

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-3-86-93>
УДК 635.751:631.53.01:631.361.02



Экспериментальная модель раздавливания семени 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. Измельчения семян – одна из основных технологических операций [1] процесса получения эфирного и жирного масел, от которой зависят его выход и качество [2]. Совершенствование процесса подготовки к экстракции семян кориандра селективной криодезинтеграцией и создание технологических линий различной производительности имеет существенное значение и актуальность, поскольку современные способы и средства криодезинтеграции семян кориандра требуют исследования и совершенствования. Процесс измельчения семян разделяется на три фазы [3]: упругая деформация, которая протекает с начала действия приложенной силы на измельчаемый материал до достижения предела упругости и сопровождается уплотнением и сжатием структурных агрегатов семян; пластическая деформация наступает с момента начала сдвига отдельных элементов материала относительно друг друга и характеризуется относительным смещением структурных агрегатов ядресемян, в результате чего материал уплотняется и плющится; разрушение материала с образованием свободной поверхности частиц. Теоретическому обоснованию подлежит основной параметр процесса криодезинтеграции семян кориандра – нормальное давление, приводящее к деформации, при которой давление на семена превышает их предел прочности, но отсутствует появление масла на поверхности раскрытых семян. Это предотвращает потери масла и загрязнения рабочих органов, особенно эфирными маслами. Мониторинг теоретических исследований процесса измельчения позволяет говорить о необходимости развития математического описания данного процесса.

Ключевые слова: растительное сырье, семена, кориандр, давление, эфирные масла, криодезинтеграция, высокоценные компоненты, энергозатраты, математические методы, структуромер, сила сжатия, теория Герца, моделирование процесса

Для цитирования: Стерехова Н.В., Гонежук С.Ю., Меретуков З.А., Щербаков М.В. Экспериментальная модель раздавливания семени кориандра. *Новые технологии / New technologies*. 2024; 20(3):86-93. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-3-86-93>

Experimental model of crushing coriander seeds

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

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

Abstract Seed crushing is one of the main technological operations [1] in the process of obtaining essential and fatty oils, on which their yield and quality depend [2]. Improving the process of preparation for the extraction of coriander seeds by selective cryodesintegration and creating technological lines of various productivity is of significant importance and relevance. However, modern methods and means of cryodesintegration of coriander seeds require research and improvement. The process of seed grinding is divided into three phases [3]: elastic deformation, which occurs from the beginning of the action of the applied force on the material being ground until the elastic limit is reached and is accompanied by compaction and compression of the structural aggregates of the seeds; plastic deformation, which occurs from the moment of the beginning of the shift of individual elements of the material relative to each other and is characterized by the relative displacement of the structural aggregates of the seed kernel, as a result of which the material is compacted and flattened; destruction of the material with the formation of a free surface of particles. The main parameter of the process of cryodesintegration of coriander seeds is subject to theoretical justification - normal pressure, leading to deformation, where the pressure on the seeds exceeds their tensile strength, but there is no appearance of oil on the surface of the opened seeds. This prevents oil loss and contamination of the working parts, especially with essential oils. Monitoring theoretical studies of the grinding process allows us to talk about the need to develop a mathematical description of this process.

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

For citation: Sterekhova N.V., Gonezhuk S.Y., Meretukov Z.A., Sherbakov M.V. Experimental model of crushing coriander seeds. *Novye Tehnologii / New technologies*. 2024;20(3):86-93. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-3-86-93>

Введение. Анализируя теоретические исследования процесса измельчения семян масличных культур перед извлечением эфирного и жирного масел [4], стоит отметить, что известные исследования направлены на определение давления, необходимого для измельчения семян. Однако отсутствуют математические исследования раздавливания семян эфиромасличных культур. Эти исследования в дальнейшем позволят определить режимы работы машины для криодезинтеграции семян кориандра перед извлечением эфирного и жирного масел, тем самым обеспечивая максимальный выход масла при оптимальных энергозатратах. В частности, позволяет установить необходимый зазор, при котором происходит криодезинтеграция семян, но отсутствует появление жирного масла на их поверхности. Поэтому, возникает необходимость установить математическую модель криодезинтеграции эфиромасличных семян кориандра, а

именно зависимости деформации и максимального давления в плоскости контакта от силы сжатия семян.

Объект и методы исследования. Для анализа взаимозависимостей этих параметров была рассмотрена модель распределения давления между семенем кориандра и двумя стальными пластинами, нижняя из которых неподвижна, а на верхнюю, подвижную, действует сдавливающая сила. Реализация такого нагружения была смоделирована экспериментально на анализаторе текстуры структуромере СТ-2, который позволяет в автоматическом режиме регулировать скорость движения индентора (верхняя пластина) и скорость нагружения семени кориандра. Ход анализа в этом случае, с построением соответствующих графиков, отображается в режиме реального времени на персональном компьютере, при этом имеется возможность всесторонней обработки получаемых результатов. В этом случае, согласно

теории Герца [5], на плоскости контакта образованной плоскостью пластины (принимаемой как полубесконечное тело) и деформируемой сферы возникает давление, которое вызывает перемещение в точках контактной площадки в зависимости от свойств материала семени, характеризующегося следующими параметрами: (ν) – коэффициентом Пуассона семени кориандра, м/м; (E) – модулем упругости Юнга семени кориандра при сжатии, Па. В этом случае сближение (α) соприкасающихся сферического тела (семя кориандра) и плоскости (индентора на анализаторе текстуры структуромере СТ-2) определяется следующей [6] расчетной формулой (м):

$$\alpha = 0.8255 \cdot \sqrt[3]{\frac{P^2}{R_k} \cdot \left(\frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_{инд}^2}{E_{инд}} \right)^2}; \quad (1)$$

где P – сила сжатия индентора анализатора текстуры структуромера СТ-2, Н; R_k – радиус семени кориандра, м, α – сближение, м; ν – коэффициент Пуассона индентора, м/м; $E_{инд}$ – модуль упругости Юнга индентора при сжатии Па. С учетом того, что материал индентора практически на деформируется по сравнению с материалом семени кориандра ($E \ll E_{инд}$), формула (1) может быть преобразована к более простому виду:

$$\alpha = 0.8255 \cdot \sqrt[3]{\frac{P^2}{R_k} \cdot \frac{(1-\nu^2)^2}{E^2}}; \quad (2)$$

Из уравнения (2) выразим в явном виде квадрат модуля упругости Юнга семени кориандра при сжатии:

$$E^2 = \frac{0.5625 \cdot P^2 \cdot (1-\nu^2)^2}{R_k \cdot \alpha^3}; \quad (3)$$

Из (3) следует, что квадрат модуля упругости Юнга семени кориандра при сжатии при условии упругой деформации, которая протекает с начала действия приложенной силы на измельчаемый материал до достижения предела упругости и сопровождается уплотнением и сжатием структурных агрегатов семян, пропорционален параметру коэффициента Пуассона:

$$E^2 = \frac{0.5625 \cdot P^2}{R_k \cdot \alpha^3} \cdot b_\nu; \quad (4)$$

где $b_\nu = (1 - \nu^2)^2$ – коэффициент пропорциональности, определяемый на прямолинейном участке графика упругой деформации и представляющей собой коэффициент наклона точек деформации семени кориандра этого графика в координатах $\{(0.5625 \cdot P^2) / (R_k \cdot \alpha^3) - \alpha\}$.

Результаты исследования и их обсуждение. Рассмотрим экспериментальные данные, обработанные с учетом вышесказанного, для определения модуля упругости Юнга семени кориандра при сжатии на структуромере СТ-2 (Таблица 1). Представленные в таблице данные сгруппированы по участкам фаз деформации при сжатии семени кориандра на структуромере СТ 2. Экспериментальные точки упругой деформации отмечены на графике (Рис.) символом (○), а экспериментальные точки пластической деформации символом (Δ). Как видно из представленных данных (Таблица 1) и (Рис.), построение деформационных зависимостей в осях $\{(0.5625 \cdot P^2) / (R_k \cdot \alpha^3) - \alpha\}$ позволяет надежно классифицировать фазы деформации семени кориандра при сжатии на структуромере СТ 2.

Для определения (E) – модуля упругости Юнга семени кориандра при сжатии используем коэффициент пропорциональности $b_\nu = (1 - \nu^2)^2$, определяемый на прямолинейном участке графика упругой деформации. В этом случае модуль упругости Юнга семени кориандра может быть рассчитан по точкам прямой линии упругой деформации по следующей формуле:

$$E = \sqrt{\frac{\frac{0.5625 \cdot (3.835\text{Н})^2}{R} - \frac{0.5625 \cdot (1.682\text{Н})^2}{R}}{0,00038\text{м} - 0,00015\text{м}}} = 9.3 \text{ МПа}; \quad (5)$$

Определив значение модуля упругости Юнга семени кориандра по формуле (5) и подставив полученное значение в уравнение (2), можно рассчитать коэффициент Пуассона семени кориандра, выразив в яв-

ном виде параметр (ν). Как видно из (2), решению данного уравнения будет соответствовать четыре корня, которые дают полный перечень значений, удовлетворяющих этому уравнению. Для рассмотренного экспериментального материала значения этого множества корней соответственно дают следующие величины: $\nu \equiv \{(1.241); (-1.241); (-0.678); (0.678)\}$. Так как коэффициент Пуассона характеризует отношение поперечной деформации к продольной и является одной из упругих констант материала из вышеперечисленных корней, удовлетворяющих решению данного уравнения (2), относительно параметра (ν), единственным корнем, имеющим

физический смысл, является последний, определяемый по формуле:

$$\nu = \sqrt{2.223 \times 10^{-10} \frac{4.5 \times 10^9 \cdot P_0 - 6 \times 10^9 \cdot E \cdot \sqrt{R} \cdot \sqrt{\alpha_0^3}}{P_0}} = 0.678; \quad (6)$$

где $P_0 = 1.168$ Н – начальное значение силы сжатия индентора анализатора текстуры структурометра СТ-2; $\alpha_0 = 0.00015$ – начальное сближение индентора м. Учитывая значительные порядки множителей, входящих в формулу (6), более удобно использовать приближенную формулу:

$$\nu = 0.879 \cdot \sqrt{\frac{P_0 - E \cdot \sqrt{R} \cdot \sqrt{\alpha_0^3}}{P_0}} = 0.678; \quad (7)$$

Таблица 1. Экспериментальные данные процесса измельчения семени кориандра при сжатии на структурометре СТ 2 (радиус семени $R \approx 1.5$ мм)

Table 1. Experimental data on the process of grinding coriander seeds under compression on the СТ 2 structure meter (seed radius is $R \approx 1.5$ mm)

α	P	$(0.5625 \cdot P^2) / (R \cdot \alpha^3)$		Фазы деформации
0,00015	1,68184	290,45		упругая деформация \circ
0,00038	3,83538	98,19		
0,00063	6,12131		56,737	пластическая деформация Δ
0,00091	7,62761		28,859	
0,00119	4,8337		5,148	
0,00144	2,78313		0,975	разрушение материала
0,00168	2,52129		0,500	
0,00197	9,95963		4,888	
0,00205	12,7839		7,114	
м	Н	МПа ²		размерности

Таким образом последовательное использование формул (5) и (7) позволяет надежно определять как коэффициент Пуассона, так и модуль упругости Юнга семени кориандра. Для проверки полученных значений коэффициента Пуассона и модуль упругости Юнга семени кориандра используем формулу (2) с найденными значениями:

$$\alpha = 0.8255 \cdot \sqrt[3]{\frac{(1.682 \text{ Н})^2}{0.0015 \text{ м}} \cdot \frac{(1 - 0.168^2)^2}{(9.3 \text{ МПа})^2}} = 0.00015 \text{ м.} \quad (8)$$

Из (8) следует, что найденное значение сближения индентора на участке упругой деформации практически описывается уравнением (2) с использованием найденных параметров коэффициента Пуассона, равного 0.168 м/м, и модуля упругости Юнга, равного 9.3 МПа. Полученные значения имеют порядок величин, близких к аналогичным исследованиям при определении коэффициента Пуассона и модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы [7]. В работах [8] и [9], связанных

с технологией измельчения и обрушивания, был определен модуль упругости Юнга семян подсолнечника, и величина этого параметра также близка к найденным в данной работе значениям. Экспериментально определенные [10] значения модуля упругости и предела прочности зерна сои по сортам при влажности 6,5% изменяются от 12 МПа до 28 МПа, и с увеличением влажности уменьшается в 1,5...2 раза. Эти

литературные данные показывают, что как коэффициент Пуассона, так и модуль упругости Юнга семени кориандра, определенные в данной работе, могут быть использованы для расчета силового воздействия и определения зависимости между прочностью семян кориандра и действующими на него усилиями и возникающими в нем деформациями в процессах селективной дезинтеграции.

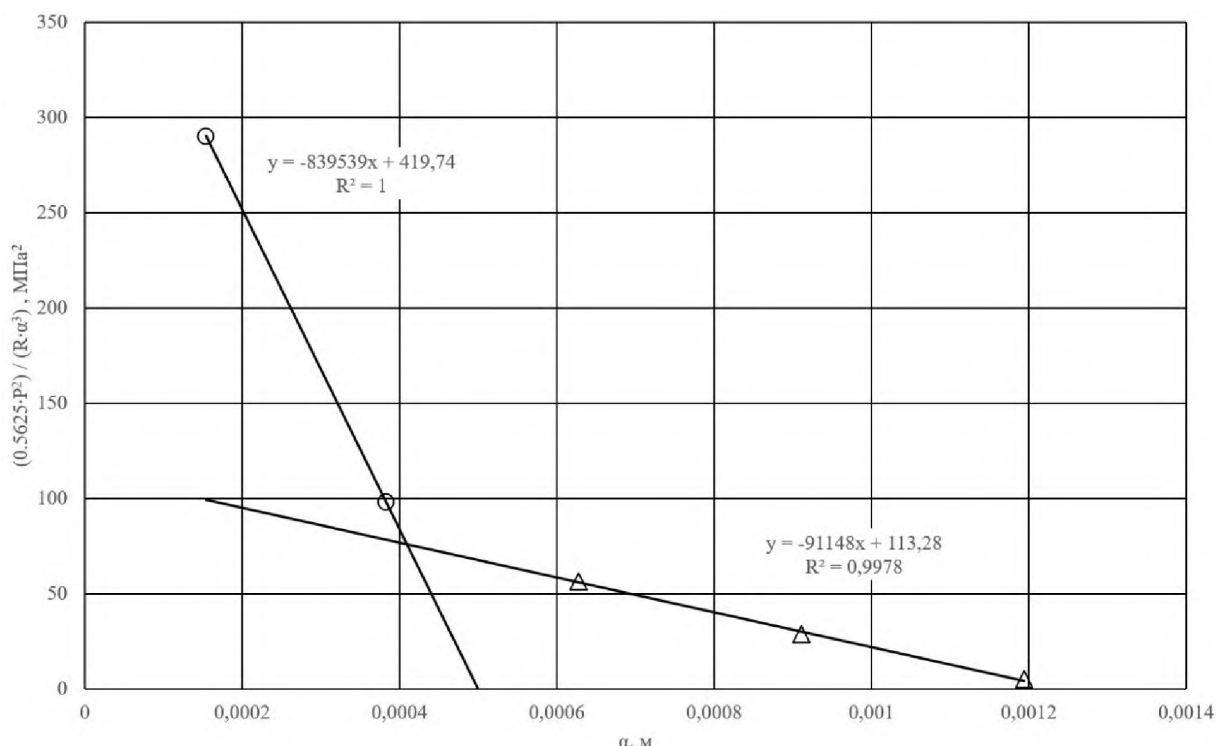


Рис. 1. Фазы деформации при сжатии семени кориандра на структурометре СТ 2
Fig. 1. Deformation phases during compression of coriander seed on the ST 2 structurometer

Выводы.

1. Для более полного прикладного применения контактной задачи теории упругости Г. Герца при моделировании процессов селективной дезинтеграции кориандра необходимо знание коэффициента Пуассона и модуля Юнга семян кориандра.
2. Коэффициент Пуассона в среднем составляет 0,678 для упругой деформации участка сдавливания кориандра.

3. Модуль Юнга для упругой деформации участка сдавливания кориандра равен 9,3 МПа.
4. Полученные численные значения данных механико-технологических характеристик могут быть использованы при моделировании деформационных процессов, регламентирующих скоростные режимы селективной дезинтеграции семенной массы кориандра.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no conflict of interests

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаззо А.А., Гюлушанян А.П., Мхитарьянц Л.А. Современное состояние техники и технологии переработки семян подсолнечника современной селекцией. *Новые технологии*. 2011; 4: 110-114.
2. Антипов С.Т., Кретов И.Т., Остриков А.Н. и др. Машины и аппараты пищевых производств: в 2-х кн. Кн. 1: учебник для вузов / под ред. акад В.А. Панфилова. М.: Высш. шк.; 2001.
3. Хусид С.Д. Измельчение зерна (теоретические основы и практика) –М.: Хлебоиздат. 1958. 450 с.: ил.
4. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муземнек Ю.А. Дробилки: конструкция и расчет, особенности эксплуатации. М.: Машиностроение; 1990.
5. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости / пер. с англ. М.: Наука; 1975.
6. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. Думка; 1988.
7. Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф. и др. Определение коэффициента Пуассона и модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022; 16(3): 20-26.
8. Лобанов В.Г., Шаззо А.Ю. Прогнозирование изменения технологического качества семян подсолнечника в процессе обрушивания и измельчения. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 1999; 2/3(249/250): 62-65.
9. Мякинков А.Г. Прогнозирование изменения технологического качества семян подсолнечника в процессе обрушивания и измельчения. *Пищевая и перерабатывающая промышленность*. 2000; 3: 1105.
10. Присяжная И.М., Присяжная С.П. Моделирование процесса силового воздействия рабочих органов молотильных устройств комбайна на зерно сои. *Агронаука*. 2023; 1(2): 134-142. <https://doi.org/10.24412/2949-2211-2023-1-2-134-142>.

REFERENCES

1. Shazzo A.A., Gyulushanyan A.P., Mkhitaryants L.A. Current state of technology and equipment for processing sunflower seeds of modern selection. *New technologies*. 2011; 4: 110-114. (In Russ.).
2. Antipov S.T., Kretov I.T., Ostrikov A.N. et al. Machines and equipment for food production. In 2 books. Book 1: textbook for universities. M.: Higher. School; 2001. (In Russ.).
3. Khusid S.D. Grinding grain (theoretical foundations and practice). M.: Bread Publishing House; 1958 (In Russ.).
4. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. Crushers: design and calculation, operating features. *Mechanical Engineering*, Moscow; 1990. (In Russ.)
5. Timoshenko S.P., Goodyer J. Theory of elasticity. translated from English, Main editorial board of physical and mathematical literature of the Nauka publishing house; 1975. (In Russ.).
6. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveyev V.V. Handbook of strength of materials. 2nd ed., revised and add. Kiev: Nauk. Dumka; 1988. (In Russ.)

7. Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Volvak S.F., Dobritsky A.A. Determination of Poisson's ratio and Young's modulus of the outer fruit shell of corn grain. *Agricultural machinery and technology*. 2022; 16(3): 20-26. (In Russ.).

8. Lobanov V.G., Shazzo A.Yu. Forecasting changes in the technological quality of sunflower seeds in the process of hulling and grinding. *News of higher educational institutions. Food technology*. 1999; 2/3(249/250): 62-65. (In Russ.).

9. Myakinkov A.G. Forecasting changes in the technological quality of sunflower seeds in the process of hulling and grinding. *Food and processing industry. Abstract journal*. 2000; 3: 1105. (In Russ.).

10. Prisyazhnaya I.M., Prisyazhnaya S.P. Modeling the process of force action of the working bodies of the combine threshing devices on soybean grain. *Agroscience*. 2023; 1(2): 134-142. <https://doi.org/10.24412/2949-2211-2023-1-2-134-142>. (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, e-mail: 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, e-mail: 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, e-mail: zaug-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

Nadezhda V. Sterekhova, Postgraduate student, Senior lecturer, the Department of Construction and General Professional Disciplines, Maikop State Technological University; 385000, the Russian Federation, Maikop, 191 Pervomayskaya St., e-mail: nadia1982m@mail.ru

Susana Y. Gonezhuk, Postgraduate student, Senior lecturer, the Department of Construction and General Professional Disciplines, Maikop State Technological University; 385000, the Russian Federation, Maikop, 191 Pervomayskaya St., e-mail: gonezhuk.79@mail.ru

Zaur A. Meretukov, Dr Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Construction and General Professional Disciplines, Maikop State Technological University;

385000, the Russian Federation, Maikop, 191 Pervomayskaya St., e-mail: zaur-meretukov@yandex.ru

Mikhail V. Sherbakov, Postgraduate student, Maikop State Technological University; 385000, the Russian Federation, Maikop, 191 Pervomayskaya St.

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 co-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 02.07.2024

Поступила после рецензирования 31.07.2024

Принята к публикации 05.08.2024

Received 02.07.2024

Revised 31.07.2024

Accepted 05.08.2024