

Экспериментальные исследования

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ МЕМБРАН

Л.У. ХАРИСЛАМОВА, аспирант

С.Н. ЯКУПОВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник

ИММ КазНЦ РАН,

420141, Казань, Фучика, 58-88, lejsanh@yandex.ru

Приводится обзор экспериментальных методов изучения механических свойств различных биологических объектов (биологических тканей). Механические свойства используются для оценки и контроля качества сельскохозяйственной продукции. В частности, экспериментальные данные необходимы для совершенствования оборудования для сбора урожая, для разработки эффективных методов транспортировки и упаковки урожая. Развита двумерный экспериментальный метод определения механических характеристик экзкарпия (кожица) яблока. Рассмотрен пример.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: механические свойства, прочность, экспериментальные методы, биологические мембраны, инденторный метод, экспериментально-теоретический метод.

Тонкие структуры (пленки, мембраны и покрытия) больших размеров легко встретить в природных конструкциях: кожура различных овощей и фруктов – все это тонкие структуры, несущие, в частности, защитные функции плодов. Представляет научно - практический интерес исследование механических свойств биологических мембран.

Механические свойства могут быть выбраны для оценки и контроля качества сельскохозяйственной продукции. Известны различные опыты с растениями и плодами, направленные на определение их механических характеристик. В частности, определяют кривую «нагрузки - деформации» и далее вычисляют жесткость, модуль упругости, прочность, максимальное и минимальное напряжения при различных уровнях деформаций. Суть таких экспериментов во многом сводится к нахождению различий между свойствами различных сортов и влиянию условий хранения, в частности, температуры. Результаты подобных опытов интересны, в частности, при транспортировке и хранении плодов. Известны экспериментальные исследования механических характеристик биологических мембран на искусственных аналогах [1] – бислойных липидных мембранах. Искусственные мембранные системы имеют относительно большие размеры, что облегчает задачу определения их упругих свойств – способность деформироваться под воздействием нагрузки. При этом при определении механических свойств в качестве сжимающей силы используют электрическую разность потенциалов (явление электрострикции) [1]. В работах [2-5] для исследований деформаций клеточных мембран в процессе нагружения используется оптический микроскоп. Также в экспериментальных работах часто используется разрывная машина Instron [6].

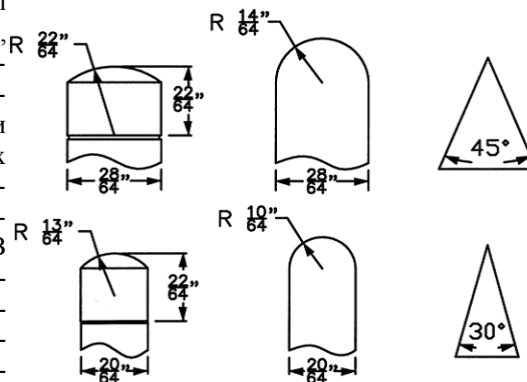


Рис. 1. Насадки

Известен способ определения прочности мякоти и кожуры на прокол [7]. Такие испытания проводятся при помощи пенетromетра Магнесса-Тейлора и различных его модификаций. В министерстве сельского хозяйства США для оценки зрелости или для послеплодочной оценки качества плодов при хранении используются данные измерений твердости большого числа фруктов и овощей. Известны вариации пенетromетра Магнесса-Тейлора (МТ) [7], которые отличаются по геометрическим параметрам при-

боров и способу использования (ручной или механический), а также наличию цифрового дисплея. Для плодов различных размеров используются различные насадки (иглы) (рис. 1 по [7]).

В работе [8] приводится сравнительный анализ результатов исследований механических свойств яблок, персиков и нектаринов, полученных ручным пенетрометром (рис.2) с данными, полученными путем «протыкания» на разрывной машине Instron. Отличия между результатами объясняются человеческим фактором.

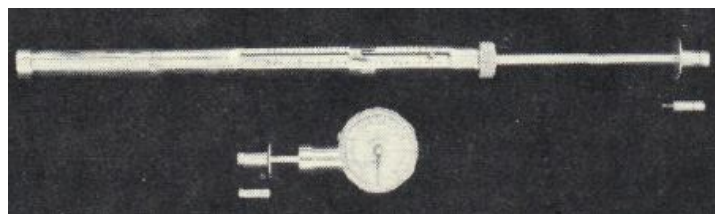


Рис. 2. Пенетрометр Магнесса-Тейлора (сверху), пенетрометр Эффиджи

Применение разрывной машины при определении прочности мякоти кожуры на прокол позволяет варьировать насадки и скорость нагружения. R.L. Thompson с соавторами [9] в 1982 году исследовали путем «протыкания» характеристики образцов, вырезанных из огурца. Авторы определяли твердость мезокарпия и эндокарпия (область возле семян) плода. При проведении опыта учитывался диаметр, сорт и условия хранения. Для проведения эксперимента из разных частей огурца были вырезаны кружочки толщиной 0,48 см (рис.3).

Использовались инденторы цилиндрической формы с плоским концом и диаметром: 0,200, 0,625, 0,315, 0,475 см. Индентором протыкался образец в ряде точек (рис.4). Схема экспериментальной установки приведена на рис.5.

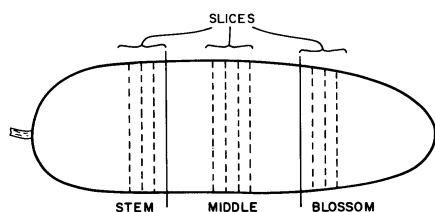


Рис. 3. Схема вырезания образцов огурца по [9]

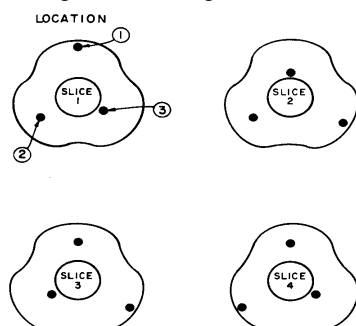


Рис. 4. Схема точек проколов по [9]

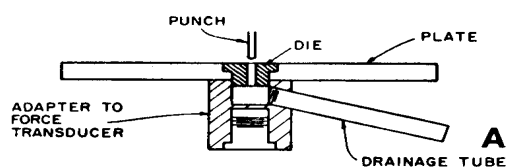


Рис. 5. Схема установки по [9]

Было установлено [9], что мезокарпий и эндокарпий прочнее в части огурца, которая ближе к стеблю (stem на рис.3), чем в части, в которой был цветок (blossom на рис. 3). И для мезокарпия, и для эндокарпия показатели нагрузок снижались в зависимости от диаметра огурца.

На базе оснастки по [9] R.L. Thompson с соавторами в 1992 году исследовали твердость мезокарпия и экзокарпия (кожуры) огурца (рис. 6) [10]. Метод был опробован также на грушах, яблоках, баклажанах, перце, цуккини и авокадо. Диаметр индентора варьировался от 2 до 6,35 мм; был выбран в качестве наиболее оптимального диаметр индентора 3,15мм. Исследования проводились при различных скоростях нагружения. Благодаря выбранному методу [10], авторам удалось оценить влияние экзокарпия и выявить силу для протыкания целого овоща.

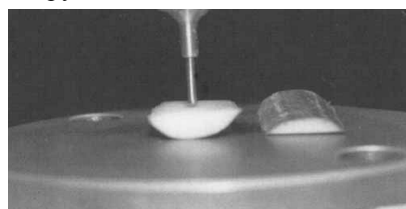


Рис. 6. Фрагмент испытания по [10]

М. Shirmohammadi и P. Yarlagadda в 2012 году выполнили исследования по определению прочности и твердости образцов кожуры тыквы, очищенной и неочищенной мякоти [11]. Была использована машина Instron, позволяющая варьировать скоростью нагружения от 1,25 мм/мин до 20 мм/мин. Авторы использовали сферический индентор диаметром 8 мм. Средняя толщина образцов кожуры составила 5мм, а толщина мякоти и неочищенных образцов 50мм. Авторы построили соответствующие кривые «нагрузки-деформации».

Для определения прочности кожуры плода используют также метод точечного давления (прокола). Такой метод использовался М. Grottea, F. Duprata и др. [12,13] для определения прочности, твердости, деформации и разрушающей нагрузки кожуры и мякоти яблок. Были проведены исследования для оценки изменений механических характеристик мякоти и кожуры яблок сорта Golden Delicious, хранящихся при температуре 2°C и относительной влажности 96%, а также дозревающих при комнатной температуре 20±1°C. Для сравнения механических свойств, авторами были проведены дополнительные эксперименты после 210 дней холодильного хранения четырех сортов яблок: Fuji, Golden Delicious, Granny Smith, Pink Lady одного урожая и приблизительно одного размера (диаметром около 70мм). Были найдены различия между сортами в общей прочности плода и прочности кожуры. Экспериментальные измерения проведены с использованием internal PC card (Dupratetal, 1995). В шести точках в районе наибольшего обхвата плода действовала сила, приложенная с постоянной скоростью 20 см/мин (рис. 7).

В точках 1', 2' и 3' (рис. 7) была снята кожура (глубина пореза 2мм) при помощи картофелечистки. Разрывная сила для определения характеристик кожуры была определена как разница между определенными во время эксперимента силами в точках цельного плода и точках, где была снята кожура. Тест проводился до погружения инденторов на глубину 10мм. Были построены соответствующие кривые «нагрузки - перемещения».

Метод прокалывания был также использован для определения механических характеристик фрукта киви. Seyed Mohammad Ali Razavi и Maryam Bahram Parvar [14] определяли различные геометрические параметры образцов (длина, толщина, сферичность и т.д.), а также их механические характеристики для того, чтобы в дальнейшем полученные ими данные могли быть использованы для создания более эффективного оборудования для сбора урожая, его обработки и транспортировки.

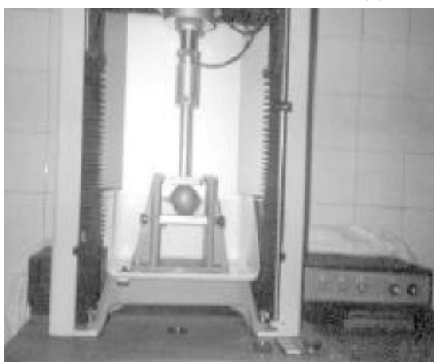


Рис. 8. Эксперимент по [15]

Zhiguo Li, Pingping Li, Jizhan Liu в 2010 году также испытывали целый плод (томат) на сжатие (рис. 9) [16]. Авторы установили, что внутреннее строение томата существенно влияет на его механические характеристики. Авторы исследовали также зависимость характеристик плода от срока их хранения.

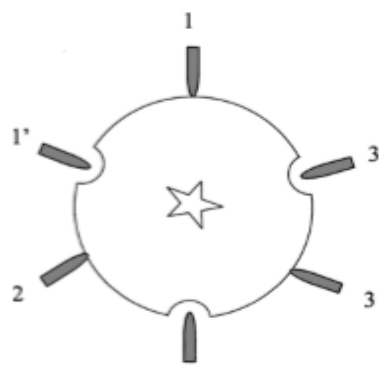


Рис. 7. Схема проколов:
1, 2, 3 – с кожей; 1', 2', 3' – участки со снятой кожей по [12,13]

Еще один способ экспериментального изучения механически-структурных свойств плодов – это тест на сжатие. Подобные опыты выполняются на разрывных машинах. Так, S. Sagsoz и F.N. Alaunt в 2001 году испытывали целую луковицу на сжатие [15]. Образец помещали между двумя плоскими плитами (рис. 8). Скорость приложения силы составила 50мм/мин и 100 мм/мин. Луковицу испытывали, прикладывая нагрузку, до растрескивания. Авторы установили, что скорость нагружения, а также сорт плода значительно влияют на определяемый модуль упругости.

Abbas Gorji Chakespari, Ali Rajabipour, Hossein Mobli в 2010 году испытывали на сжатие вырезанные из яблока образцы [17]. Они пришли к выводу, что различные сорта (эксперименты проводились над сортами яблок Shafiabadi и GolabKohanz) имеют разную прочность и жесткость.

Наряду с испытаниями на сжатие также проводятся и эксперименты на растяжение. Так М.С. Alamar, E. Vanstreels и др. в 2007 году испытывали яблоко на растяжение [18]. Из плода были вырезаны образцы в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами 11 мм x 5 мм x 2 мм. Торцы образцов были приклеены к пластинам, которые в процессе эксперимента расходились в противоположные стороны со скоростью 0,5 мм/мин. Авторы изучали деформацию клеток во время тестов на растяжение и сжатие.

М. Grotte, F. Duprat и др. в 2002 году выполнили экспериментальную работу по определению модуля Юнга, коэффициента Пуассона, а также коэффициента Ляме [19]. Был проведен прокол плодов (яблоки), имитация удара, а также акустический тест. Исходными данными были: плотность (плавучесть), диаметр плода и его масса. Для прокалывания использовался сферический индентор, скорость нагружения – 20 см/мин. Из опыта был найден коэффициент эластичности, вычислена общая прочность плода и мякоти без кожуры. Тест на удар – имитация падения. Падение фрукта на жесткую поверхность дает возможность оценить поглощенную энергию, максимальную ударную нагрузку и максимальную деформацию. Акустический тест состоял в следующем: микрофон помещали около яблока; с другой стороны от фрукта был создан шумовой эффект, в частности, стук. Акустический сигнал, улавливаемый микрофоном, усиливался и записывался осциллографом. Такой опыт дает совокупную оценку устойчивости и коэффициент эластичности пропорциональный модулю Юнга, который вычисляется из частоты, плотности и массы плода. Авторы установили, что модуль Юнга и коэффициент Пуассона понижаются с учетом времени хранения и степени созревания, а коэффициент Пуассона изменяется в процессе созревания. Для обработки данных по динамическим испытаниям авторы использовали модифицированную теорию Герца о столкновении двух упругих тел, модуль упругости вычислялся по формулам Гука в предположении, что наблюдается упругая деформация. Экспериментальные исследования на удар, а также на сжатие были проведены также N.A. Aviara, S.K. Shittu и M.A. Naque [20]. Авторы учитывали сорт плодов, методы их хранения после сбора и содержание влаги.

Среди методов изучения механических характеристик плодов можно также отметить работу Amir H., Afkari Sayyah, Behrooz Esmailpour [21], посвященную построению кривой ползучести. Авторы изучали образцы, вырезанные из яблок (без кожуры), к которым прикладывалась нагрузка в 30Н. Экспериментальные данные записывались каждые 5, 10, ..., 60, 120, 240, 360, 480 и 600 секунд.

Известны работы, в которых проводится сравнение экспериментальных данных с численными результатами. В частности, в работе [22] приводятся сравнение экспериментальных данных механических характеристик кожицы луковицы с численными данными, полученными на программе ANSYS. Численная модель с учетом биологической структуры ткани, показала хорошую сходимость с экспериментальными данными. При этом модель позволяла исследовать большие деформации и нелинейное поведение оболочки.

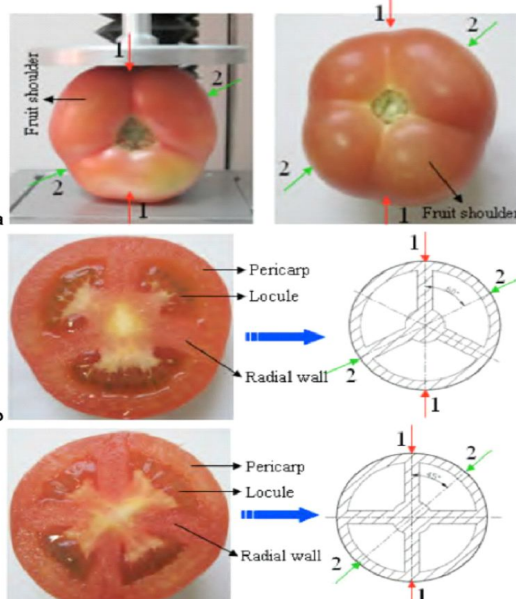


Рис. 9. Экспериментальные схемы: 3-х гнездный и 4-х гнездный томаты по [16]

Авторы данной статьи предлагают для исследования механических характеристик использовать двумерный экспериментально-теоретический метод, который разработан в лаборатории нелинейной механики оболочек ИММ КазНЦ РАН для исследования свойств тонкостенных мембран и пленок [23-26]. В частности, авторами были проведены исследования этим методом кожуры яблок. Образцы испытывались на установке (схема на рис. 10).

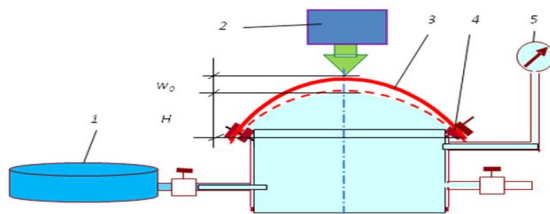


Рис. 10. Схема экспериментальной установки по [23-26]

При испытаниях кожуры яблока использовалась тонкая подложка в виде пищевой пленки. Были получены результаты для 7 образцов. Фрагменты образца на установке и после испытания приведены на рис. 11. Средняя толщина для всех образцов составила 0,3 мм.

По результатам испытаний были построены графики зависимости прогиба образца от давления. Для одного из исследованных образцов зависимость приведена на рис.12. Перемещения от приложенной нагрузки определяли цифровым индикатором ИЦ-50 с точностью 0.001 мм (ГОСТ 577-68), а давление цифровым манометром ДМ-5001 с погрешностью $\pm 1\%$ (ТУ 4212-039-00225590-2003). Выполнена статистическая обработка полученных результатов.

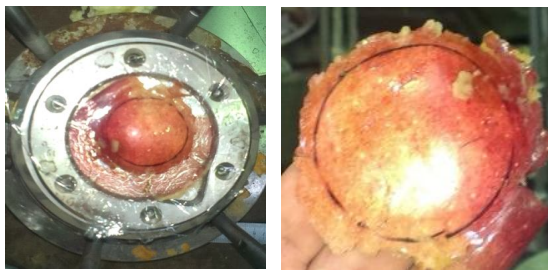


Рис. 11. Фрагменты кожуры яблока: на установке и после испытания

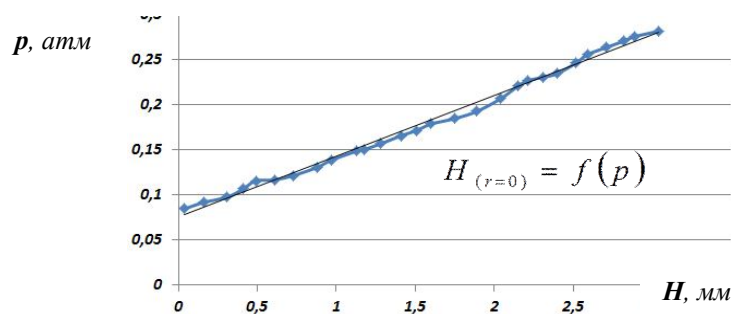


Рис. 12. Зависимость «давление - прогиб» для 5-го образца кожуры яблоки

Заключение:

1. Выполнен обзор известных экспериментальных методов изучения механических свойств биологических структур.
2. Биологические мембраны имеют неплоскую форму и практически отсутствуют работы по исследованию их механических характеристик как оболочечной конструкции.
3. Предложено для исследования механических свойств биологических мембран использовать экспериментально-теоретический метод исследования.
4. Выполнены исследования биологических мембран (кожура яблоки), построен график зависимости прогиба образцов от давления.
5. Установлено, что для рассмотренных мембран наблюдается зависимость, близкая к линейной.

Л и т е р а т у р а

1. Рубин А.Б. Биофизика клеточных процессов. МГУ, 2004. с. 471.
2. Dintwa E., Jancsóka P., Mebatsiona H.K., Verlindena B., Verbovena P., Wang C.X., Thomas C.R., Tijsskens E., Ramona H., Nicolai B. A finite element model for mechanical deformation of single tomato suspension cells // J. of Food Engineering 103, 2011. P. 265-272.
3. Meyers Marc André, Chen Po-Yu, Yu-Min Lin Albert, Seki Yasuaki. Biological materials: Structure and mechanical properties // Progress in Materials Science. Vol.53, Issue 1, January 2008, p. 1-206.
4. Hepworth D. G., Bruce D. M. Measuring the Deformation of Cells within a Piece of Compressed Potato Tuber Tissue // Annals of Botany 86. 2000, p.287-292.
5. RKRTIL Nilsson S., Hellmuth Hertz C., Falk Stig. On the Relation between Turgor Pressure and Tissue Rigidity. Theoretical Calculations on Model Systems // PHYSIOLOGIA PLANTARUM, VOL. 11. 1958 pages 818–837.
6. Dobrzański Bohdan, Rabcewicz Jacek, Rybczyński Rafa. Handling of Apple transport techniques and efficiency vibration, damage and bruising texture , firmness and quality. ALF-GRAF, UL. KOŚCIUSZKI 4, 20-006 Lublin.2006, 234 p.
7. Abbott1 Judith A., Roger Harker F.: www.ba.ars.usda.gov/hb66/021texture.pdf (дата обращения: 10.11.2013).
8. Judith A. Abbott, Alley E. Watada, and David R. Massie. Effe-gi, Magness-Taylor, and Instron Fruit Pressure Testing Devices for Apples, Peaches, and Nectarines // Amer. Soc. Hort. 1976. Sci. 101(6): 698-700.
9. Thompson R.L., Fleming H.P., Hamann D.D., Monroe R.J. Method for determination of firmness in cucumber slices // Journal of Texture Studies, 13 (1982), p. 311-324.
10. Thompson R.L., Fleming H.P., Hamann D.D. Delineation of puncture forces for exocar and mesocarp tissues in cucumber fruit// J. of Texture Studies, 23 (1992), 169-184.
11. Shirmohammadi M., Yarlagadda P. Experimental study on mechanical properties of pumpkin tissue // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 54/1, (2012) 16-24.
12. Grotte M., Duprat F., Loonis D. & Pitri E. Mechanical properties of the skin and the flesh of apples // International Journal of Food Properties, 4:1, 2001, p. 149-16.
13. Duprat F., Grotte M., Loonis D., Pietri E. Simultaneous measurement of apple flesh and apple skin firmness by puncture testing // Sciencies des aliments. 20 (2), 2000, p. 253-263.
14. Seyed Mohammad Ali Razavi, Maryam Bahram Parvar. Some Physical and Mechanical Properties of Kiwifruit // Int. J. of Food Engineering, Vol. 3, Issue 6, Article 3, 2007.
15. Sagsozu S., Alaunt F.N. Comparison of some methods to determine the modulus of elasticity of some onion varieties // Journal of Biological Sciences, 1(9), 2001, p. 798-800.
16. Zhiguo Li, Pingping Li, Jizhan Liu. Effect of tomato internal structure on its mechanical properties and degree of mechanical damage // African Journal of Biotechnology, Vol. 9(12), 22 March, 2010, pp. 1816-1826.
17. Abbas Gorji Chakespary, Ali Rajabipour, Hossein Mobli. Strength Behavior Study of Apples under Compression Loading // Modern Applied Science, Vol. 4, No.7; July 2010.
18. Alamar M.C., Vanstreels E. etc. Micromechanical behaviour of apple tissue in tensile and compression tests: Storage conditions and cultivar effect // Journal of Food Engineering, 86 (2008), p. 324-333.
19. Grotte M., Duprat F. et al. Young's modulus, Poisson's ratio, and Lamé's coefficients of golden delicious apple // Int. Journal of Food Properties. Published online: 06 Feb 2007.
20. Aviara N.A., Shittu S.K., Haque M.A. Physical properties of guna fruits relevant in bulk handling and mechanical processing // Int. Agrophysics, 2007, 21, p. 7-16.
21. Amir H., Afkari Sayyah, Behrooz Esmailpour. Apple firmness measurement based on visco-elastic properties // J. of Food, Agriculture & Environment, Vol.6 (2), 2008, 276-279.
22. Piotr M. Pieczywek, Artur Zdunek. Study on model development of plant tissue using the finite element method // Inside Food Symposium, 9-12 April 2013, Leuven, Belgium.
23. Галимов Н.К., Якунов Н.М., Якунов С.Н. Экспериментально-теоретический метод определения механических характеристик сферических пленок и мембран со сложной структурой // МТТ, №3, 2011, с. 58-66.

24. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н. Методология исследования механических характеристик тонких пленок и нанопленок // Вестник Машиностроения. 2009. №6, с. 44-47.

25. Якупов Н.М., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н. Методика испытания пленок и мембран в условиях равномерного распределенного поверхностного давления // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т.74, №11, с. 54-56.

26. Якупов Н.М., Якупов С.Н. Пленки неоднородной структуры // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009, №1. С.60-70.

METHODS FOR ASSESSING STRENGTH OF BIOLOGICAL MEMBRANES

L.U. Harislamova, S.N. Yakupov

Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences

The article is devoted to a review of the experimental methods for studying the mechanical properties of various biological objects (biological tissues). The mechanical properties are used to evaluate and monitor the quality of agricultural products. In particular, the experimental data will help to improve equipment for harvesting, to develop effective methods of transportation and packing of a crop. Two-dimensional experimental method of determining the mechanical characteristics of exocarp (peel) of apples was devoted. The example was considered.

KEYWORDS: mechanical properties, strength, experimental methods, biological membranes, indentation method, experimental and theoretical method.

