

УДК 664.8
ББК 36.91
К-71

Косова Наталья Викторовна, преподаватель отделения машиностроения Майкопского государственного гуманитарно-технического колледжа ФГБОУ ВПО «Адыгейский государственный университет», e-mail: natalya.kosova.72@mail.ru;

Меретуков Заур Айдамирович, доктор технических наук, доцент кафедры «Технологии, машин и оборудования пищевых производств» ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет», e-mail: zamer@radnet.ru;

Кошевой Евгений Пантелеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств», ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», e-mail: Koshevoi@kubstu.ru.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ
РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ И МЕТОДИКА ИХ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**
(рецензирована)

Целью работы является представление теоретических основ определения прочностных свойств растительного материала и освещение методики их экспериментального исследования.

Ключевые слова: прочностные свойства, растительное сырье, сжатие, измельчение.

Kosova Natalia Victorovna, a lecturer of the Engineering Department of Maikop State Humanitarian- Technical College of FSBEI HPE «Adygh State University», e-mail: natalya.kosova.72@mail.ru;

Meretukov Zaur Aydamirovich, Doctor of Technical Sciences, associate professor of the Department of Technology, Machines and Equipment of Food Production of FSBEI HPE «Maikop State Technological University», e-mail: zamer@radnet.ru;

Koshevoy Eugeniï Panteleevich, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Machinery and Equipment for Food Production of FSBEI HPE «Kuban State University of Technology», e-mail: Koshevoi@kubstu.ru.

**THEORETICAL BASIS OF DETERMINING STRENGTH PROPERTIES
OF PLANT MATERIAL AND METHODS OF THEIR PILOT STUDY**
(reviewed)

The aim of the work is to present the theoretical foundations of determining the strength properties of the plant material and highlighting techniques of their experimental study.

Keywords: mechanical properties, plant raw materials, compression, crushing.

Измельчение частиц растительного материала важная технологическая операция при производстве пищевых продуктов с добавками пряностей [1]. В ходе измельчения необходимо получить требуемую степень измельчения с соответствующими затратами энергии и не допустить перегрева получаемого измельченного продукта. Для обеспечения указанных требований необходимы знания по прочностным свойствам измельчаемых растительных материалов.

На рисунке 1 показаны теоретические представления [2] силового взаимодействия измельчаемой частицы и пуансона при сжатии в течение упругой деформации (рис. 1а) и упруго-пластичной деформации (рис. 1б).

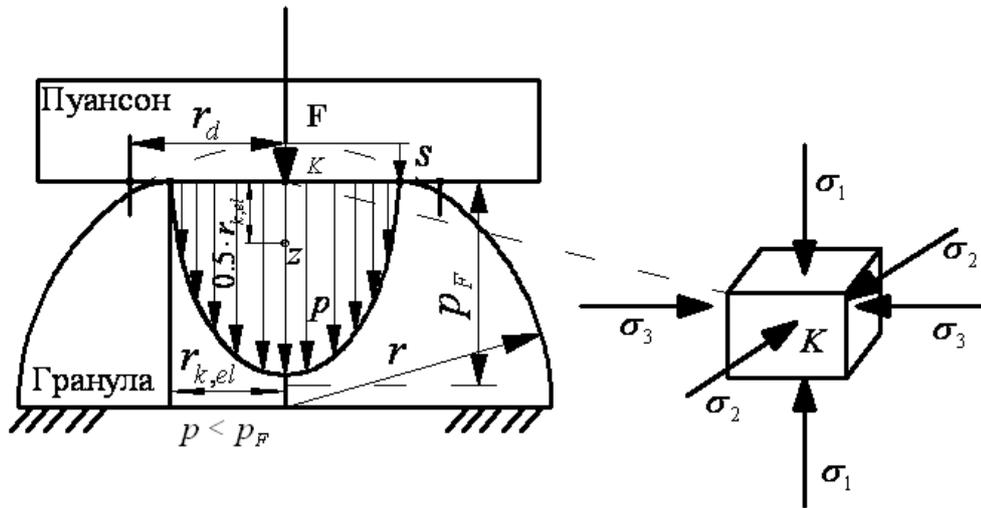


Рис. 1а. Характеристики входа частицы в контакт с пуансоном, создающим давление $p(r_k)$ при упругой деформации

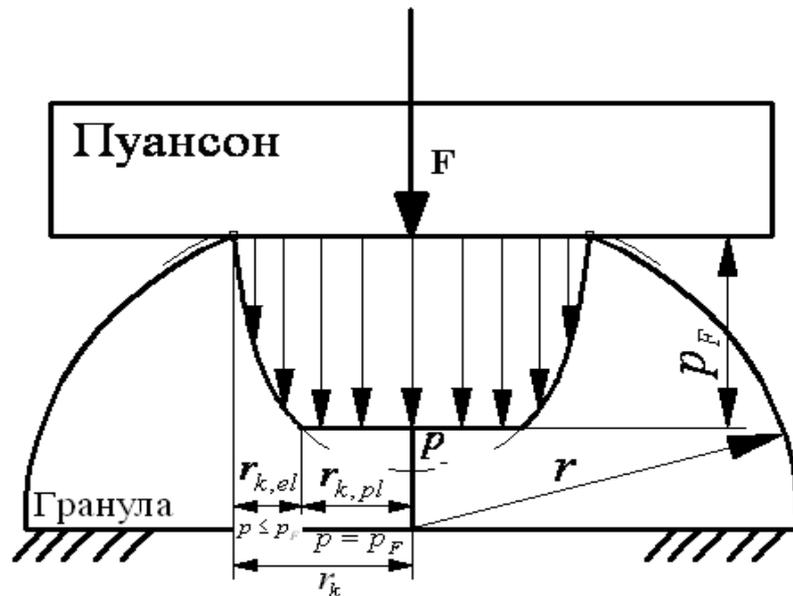


Рис. 1б. Характеристики входа частицы в контакт с пуансоном, создающим давление $p(r_k)$ при упруго-пластичной деформации

В ходе сжатия деформируемой сферической частицы с твердым пуансоном (плоская поверхность), область контакта между ними представляет круг с радиусом r_k . Радиус контакта и внутреннее распределение давления p зависят от радиуса гранулы r и жесткости двух контактирующих материалов.

Рассмотрим область упругой деформации контакта. В этом случае, круглая область контакта радиуса $r_{k,el}$ существует с эллипсоидальным распределением давления $p(r_k)$, и в работе [3] найдено, что максимальное давление контакта в центре контакта на глубине, показанной точкой K на рис. 1а, определено зависимостью:

$$P_{\max} = \frac{3F_{el}}{2\pi r_{k,el}^2} \quad (1)$$

Все три основных напряжения в точке K являются сжимающими, действуют как давление, создают приблизительно изостатическое состояние напряжения и даются согласно [4].

$$\sigma_1 = -p_{\max}, \sigma_2 = \sigma_3 \approx 0.8\sigma_1 \quad (2)$$

Максимальное давление p_{\max} находится ниже пластического напряжения p_F силы сжатия. Как следствие, в этом состоянии трещины не наблюдаются. Максимальное напряжение растяжения $\sigma_{t,\max}$ возникает на периметре контакта и может быть рассчитано [5] по уравнению

$$\sigma_{t,\max} = -\frac{1-2\nu_1}{3} p_{\max} \quad (3)$$

Для частицы с числом Пуассона $\nu_1 = 0.28$, $\sigma_{t,\max} = -0.15 p_{\max}$ (напряженность и сжатие показывают отрицательный и положительный знак соответственно).

Максимум напряжения сдвига на основной оси, имеет место на глубине $KZ \approx 0.5 r_{k,el}$ (точка Z на рис. 1а). Основные напряжения в этой точке даются уравнениями

$$\sigma_1 = \sigma_2 = -0.18 p_{\max}, \sigma_3 = -0.8 p_{\max} \quad (4)$$

Напряжение сдвига

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = 0.31 p_{\max} \quad (5)$$

является большим, чем максимальное напряжение растяжения (3), и ответственно за образование трещин, особенно для пластичных материалов.

Радиус упругого контакта дается [6]:

$$r_{k,el}^3 = \frac{3rF_{el}}{2E^*} \quad (6)$$

Из-за изгиба периметра непосредственно вне круга контакта, радиус деформированной площади является большим, чем радиус контакта: $r_d > r_{k,el}$ рис. 1 [7].

Эффективный модуль упругости E^* и частицы 1 и пуансона 2 (рис. 1) ($E_2 \gg E_1$, $E_2 \rightarrow \infty$) дается как:

$$E^* = 2 \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \approx \frac{2}{1-\nu_1^2} E_1 \quad (7)$$

Эффективный модуль сдвига $G_i = E_i / (2(1 + \nu_i))$ дается:

$$G^* = 4 \left(\frac{1-\nu_1}{G_1} + \frac{1-\nu_2}{G_2} \right)^{-1} \approx \frac{4}{1-\nu_1} G_1 \quad (8)$$

Отношение между упругой силой контакта и деформацией нелинейно как установлено Герцем [3]:

$$F_{el} = \frac{2}{3} E^* \sqrt{\frac{d}{2}} s^3 \quad (9)$$

Соответственно жесткость контакта в нормальном направлении увеличивается с увеличением деформации и диаметра частицы [6]:

$$k_{N,el} = \frac{dF_{el}}{ds} = E^* \sqrt{\frac{d}{2}} s = \left(\frac{F_{el} d}{4D^2} \right)^{1/3} \quad (10)$$

Постоянная упругости определяет здесь согласие контакта обоих материалов [7]:

$$D = \frac{3}{4} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \approx \frac{3(1-\nu_1^2)}{4E_1} \quad (11)$$

Для материалов упруго-пластичного поведения, упругая деформация имеет место на границе, где давление является меньшим и пластичная деформация ближе к центру контакта (рис. 1б). Жесткость пропорциональна радиусу r гранулы и силы p_F (напряжение в начале пластического уступа) [9].

$$k_{N,el-pl} = \frac{dF_{el-pl}}{ds} = \pi p_F \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \frac{A_{pl}}{A_K} \right) = \pi p_F \left(1 - \frac{1}{3} \sqrt[3]{\frac{s_F}{2s}} \right) \quad (12)$$

Отношение пластично деформированной области контакта A_{pl} к полной площади деформации контакта $A_K = A_{pl} + A_{el}$ может использоваться, чтобы определить упруго-пластичную деформацию и лежит между 0 и 1. Для упругой деформации это отношение 0, а для пластичной деформации – 1

С учетом уравнения (12) сила контакта может быть рассчитана по соотношению:

$$F_{el-pl} = \pi p_F \left(1 - \frac{1}{3} \sqrt[3]{\frac{s_F}{2s}} \right) s \quad (13)$$

где, s_F – деформация контакта в точке перехода упругой к упруго-пластичной деформации. Кроме того, в этой точке действительно соотношение $p_{el}=p_{max}=p_F$.

В области пластичной деформации радиус круга контакта определяется по соотношению:

$$F_{el-pl} = \pi p_F \left(1 - \frac{1}{3} \sqrt[3]{\frac{s_F}{2s}} \right) s \quad (13)$$

$$r_K^2 \approx r^2 - (r - s)^2 \approx 2rs \quad (14)$$

Зависимость между силой и пластичной деформацией следующая [8]:

$$F_{pl} = p_F A_K = \pi r_K^2 p_F = \pi ds p_F \quad (15)$$

Жесткость контакта постоянна для материала в состоянии пластичности:

$$k_{N,pl} = \frac{dF_{pl}}{ds} = \pi dp_F \quad (16)$$

Изучение механических свойств растительных материалов, определение величины прочности на сжатие имеет большое значение при конструировании машин для измельчения. Чтобы измельчить материал и разрушить его структуру необходимо приложить определенные силы извне.

Сопrotивление материала действию внешних сил определяется химическим составом и структурой веществ, входящих в состав материала, поэтому деформации его является суммой деформаций разных частей структуры. В состав общей деформации входят одновременно как упругие, так и пластические деформации, относящиеся в каждый данный момент к разным частям структуры. Для отдельных частей при данной внешней силе может быть превзойден предел прочности, и они разрушаются.

Сопrotивление материала действию разрушающих сил при измельчении связано со структурой клетчатого скелета и содержимого клетки.

Установка для снятия первичной диаграммы сжатия (рис. 2) состоит из разрушающего устройства 1, которое представляет собой пуансон 2 и матрицу 3, установленные на подвижной каретке, которая перемещается при помощи винта – электродвигателя 5 через редуктор 6 и ременную передачу 7. Винт 4 перемещает каретку 8 вверх и вниз, благодаря соответствующему переключению рукоятки 9, связанной с муфтой переключения и реверсивной конической передачей.

В данной установке пуансон подвижный, а матрица – неподвижная. Пуансон 2 нагружается через матрицу соответствующим весом (грузом 10, подвешенным на стрелке 11 и связанным с матрицей 3 через цепочку 12). Величина нагружаемого груза (сила веса) нанесена на шкале 13 в делениях, соответственно указываемых стрелкой 11.

Показания стрелки соответствует определенной нагрузке, определяемой по гради ровочной кривой (рис. 3).

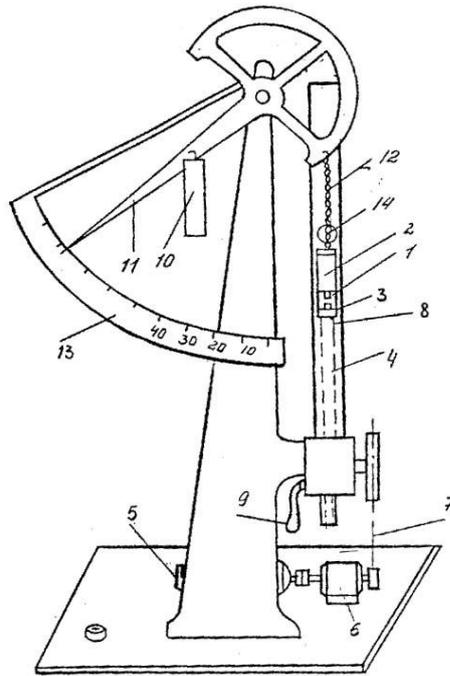


Рис. 2. Установка для снятия первичной диаграммы сжатия

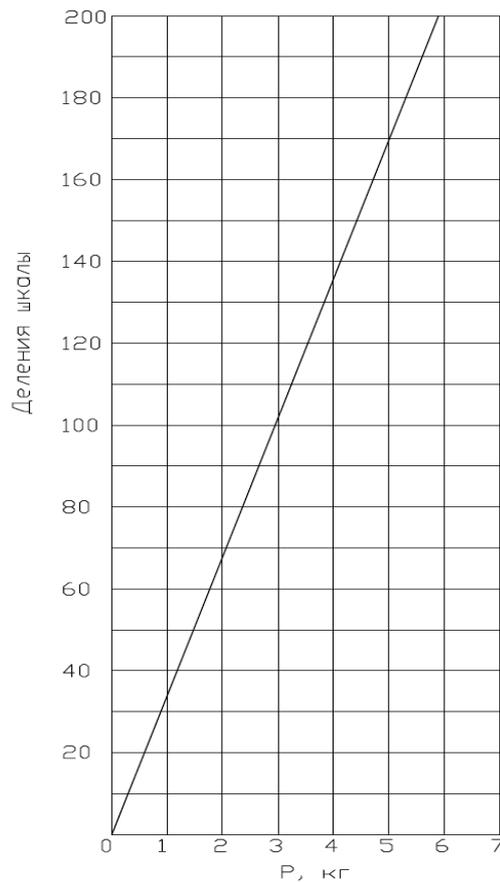


Рис. 3. Градуировочная зависимость

При нижнем положении рычага – рукоятки 9 раздавливающее устройство перемещается вниз и пуансоном через матрицу нагружается соответствующим грузом (весом). При верхнем положении рычага-рукоятки каретка раздавливающего устройства идет вверх и нагрузка снимается. Замер первоначальной толщины частицы и его последующую деформацию отмечают по индикатору 14 с ценой деления 0.01 мм.

Литература:

1. Косова Н.В., Меретуков З.А., Кошевой Е.П. Перспективный способ эффективной технологии переработки пряного растительного сырья криогенным измельчением // Новые технологии. 2013 (в печати).
2. Antonyuk S., Tomas J., Heinrich S., Morl L. Breakage Behaviour of Granulates by Compression. 16th International Congress of Chemical and Process Engineering 22-26 August 2004. Prague, Czech Republic.
3. Hertz H. Uber die Beruhrung fester elastischer Korper, J. reine u. angew. Math. 1882, 92, 156-171.
4. Schubert H. Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Bd. 1, Weinheim: Wiley-VCHVerlag, 2003.
5. Huber M.T. Zur Theorie der Berihrung fester elastischer Korper. Annal. Physik (1904), 14, 153-163.
6. Tomas J. Zur Mechanik trockener kohasiver Schuttguter. Schuttgut (2002) 8, 6, 522-537.
7. Fischer-Cripps A. C. Introduction to Contact Mechanics. Springer, 2000.
8. Lurje A.I. Raumliche Probleme der Elastizitatstheorie. Berlin: Akademie-Verlag, 1963.
9. Tomas J. Particle Adhesion Fundamentals and Bulk Powder Consolidation, KONA - Powder and Particle 2000, 18, 157-169.

References:

1. Kosova N.V., Meretukov Z.A., Koshevoy E.P. A promising method of efficiently processing technology of spicy plant material by cryogrinding // New technologies (in press).
2. Antonyuk S., Tomas J., Heinrich S., Morl L. Breakage Behavior of Granulates by Compression. 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, 22-26 August 2004. Prague, Czech Republic.
3. Hertz H., Uber die Beruhrung fester elastischer Korper, J. Reine, U. Angew. Math., 1882, 92, 156-171.
4. Schubert H., Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Bd. 1, Weinheim: Wiley-VCHVerlag, 2003.
5. Huber M.T., Zur Theorie der Berihrung fester elastischer Korper. Annal. Physik (1904), 14, 153-163.
6. Tomas J., Zur Mechanik trockener kohasiver Schuttguter, Schuttgut (2002), 8, 6, 522-537.
7. Fischer-Cripps A. C., Introduction to Contact Mechanics. Springer, 2000.
8. Lurje A.I., Raumliche Probleme der Elastizitatstheorie. Berlin: Akademie-Verlag, 1963.
9. Tomas J., Particle Adhesion Fundamentals and Bulk Powder Consolidation. KONA-Powder and Particle 2000, 18. P. 157-169.