

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-4-72-81>  
УДК 635.751:631.527:631:563.3



## Моделирование процесса и режимов работы для эффективной селективной дезинтеграции при измельчении семян кориандра

Н.В. Стерехова, С.Ю. Гонежук, З.А. Меретуков✉, М.В. Щербаков

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Майкопский государственный технологический университет»;  
г. Майкоп, Российская Федерация,  
✉meretukov@yandex.ru*

**Аннотация. Введение.** В увеличении производства эфирного масла из семян кориандра важная роль отводится снижению косвенных потерь от дробления, особенно при уборке и обработке урожая, так как содержание дроблёного и повреждённого семени снижает посевные и продовольственные качества эфирного масла из семян кориандра. **Цель исследования.** Теоретически установить зависимость между прочностью семени, действующими на него усилиями и возникающими в нем деформациями, чтобы выяснить, какую величину силового воздействия можно считать допустимой для семян кориандра. **Методы исследования.** Были проведены экспериментальные исследования на приборе - анализатор текстуры Структурометр СТ-2. Он позволяет реализовывать как простые, так и сложные многоэтапные методики для анализа практически любого вида продукции в автоматическом режиме, при этом пользователь имеет возможность самостоятельного их составления, регулируя как скорость движения индентора, так и скорость нагружения продукта. Ход анализа с построением соответствующих графиков отображается в режиме реального времени на персональном компьютере, при этом пользователь имеет возможность всесторонней обработки получаемых результатов. **Результаты.** Приведена диаграмма сжатия семени и установлена разрушающая деформация, а также нагрузки, действующие на него. Семена кориандра всех сортов при некотором допущении принимаются шарообразными. Значения сферичности для разных уровней влажности варьировались от 0,820 до 0,867 [1,2]. Зависимость силы удара от разрушающей способности рабочего органа измельчителя существенным образом зависят от модуля упругости и позволяют определять критическую силу, разрушающую зерно при силовом контакте. Зная разрушающую нагрузку и сопоставляя её с морфологией внутреннего строения семян кориандра, можно поэтапно и селективно измельчать семенную массу, варьируя доступ к эфирно-масличным и масленичным областям, селективно выделяя наиболее ценные и термолабильные эфиромасличные компоненты семенной массы кориандра, выделяя их на первом этапе процесса подготовки к извлечению из семян кориандра этих веществ за счет селективной криодезинтеграции семенной массы. **Заключение.** Как было показано в работе [3], зависимость деформации и максимального давления в плоскости контакта от силы сжатия семян была смоделирована экспериментально на анализаторе текстуры - структурометре СТ-2, который позволили получить численные значения коэффициента Пуассона и модуля Юнга при упругой деформации семенной массы кориандра.

**Ключевые слова:** растительное сырьё, семена, кориандр, давление, эфирные масла, высокоценные компоненты, математические методы, структурометр, сила сжатия, теория Герца, моделирование процесса

**Для цитирования:** Стерехова Н.В., Гонежук С.Ю., Меретуков З.А., Щербаков М.В. Моделирование процесса и режимов работы для эффективной селективной дезинтеграции при измельчении семян кориандра. *Новые технологии / New technologies*. 2024;20(4):72-81. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-4-72-81>

## Modeling of process and operating modes for efficient selective disintegration in coriander seed grinding

N.V. Sterekhova, S.Y. Gonezhuk, Z.A. Meretukov✉,  
M.V. Shcherbakov

Maykop State Technological University; Maikop, the Russian Federation,  
✉meretukov@yandex.ru

**Abstract. Introduction.** In increasing the production of essential oil from coriander seeds, an important role is given to reducing indirect losses from crushing, especially during harvesting and processing of the crop, since the content of crushed and damaged seeds reduces the sowing and food qualities of essential oil from coriander seeds. The goal of the research is to establish the relationship between the strength of the seed, the forces acting on it and the deformations occurring in it in order to find out what value of force action can be considered acceptable for coriander seeds. **The Research methods.** Experimental studies were carried out on the Structurometer ST-2 texture analyzer. It allowed to implement both simple and complex multi-stage methods for analyzing virtually any type of product in automatic mode, while the user had the ability to independently compile them, adjusting both the speed of the indenter and the speed of loading the product. The course of the analysis with the construction of corresponding graphs was displayed in real time on a personal computer, while the user had the ability to comprehensively process the results obtained. **The Results.** The diagram of seed compression has been given, and the destructive deformation, as well as the loads acting on it, are established. Coriander seeds of all varieties are assumed to be spherical. The sphericity values for different humidity levels vary from 0.820 to 0.867 [1, 2]. The dependence of the impact force on the destructive capacity of the grinder working element significantly depends on the modulus of elasticity and allows determining the critical force that destroys the grain during force contact. Knowing the destructive load and comparing it with the morphology of the internal structure of coriander seeds, it is possible to grind the seed mass in stages and selectively, varying access to the essential oil and oil-bearing areas, selectively isolating the most valuable and thermolabile essential oil components of the coriander seed mass, isolating them at the first stage of the preparation process for extracting these substances from coriander seeds due to selective cryodesintegration of the seed mass. **Conclusions.** As shown in [3], the dependence of the deformation and maximum pressure in the contact plane on the compression force of the seeds has been modeled experimentally on a texture analyzer - Structurometer ST 2, which has made it possible to obtain numerical values of the Poisson ratio and Young's modulus for elastic deformation of the coriander seed mass.

**Keywords:** plant materials, seeds, coriander, pressure, essential oils, high-value components, mathematical methods, structurometer, compression force, Hertz theory, process modeling

**For citation:** Sterekhova N.V., Gonezhuk S.Y., Meretukov Z.A., Shcherbakov M.V. Modeling of process and operating modes for efficient selective disintegration in coriander seed grinding. *New technologies/ Novye Tehnologii*. 2024;20(4):72-81. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-4-72-81>

**Введение.** В частном случае сближение ( $\alpha$ ) соприкасающихся сферического тела (семя кориандра) и плоскости (индентора на анализаторе текстуры структурометре СТ-2) пропорционально отношению [4,5],

которое, с учетом того, что материал индентора практически не деформируется по сравнению с материалом семени кориандра, в данном случае может быть представлено следующей расчетной формулой:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{9}{16} \cdot \frac{P^2}{R_k} \cdot \left(\frac{1 - \nu^2}{E}\right)^2}; \quad (1)$$

где  $P$  – сила сжатия индентора анализатора текстуры структурометра СТ-2, Н;  $R_k$  – радиус семени кориандра, м,  $\alpha$  – сближение, м;  $\nu$  – коэффициент Пуассона семени кориандра, м/м;  $E$  – модуль упругости Юнга семени кориандра при сжатии, Па. Так как сближение ( $\alpha$ ) регистрируется на структурометре и является известной величиной, можем выразить через этот параметр модуль упругости Юнга семени кориандра при сжатии:

$$E = \left\{ \frac{3 \cdot P \cdot (\nu^2 - 1)}{4 \cdot \sqrt[2]{R_k \cdot \alpha^3}}; \frac{3 \cdot P \cdot (1 - \nu^2)}{4 \cdot \sqrt[2]{R_k \cdot \alpha^3}} \right\}; \quad (2)$$

Учитывая, что уравнение (1) имеет два корня (2) относительно модуля упругости Юнга семени кориандра в дальнейшем рассматривается квадрат этого параметра, что позволяет выделить из выражения (2) постоянный параметр, связанный с коэффициентом Пуассона семени кориандра:

$$E^2 = \frac{9 \cdot P}{16 \cdot R_k \cdot \alpha^3} \cdot b_\nu; \text{ где } b_\nu = (\nu^2 - 1)^2 \quad (3)$$

Из (3) следует, что квадрат модуля упругости Юнга пропорционален параметру ( $b_\nu$ ) для любой точки на кривой деформации ( $\alpha$ ) и силы сжатия ( $P$ ) в плоскости контакта индентора структурометра и семян кориандра. В этом случае наиболее информативным будет график в координатах  $\{9 \cdot P^2 / (16 \cdot R_k \cdot \alpha^3) - \alpha\}$ , прямолинейный участок которого будет соответствовать упругой деформации, представляющей собой коэффициент наклона ( $b_\nu$ ) точек деформации семени кориандра.

**Объект и методы исследования.** Моделирование процесса и режимов работы эффективной селективной дезинтеграции при измельчении семян кориандра осуществляли

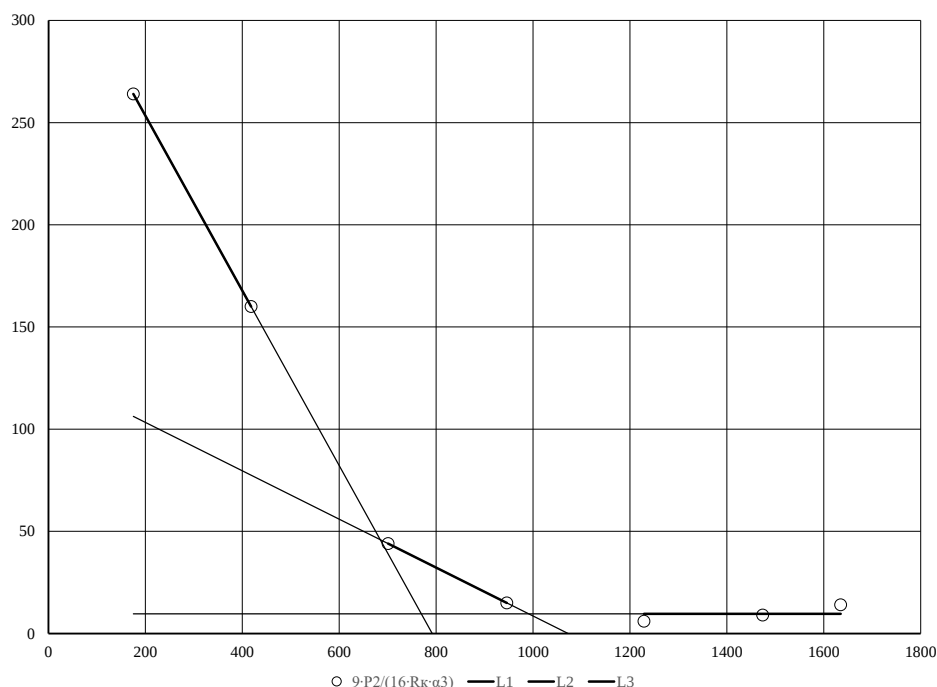
на структурометре СТ 2, регистрируя силу воздействия индентора прибора на плод кориандра с одновременным определением значений деформации ( $\alpha$ ) раздавливаемого семени. С учетом этих параметров и радиуса семени кориандра ( $\approx 1.5$  мм) можно предположить, что при переходе от упругой деформации к пластической будет происходить раскалывание плода на две половинки. В этом случае после раскалывания плода кориандра на два полуплодика внутренние эфироместилца обнажаются [6-9] что облегчает доступ к эфирному маслу кориандра и, следовательно, эфирное масло из них становится легко доступным для дальнейшего процесса его селективного извлечения. В этом случае важным вопросом регулирования процесса селективной дезинтеграции является выяснение влияния на характер деформации семени его влагосодержания. Для выяснения этого механизма были проведены опыты по деформационному воздействию на кориандр сорта Янтарь при различном влагосодержании семян.

Как видно из представленных данных (табл. 1) процесса измельчения семени кориандра при сжатии на структурометре СТ 2, можно выделить три этапа этого процесса:  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  (рис. 1).

Границами этих областей соответственно являются значения деформации ( $\alpha$ ), соответственно равные 684 мкм и 991 мкм. При зазоре, равном  $R_k - 684$  мкм = 0.816 мм происходит раскалывание семени на две половинки, что облегчает доступ экстрагента к эфирному маслу кориандра, и эфирное масло из них становится легко доступным для дальнейшего процесса его селективного извлечения. При дальнейшем деформировании, начиная с зазора  $R_k - 991$  мкм = 0.509 мм, происходит раскалывание полуплодика, что приводит к разрушению эфироместилца и выделению жирного масла, содержащегося в семенной массе кориандра, которое смешивается с более ценным эфирным маслом.

**Таблица 1.** Экспериментальные данные процесса измельчения семени кориандра при сжатии на структурометре СТ 2 (радиус семени  $R_k \approx 1.5$  мм, влагосодержание 4.52 %)  
**Table 1.** Experimental data on the process of grinding coriander seeds under compression on the ST 2 structure meter (seed radius is  $R_k \approx 1.5$  mm, moisture content is 4.52%)

| №   | $\alpha$ | P    | $9 \cdot P^2 / (16 \cdot R_k \cdot \alpha^3)$ | L <sub>1</sub> | L <sub>2</sub> | L <sub>3</sub> |
|-----|----------|------|-----------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1   | 175      | 1,94 | 264                                           | 264            |                |                |
| 2   | 418      | 5,58 | 160                                           | 160            |                |                |
| 3   | 701      | 6,38 | 44                                            |                | 44             |                |
| 4   | 946      | 5,83 | 15                                            |                | 15             |                |
| 5   | 1229     | 5,38 | 6                                             |                |                | 10             |
| 6   | 1474     | 8,57 | 9                                             |                |                | 10             |
| 7   | 1635     | 12,7 | 14                                            |                |                | 10             |
| п/п | мкм      | Н    | МПа <sup>2</sup>                              |                |                |                |



**Рис. 1.** Фазы деформации при сжатии семени кориандра на структурометре СТ 2 (радиус семени  $R_k \approx 1.5$  мм, влагосодержание 4.52 %)

**Fig. 1.** Deformation phases during compression of coriander seed on the ST 2 structure meter (seed radius is  $R_k \approx 1.5$  mm, moisture content is 4.52%)

**Результаты исследования и их обсуждение.** Как видно из представленных данных (табл. 2) процесса измельчения семени кориандра при сжатии на структурометре СТ 2 так же, как и в предыдущем случае, можно выделить три этапа этого процесса: L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> (рис. 2). Границами этих областей соответственно являются значения деформации ( $\alpha$ ), которые для данного влагосо-

держания (8.10 %) имеют следующие границы этих областей: соответственно равные 409 мкм и 1203 мкм. При зазоре, равном  $R_k - 409$  мкм = 1.091 мм, также происходит раскалывание семени на две половинки, что облегчает доступ экстрагента к эфирному маслу кориандра, и эфирное масло из них становится легко доступным для дальнейшего процесса его селективного

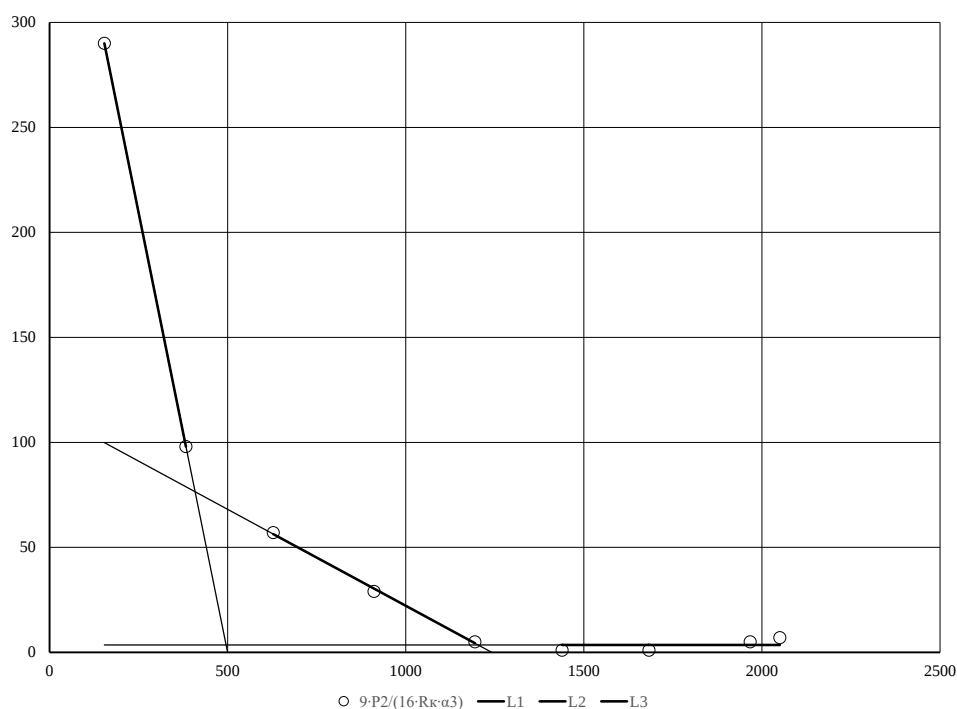
извлечения. При дальнейшем деформировании происходит раскалывание полуплодика, начиная с зазора  $R_k - 1203 \text{ мкм} = 0.297 \text{ мм}$ ; происходит выделение жирного масла, содержащегося в семенной массе кориандра, которое смешивается с более цен-

ным эфирным маслом. Таким образом, увеличение влагосодержания с 4.52 % до 8.10 % (практически в два раза) привел к смещению зон диспергирования (рис. 1, 2) интервала  $\{0.816 \text{ мм}, 0.509 \text{ мм}\}$  до  $\{1.091 \text{ мм}, 0.297 \text{ мм}\}$ .

**Таблица 2.** Экспериментальные данные процесса измельчения семени кориандра при сжатии на структурометре СТ 2 (радиус семени  $R_k \approx 1.5 \text{ мм}$ , влагосодержание 8.10 %)

**Table 2.** Experimental data on the process of grinding coriander seeds under compression on the ST 2 structure meter (seed radius is  $R_k \approx 1.5 \text{ mm}$ , moisture content is 8.10%)

| №   | $\alpha$ | P    | $9 \cdot P^2 / (16 \cdot R_k \cdot \alpha^3)$ | L <sub>1</sub> | L <sub>2</sub> | L <sub>3</sub> |
|-----|----------|------|-----------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1   | 154      | 1,68 | 290                                           | 290            |                |                |
| 2   | 383      | 3,84 | 98                                            | 98             |                |                |
| 3   | 628      | 6,12 | 57                                            |                | 56             |                |
| 4   | 911      | 7,63 | 29                                            |                | 30             |                |
| 5   | 1194     | 4,83 | 5                                             |                | 4              |                |
| 6   | 1439     | 2,78 | 1                                             |                |                | 4              |
| 7   | 1683     | 2,52 | 1                                             |                |                | 4              |
| 8   | 1967     | 9,96 | 5                                             |                |                | 4              |
| 9   | 2050     | 12,8 | 7                                             |                |                | 4              |
| п/п | мкм      | Н    | МПа <sup>2</sup>                              |                |                |                |



**Рис. 2.** Фазы деформации при сжатии семени кориандра на структурометре СТ 2 (радиус семени  $R_k \approx 1.5 \text{ мм}$ , влагосодержание 8.10 %)

**Fig. 2.** Deformation phases during compression of coriander seed on the ST 2 structure meter (seed radius is  $R_k \approx 1.5 \text{ mm}$ , moisture content is 8.10%)

Как показывает практика режимов переработки семенной массы кориандра [10], возможно поступление более влажных семян на переработку. В связи с этим фактом было изучено диспергирование семян с влажностью 10.08 % (табл. 3) и 11.89 % (табл. 4).

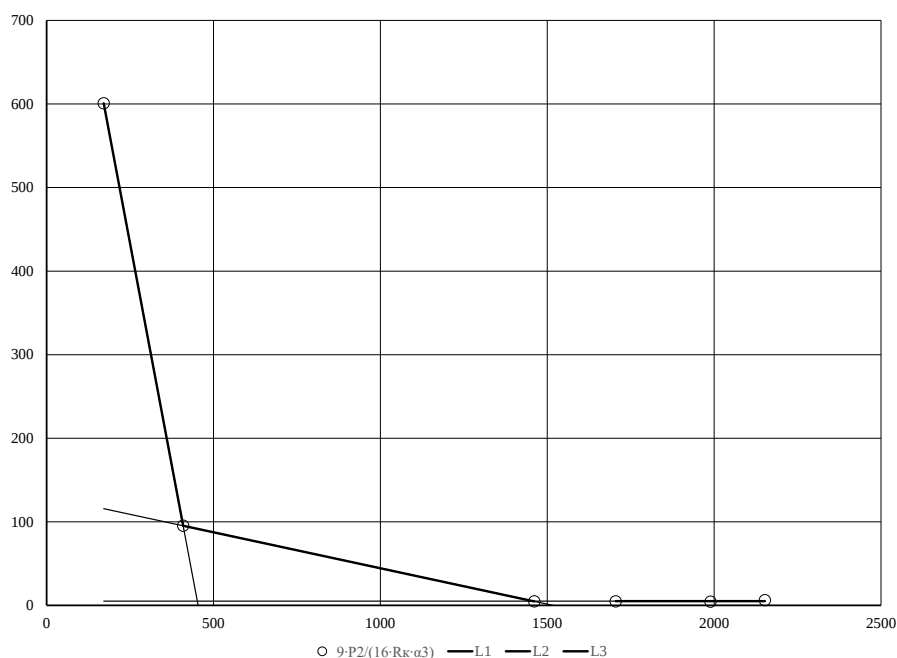
В этих случаях наблюдался аналогичный процесс диспергирования в следующих интервалах зон диспергирования: {1.091 мм, 0.042 мм} (рис. 3) и {0.877 мм, 0.301 мм} (рис. 4).

Анализ полученных данных показал, что максимальное различие между зазором диспергирования, при котором происходит раскалывание семени на две половинки с обеспечением доступа к эфиромасленищу и зазором, который обеспечивает выход жирного масла, лежит в интервале от 8 % до 10 % влажности семян и составляет в среднем 1.09 мм и 0.17 мм соответственно.

**Таблица 3.** Экспериментальные данные процесса измельчения семени кориандра при сжатии на структурометре СТ 2 (радиус семени  $R_k \approx 1.5$  мм, влажность 10.08 %)

**Table 3.** Experimental data on the process of grinding coriander seeds under compression on the ST 2 structure meter (seed radius is  $R_k \approx 1.5$  mm, moisture is content 10.08%)

| №   | $\alpha$ | P    | $9 \cdot P^2 / (16 \cdot R_k \cdot \alpha^3)$ | L <sub>1</sub> | L <sub>2</sub> | L <sub>3</sub> |
|-----|----------|------|-----------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1   | 171      | 2,83 | 600,727                                       | 601            |                |                |
| 2   | 409      | 4,17 | 95,254                                        | 95             | 95             |                |
| 6   | 1461     | 6,33 | 4,825                                         |                | 5              |                |
| 7   | 1705     | 7,89 | 4,714                                         |                |                | 5              |
| 8   | 1989     | 9,56 | 4,355                                         |                |                | 5              |
| 9   | 2152     | 12,9 | 6,286                                         |                |                | 5              |
| п/п | мкм      | Н    | МПа <sup>2</sup>                              |                |                |                |

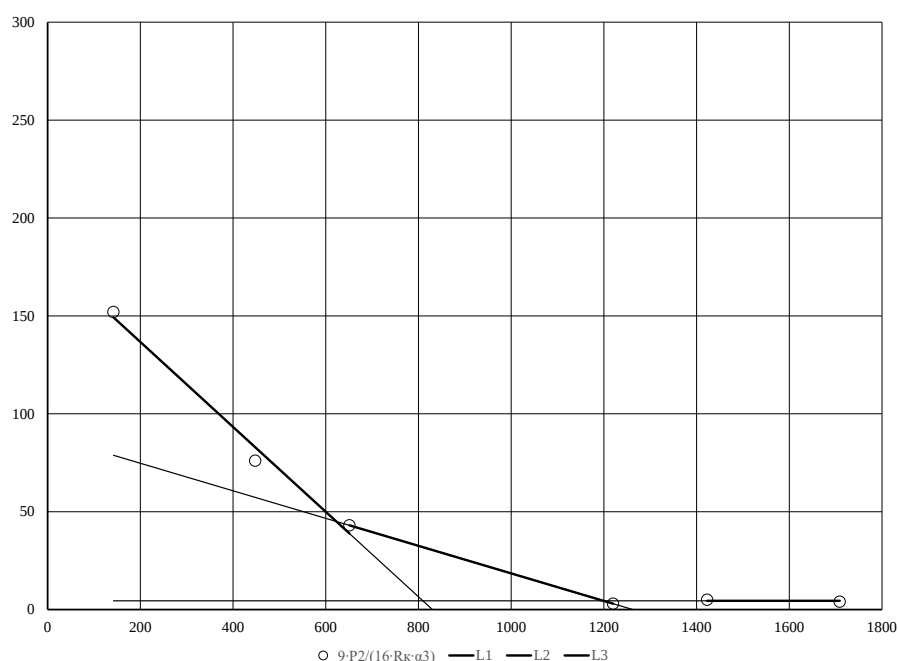


**Рис. 3.** Фазы деформации при сжатии семени кориандра на структурометре СТ 2 (радиус семени  $R_k \approx 1.5$  мм, влажность 10.08 %)

**Fig. 3.** Deformation phases during compression of coriander seed on the ST 2 structure meter (seed radius is  $R_k \approx 1.5$  mm, moisture content is 10.08%)

**Таблица 4.** Экспериментальные данные процесса измельчения семени кориандра при сжатии на структурометре СТ 2 (радиус семени  $R_k \approx 1.5$  мм, влагосодержание 11.89 %)  
**Table 4.** Experimental data on the process of grinding coriander seeds under compression on the ST 2 structure meter (seed radius is  $R_k \approx 1.5$  mm, moisture content is 11.89%)

| №   | $\alpha$ | P    | $9 \cdot P^2 / (16 \cdot R_k \cdot \alpha^3)$ | L <sub>1</sub> | L <sub>2</sub> | L <sub>3</sub> |
|-----|----------|------|-----------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1   | 142      | 1,94 | 152                                           | 149            |                |                |
| 2   | 448      | 5,58 | 76                                            | 83             |                |                |
| 3   | 651      | 6,38 | 43                                            | 39             | 43             |                |
| 5   | 1220     | 5,38 | 3                                             |                | 3              |                |
| 6   | 1423     | 8,57 | 5                                             |                |                | 5              |
| 7   | 1709     | 12,7 | 4                                             |                |                | 5              |
| п/п | МКМ      | Н    | МПа <sup>2</sup>                              |                |                |                |



**Рис. 4.** Фазы деформации при сжатии семени кориандра на структурометре СТ 2 (радиус семени  $R_k \approx 1.5$  мм, влагосодержание 11.89 %)

**Fig. 4.** Deformation phases during compression of coriander seed on the ST 2 structure meter (seed radius is  $R_k \approx 1.5$  mm, moisture content is 11.89%)

**Заклучение.** В результате проведенных исследований установлено, что для осуществления эффективной селективной дезинтеграции при измельчении семян кориандра необходимо осуществлять процесс дезинтеграции в два этапа. На первом этапе диспергирование осуществляется с зазором измельчающих элементов  $\approx 1.1$  мм, что обеспечивает преимущественное раскалывание плода на два полуплодика с доступом к

эфирному маслу, а после его извлечения дополнительному диспергированию полуплодика до размера  $\approx 0.2$  мм, что позволяет эффективно извлекать жирное масло, избегая его смешивания с удаленным ранее жирным маслом. Дополнительно установлено, что наиболее эффективно этот процесс реализуется при оптимальном влагосодержании семенной массы, которое лежит в интервале от 8 % до 10 %.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

## CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no conflict of interests

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yalcin Coskuner, Ersan Karababa. Physical properties of coriander seeds (*Coriandrum sativum* L.) // *Journal of Food Engineering*. 2007. No. 80. P. 408-416.
2. Стерехова Н.В., Меретуков З.А. Перспективы использования селективного дезинтегрирования в качестве подготовки растительного сырья к извлечению // *Новые технологии*. 2019. Вып. 4. С. 56-63.
3. Экспериментальная модель раздавливания семени кориандра [Электронный ресурс] / Стерехова Н.В. [и др.] // *Новые технологии / New technologies*. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-3-86-93>
4. Гудьер Дж. Теория упругости / пер. с англ. Тимошенко С.П. М.: Наука, 1975. 576 с.
5. Меретуков З.А., Кошевой Е.П. Физико-химическая механика прессования масличных материалов: монография. Краснодар: Дом-Юг, 2012. 182 с.
6. Бочкарёв Н.И., Зеленцов С.В., Мошненко Е.В. Морфология, таксономия, методы селекции и характеристика сортов кориандра посевного // *Масличные культуры*. 2014. Вып. 2. С. 159-160.
7. Mohsenin N.N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Science Publishers Inc, 1980. P. 51-87.
8. Diederichsen A. Coriander (*Coriandrum sativum* L.) promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops, 3. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute, Rome, 1996. P. 1-82.
9. Бутова С.В., Седова О.С. Анализ теплофизических свойств семян масличных культур // *Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I*. 2019. С. 53-58.
10. Ксандопуло С.Ю. Качество плодов кориандра, поступающего на Усть-Лабинский ЭМЭК АО «Флорентина» // *Известия вузов. Пищевая технология*. 2000. № 1. С. 94-95.

## REFERENCES

1. Yalcin Coskuner, Ersan Karababa. Physical properties of coriander seeds (*Coriandrum sativum* L.) // *Journal of Food Engineering*. 2007. No. 80. P. 408-416.
2. Sterekhova N.V., Meretukov Z.A. Prospects for the use of selective disintegration as a preparation of plant raw materials for extraction // *New technologies*. 2019. No. 4. P. 56-63. (In Russ.).
3. Experimental model of coriander seed crushing [Electronic resource] / Sterekhova N.V. [et al.] // *New technologies / Novye tehnologii*. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-3-86-93> (In Russ.).
4. Goodyer J. Theory of elasticity / trans. from English. Timoshenko S.P. Moscow: Nauka, 1975. 576 p. (In Russ.).
5. Meretukov Z.A., Koshevoy E.P. Physicochemical mechanics of pressing oilseeds: a monograph. Krasnodar: Dom-Yug, 2012. 182 p. (In Russ.).
6. Bochkarev N.I., Zelentsov S.V., Moshnenko E.V. Morphology, taxonomy, breeding methods and characteristics of coriander varieties // *Oilseed crops*. 2014. No. 2. P. 159-160. (In Russ.).
7. Mohsenin N.N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Science Publishers Inc, 1980. P. 51-87.

8. Diederichsen A. Coriander (*Coriandrum sativum* L.) promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops, 3. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute, Rome, 1996. P. 1-82.

9. Butova S.V., Sedova O.S. Analysis of thermophysical properties of oilseeds // Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I. 2019. P. 53-58. (In Russ.).

10. Ksandopulo S.Yu. Quality of coriander fruits arriving at Ust-Labinsk EMEC of JSC Florientina // News of universities. Food technology. 2000. No. 1. P. 94-95. (In Russ.).

#### ***Информация об авторах / Information about the authors***

**Стерехова Надежда Валентиновна**, аспирант, старший преподаватель кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Майкопский государственный технологический университет»; 385000, Российская Федерация, г. Майкоп, ул. Первомайская, д. 191, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3691-3250>, e-mail: [nadia1982m@mail.ru](mailto:nadia1982m@mail.ru)

**Гонезжук Сусана Юрьевна**, аспирант, старший преподаватель кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Майкопский государственный технологический университет»; 385000, Российская Федерация, г. Майкоп, ул. Первомайская, д. 191, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0580-0061>, e-mail: [gonezhuk.79@mail.ru](mailto:gonezhuk.79@mail.ru)

**Меретуков Заур Айдамирович**, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой строительных и общепрофессиональных дисциплин, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Майкопский государственный технологический университет»; 385000, Российская Федерация, г. Майкоп, ул. Первомайская, д. 191, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4808-4501>, e-mail: [zaur-meretukov@yandex.ru](mailto:zaur-meretukov@yandex.ru)

**Щербаков Михаил Васильевич**, аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Майкопский государственный технологический университет»; 385000, Российская Федерация, г. Майкоп, ул. Первомайская, д. 191, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6718-3243>

**Nadezhda V. Sterekhova**, Postgraduate student, Senior lecturer, the Department of Construction and General Professional Disciplines, Maykop State Technological University; 385000, the Russian Federation, Maikop, 191 Pervomayskaya St., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3691-3250>, e-mail: [nadia1982m@mail.ru](mailto:nadia1982m@mail.ru)

**Susana Y. Gonezhuk**, Postgraduate student, Senior lecturer, the Department of Construction and General Professional Disciplines, Maykop State Technological University; 385000, the Russian Federation, Maikop, 191 Pervomayskaya St., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0580-0061>, e-mail: [gonezhuk.79@mail.ru](mailto:gonezhuk.79@mail.ru)

**Zaur A. Meretukov**, Dr Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Construction and General Professional Disciplines, Maykop State Technological University; 385000, the Russian Federation, Maikop, 191 Pervomayskaya St. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4808-4501>, e-mail: [zaur-meretukov@yandex.ru](mailto:zaur-meretukov@yandex.ru)

**Mikhail V. Shcherbakov**, Postgraduate student, Maykop State Technological University; 385000, the Russian Federation, Maikop, 191 Pervomayskaya St. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6718-3243>

#### **Заявленный вклад авторов**

Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

#### **Claimed contribution of authors**

All authors of the research were directly involved in the design, execution, and analysis of the research. All authors of the article have read and approved the final version submitted.

Поступила в редакцию 14.10.2024

Поступила после рецензирования 15.11.2024

Принята к публикации 18.11.2024

Received 14.10.2024

Revised 15.11.2024

Accepted 18.11.2024