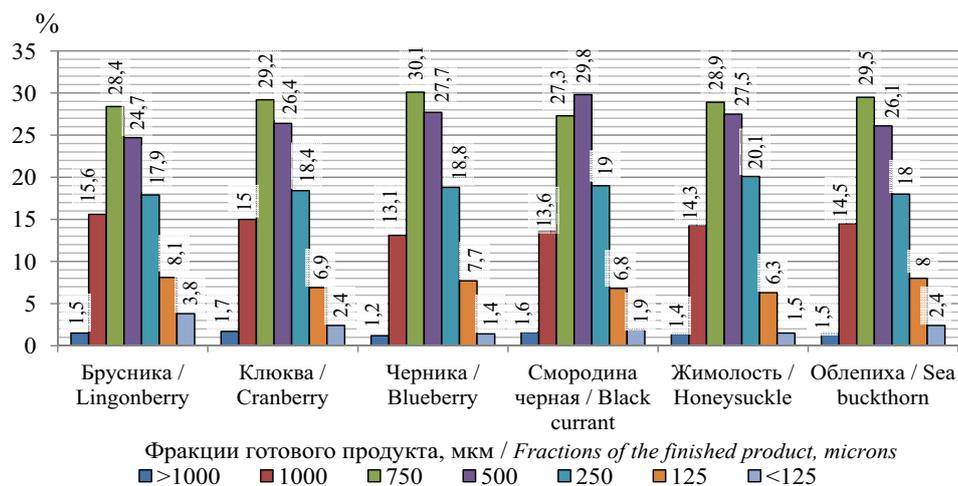


Рис. 4. Эффективность функционирования измельчающего устройства

Fig. 4. Performance efficiency of the shredder

⁷ ГОСТ 27560-87. Мука и отруби. Метод определения крупности. М.: Стандартинформ, 2007. 4 с.

⁸ ГОСТ 26574-2017. Мука пшеничная хлебопекарная. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2018. 26 с.

⁹ Сергеев Н.С., Николаев В.Н., Запелалов М.В., Сергеев Д.Н. Новое поколение измельчителей зерна и семян масличных культур для сельскохозяйственного производства: Монография. Челябинск: Южно-Уральский ГАУ, 2022. 196 с. EDN: LJZEDQ.

Уравнение энергетического баланса можно представить в виде:

$$N_2 + N_a = N_c + N_{из} + N_{2сл} + N_{3сл}, \quad (44)$$

где N_2 и N_a – мощность, создаваемая на роторе непосредственно в воздушно-продуктовой и воздушно-вихревой зонах соответственно, Вт; N_c – мощность, развиваемая воздушно-продуктовой зоной вследствие трения о стенку рабочей камеры измельчающего устройства, Вт; $N_{из}$ – мощность, затрачиваемая на выполнение технологического процесса измельчения, Вт; $N_{2сл}$ – мощность, расходуемая на перемешивание материала в воздушно-продуктовой зоне на участке 2, Вт; $N_{3сл}$ – мощность, расходуемая на перемешивание материала в воздушно-продуктовой зоне на участке 3, Вт.

Мощность, затрачиваемая на выполнение технологического процесса измельчения, в рабочей камере измельчителя определяется из выражения:

$$N_i = M_i \cdot \omega_0, \quad (45)$$

Значение мощности, передаваемой измельчителем непосредственно материалу в воздушно-продуктовой зоне, –

$$N_2 = z_{л1} \xi_{2л} h_{л1} \frac{\rho_c \omega_0^3 r_a^3}{2} \left(\frac{\psi_1^2 (1 - \bar{r}_{вн}^8)}{8} + \frac{2\psi_1 \psi_2 (1 - \bar{r}_{вн}^7)}{7} + \frac{\psi_2^2 (1 - \bar{r}_{вн}^6)}{6} - \frac{\psi_1 (1 - 5\bar{r}_{вн}^6) + 6\bar{r}_{вн}^5 (1 + \psi_1)}{15} + \frac{2\bar{r}_{вн}^2 (4\bar{r}_{вн} + 3) + 1}{12} \right), \quad (46)$$

откуда значение мощности, расходуемой на смешивание материала в воздушно-продуктовой зоне на участке 2, определится зависимостью:

$$N_{2сл} = \xi_{сл} \cdot \rho_c \cdot \omega_0^3 \cdot r_a^2 \left(\pi H r_a \cdot \left(\frac{\psi_1^2 \cdot (\bar{r}_л^9 - 1)}{9} + \frac{\psi_1 \cdot \psi_2 \cdot (\bar{r}_л^8 - 1)}{4} + \frac{\psi_2 \cdot (\bar{r}_л^7 - 1)}{7} + \frac{\psi_1 \cdot (\bar{r}_л^6 - 1)}{3} + \frac{2\psi_2 \cdot (\bar{r}_л^5 - 1)}{5} + \frac{\bar{r}_л^3 - 1}{3} \right) - \frac{z_{л1} - F_{л1}}{2} \cdot \left(\frac{\psi_1^2 \cdot (\bar{r}_л^6 - 1)}{8} + \frac{2\psi_1 \psi_2 \cdot (\bar{r}_л^7 - 1)}{7} + \frac{\psi_2 \cdot (\bar{r}_л^6 - 1)}{6} + \frac{2\psi_1 \cdot (\bar{r}_л^5 - 1)}{5} + \frac{\psi_2 \cdot (\bar{r}_л^4 - 1)}{2} + \frac{\bar{r}_л^2 - 1}{2} \right) \right). \quad (47)$$

Значение мощности, расходуемой на смешивание материала, распределенного в воздушно-продуктовой зоне на участке 3, –

$$N_{3сл} = \xi_{сл} \cdot \rho_c \cdot H \cdot \omega_0^3 \cdot r_a^2 \left(\frac{\psi_1 \cdot ((\bar{r}_c^{10} - \bar{r}_л^{10}))}{10} + \frac{2\psi_1 \cdot \psi_2 \cdot (\bar{r}_c^9 - \bar{r}_л^9)}{9} + \frac{\psi_2 \cdot (\bar{r}_c^8 - \bar{r}_л^8)}{8} + \frac{2\psi_1 \cdot \psi_2 \cdot (\bar{r}_c^7 - \bar{r}_л^7)}{7} + \frac{\psi_2 \cdot (\bar{r}_c^6 - \bar{r}_л^6)}{3} + \frac{\bar{r}_c^4 - \bar{r}_л^4}{4} \right). \quad (48)$$

Мощность N_a определяется из уравнения (28):

$$N_a = -2\pi\mu\omega_0^2 H r_a^2 (3\psi_1 + 2\psi_2). \quad (49)$$

Значение мощности сил трения о стенку рабочего объема камеры измельчения N_c можно определить зависимостью:

$$N_c = M_c \frac{v_c}{r_c}. \quad (50)$$

Итоговое значение мощности сил трения о стенку рабочего объема измельчающей камеры можно записать в виде выражения:

$$N_c = 2\tau_c \sqrt{\frac{\pi H P_{из} r_{из}}{\xi_c \rho_c}}. \quad (51)$$

Зависимость мощности, затрачиваемой на измельчение, можно определить из уравнения (44):

$$N_{из} = N_2 - N_c - N_{2сл} - N_{3сл} + N_a. \quad (52)$$

На основании выполненных расчетов значение фактически затрачиваемой энергии на измельчение ягодных выжимок влажностью 10% до фракции менее 1 мм составило 4,40 кВт·ч/т.

Следующим этапом исследований является модернизация устройства с целью оптимизации энергетических показателей, затрачиваемых при измельчении вторичных растительных материалов разной влажности и химического состава, обладающих различными физико-механическими характеристиками (мякоть, семена, косточки и пр.).

Выводы

1. В конструкцию разработанного измельчителя вторичного плодово-ягодного сырья (выжимок) интегрированы принципы использования рабочих поверхностей углов естественного откоса сырья и готового продукта, а также двухступенчатое измельчение.

2. Разработанное устройство при измельчении сухих выжимок клюквы, брусники, черники, смородины, жимолости и облепихи обеспечивает степень измельчения 98,3...98,8% и дисперсность продукта менее 1 мм. Дисперсность может корректироваться посредством замены ситового классификатора и изменения режима функционирования устройства.

3. Расчетное значение фактической энергоёмкости деформации ягодных выжимок влажностью не более 10%, измельчаемых до фракции менее 1 мм, составляет 4,40 кВт·ч/т.

4. Интеграция разработанного устройства в машинно-технологические схемы переработки вторичных и других растительных материалов будет способствовать повышению качества измельчения сырья и оптимизации энергоёмкости выполняемого технологического процесса.

Список источников

1. Скоморохова А.И., Иванова Э.С., Алексенцев Д.С. Технологическая линия производства продуктов питания с применением аддитивных технологий // Пищевые системы. 2021. Т. 4, № 3S. С. 275-280. EDN: LFYGLD
2. Брагинец С.В., Бахчевников О.Н., Алферов А.С. Результаты экспериментальных исследований измельчения высушенных волоконистых растительных материалов // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 4. С. 591-608. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.591-608>
3. Смирнов Р.А., Оболенский Н.В., Свистунов А.И. Теоретическое обоснование конструкционного решения измельчителя корнеклубнеплодов // Кормопроизводство. 2018. № 5. С. 40-48. EDN: XOAMSL
4. Елисеев М.С., Елисеев И.И., Рыбалкин Д.А. Теоретическое обоснование параметров работы устройства для ориентированной подачи измельчаемого материала к рабочим органам молоткового измельчителя // Аграрный научный журнал. 2017. № 3. С. 47-50. EDN: YMREBB
5. Kazub V.T., Kosheleva M.K., Rudobashta S.P. Kinetics of grinding of vegetable raw materials during electric discharge extraction. *ChemChemTech*. 2021;64(6):76-82. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216406.6385>
6. Bas-Bellver C., Barrera C., Betoret N., Seguí L. Impact of disruption and drying conditions on physicochemical, functional and antioxidant properties of powdered ingredients obtained from brassica vegetable by-products. *Foods*. 2022;11(22):3663. <https://doi.org/10.3390/foods11223663>
7. Нечаев В.Н. Влияние некоторых параметров на рабочий процесс дробилки зерна // Вестник НГИЭИ. 2015. № 6 (49). С. 67-73. EDN: UBIORJ
8. Кривов Д.А. Механизмы разрушения растительного сырья в валковой дробилке с наборными пластинами в форме РК-профиля // Вестник КрасГАУ. 2024. № 6 (207). С. 198-205. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-6-198-205>
9. Jung H., Lee Y.J., Yoon W.B. Effect of moisture content on the grinding process and powder properties in food: a review. *Processes*. 2018;6(6):69. <https://doi.org/10.3390/pr6060069>
10. Данилин С.И., Родионов Ю.Ю., Родионов Ю.В., Чумиков Ю.А., Скоморохова А.И. Совершенствование технологии получения порошков из растительного сырья // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2020. № 4. С. 150-159. EDN: JTFPII
11. Годунов О.А., Черных В.Я. Инновационная технология производства пищевых порошков из овощей, фруктов, ягод и грибов // Хлебопродукты. 2020. № 6. С. 48-53. EDN: WOWYXU
12. Резник Е.И., Карташов С.Г. Технология ускоренной переработки грубого растительного сырья и отходов // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 7. С. 8-13. EDN: WDJPYV
13. Зверев С.В., Алдошин Н.В., Васильев А.С., Глухова Е.В. Технология производства порошков из ягодного сырья // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2021. № 4 (32). С. 26-35. EDN: MCZTTQ
14. Измельчитель сухих ягодных выжимок: Патент RU226856 U1, МПК B02C18/00 / А.С. Васильев, Е.Н. Чумакова, В.В. Голубев, И.А. Кудласевич. Заяв. № 2024109634, 09.04.2024, опубл. 26.06.2024. Бюл. № 18. EDN: GSTKUF
15. Балданов М.Б., Сергеев Ю.А., Лабаров Д.Б., Гармаев Ц.И. Энергетическая оценка процесса измельчения кусковых материалов // Вестник ВСГУТУ. 2019. № 2 (73). С. 57-63. EDN: TEESLN

References

1. Skomorokhova A.I., Ivanova E.S., Aleksentsev D.S. Process line for food production using additive technology. *Food systems*. 2021;4(3S):275-280. (In Russ.) <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-275-280>
2. Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Alferov A.S. Experimental Data of Grinding Dried Fibrous Plant Materials. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;31(4):591-608. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202104.591-608>
3. Smirnov R.A., Obolenskiy N.V., Svistunov A.I. Theoretical evaluation of design of root and tuber chopper. *Kormoproizvodstvo*. 2018;5:40-48. (In Russ.)
4. Eliseev M.S., Eliseev I.I., Rybalkin D.A. The theoretical justification of parameters of operation for oriented feeding of mill material to the working parts of the hammer mill shredder. *The Agrarian Scientific Journal*. 2017;3:47-50. (In Russ.)
5. Kazub V.T., Kosheleva M.K., Rudobashta S.P. Kinetics of grinding of vegetable raw materials during electric discharge extraction. *ChemChemTech*. 2021;64(6):76-82. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216406.6385>
6. Bas-Bellver C., Barrera C., Betoret N., Seguí L. Impact of disruption and drying conditions on physicochemical, functional and antioxidant properties of powdered ingredients obtained from brassica vegetable by-products. *Foods*. 2022;11(22):3663. <https://doi.org/10.3390/foods11223663>
7. Nechaev V.N. The influence of some parameters on the workflow grain crushers. *Vestnik NGIEI*. 2015;6(49):67-73. (In Russ.)
8. Krivov D.A. Vegetable raw materials destruction mechanisms in a roller crusher with set plates in the form of an RT-profile. *Bulletin of KrasGAU*. 2024;6(207):198-205. (In Russ.) <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-6-198-205>
9. Jung H., Lee Y.J., Yoon W.B. Effect of Moisture Content on the Grinding Process and Powder Properties in Food: A Review. *Processes*. 2018;6:69. <https://doi.org/10.3390/pr6060069>
10. Danilin S.I., Rodionov Yu.Yu., Rodionov Yu.V., Chumikov Yu.A., Skomorokhova A.I. Improving the technology of obtaining powders from plant raw materials. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products*. 2020;4:150-159. (In Russ.)
11. Godunov O.A., Chernykh V.Ya. Innovative technology for the production of food powders from vegetables, fruits, berries, and mushrooms. *Khleboprodukty*. 2020;6:48-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2020-29-6-48-53>
12. Reznik E.I., Kartashov S.G. Technology of accelerated processing of rough plant raw material and waste. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016;7:8-13. (In Russ.)
13. Zverev S.V., Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Glukhova E.V. Production technology of powders from berry raw materials. *Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2021;4(32):26-35. (In Russ.)
14. Vasiliev A.S., Chumakova E.N., Golubev V.V., Kudlasevich I.A. Shredder of dry berry squeezes: Patent No 226856 U1 Russian Federation, IPK B02C18/00/2024. (In Russ.)
15. Baldanov M.B., Sergeev Yu.A., Labarov D.B., Garmayev Ts.I. Energy evaluation of the grinding process of lump materials. *ESSUTM Bulletin*. 2019;2(73):57-63. (In Russ.)

Информация об авторах

- ¹ **Алдошин Николай Васильевич**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник; naldoshin@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-0446-10964>; SPIN-код: 6032-9021, AuthorID: 593777
- ² **Васильев Александр Сергеевич**, д-р с.-х. наук, доцент, заведующий кафедрой; vasilvtgsha@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0936-2011>; SPIN-код: 3817-7640, AuthorID: 655174
- ³ **Кудрявцев Андрей Васильевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; akud@tvgscha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8341-0467>; SPIN-код: 9205-2096, AuthorID: 699657
- ⁴ **Голубев Вячеслав Викторович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; slavasddg@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6421-6658>; SPIN-код: 6542-7070, AuthorID: 658245
- ⁵ **Чумакова Елена Николаевна**, канд. с.-х. наук, доцент, доцент кафедры; elena.chumakova.ne@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4664-8887>; SPIN-код: 8825-7631, AuthorID: 475435
- ¹ Федеральний научний агроинженерний центр ВІМ; 109428, Російська Федерація, г. Москва, 1-й Інститутський проїзд, 5
- ^{2,3,4,5} Тверська державна сільськогосподарська академія; 170904, Російська Федерація, г. Тверь, пос. Сахарово, ул. Маршала Василевського, 7

Вклад авторов

Н.В. Алдошин – руководство исследованиями, формальный анализ, создание черновика рукописи;
А.С. Васильев – концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
А.В. Кудрявцев – методология, визуализация рукописи;
В.В. Голубев – методология, администрирование проекта;
Е.Н. Чумакова – формальный анализ, методология.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 21.10.2024, после рецензирования и доработки 13.03.2025; принята к публикации 14.03.2025

Author Information

- Nikolay V. Aldoshin**¹, DSc (Eng), Professor, Chief Research Engineer; naldoshin@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-0446-10964>
- Aleksandr S. Vasiliev**², DSc (Ag), Associate Professor, Head of the Department; vasilvtgsha@mail.ru
- Andrey V. Kudryavtsev**³, CSc (Eng), Associate Professor; akud@tvgscha.ru
- Vyacheslav V. Golubev**⁴, DSc (Eng), Professor, Head of the Department; slavasddg@mail.ru
- Elena N. Chumakova**⁵, CSc (Ag), Associate Professor; elena.chumakova.ne@mail.ru
- ¹ Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutskiy Proezd Str., 5; Moscow, Russia
- ^{2,3,4,5} Tver State Agricultural Academy; Marshala Vasilevskogo Str, 7; Sakharovo, Tver, Russia

Author Contribution

N.V. Aldoshin – research supervision, formal analysis, writing – original draft;
A.S. Vasiliev – conceptualization, writing – review and editing of the manuscript;
A.V. Kudryavtsev – methodology, visualization;
V.V. Golubev – methodology, project administration;
E.N. Chumakova – formal analysis, methodology.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 21.10.2024; Revised 13.03.2025; Accepted 14.03.2025