

УДК 621.928:633.521

В. А. Шаршунов¹, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси,
С. В. Курзенков², кандидат технических наук, доцент,
В. А. Левчук², **М. В. Цайц**²

¹Учреждение образования «Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий»,
пр-т Шмидта, 3, 212027 Могилев, Республика Беларусь, 8 (0222) 64 82 27

²Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ул. Мичурина, 5, 213410 Горки,
Республика Беларусь, +375 (25) 906 37 38, baa_bgd@tut.by

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ СЕМЕННОЙ КОРОБОЧКИ ЛЬНА

В статье представлен теоретический анализ деформации семенной коробочки льна при ее поперечном сжатии с учетом возникающих упругих деформаций в ее оболочке. Получены аналитические зависимости для определения величин проекций деформаций точек, лежащих на поверхности семенной коробочки льна при ее сжатии.

Разработана методика, а также проведены экспериментальные исследования по определению величины упругой деформации семенной коробочки льна и характера ее разрушения. Получены данные, определяющие взаимосвязь величины сжатия семенной коробочки льна и значений силы сжатия при этом, для различных диаметров семенных коробочек льна. Определены значения зависимости механического напряжения, возникающего в семенной коробочке от ее относительной деформации. Получены расчетные значения величин модуля Юнга для семенных коробочек различного диаметра. Установлены значения предельной величины сжатия семенной коробочки, определяющей момент ее разрушения.

Ключевые слова: лен; семенная коробочка; деформация; упругое напряжение; модуль Юнга; разрушение семенной коробочки; поперечное сжатие.

Рис. 3. Табл. 1. Библиогр.: 8 назв.

V. A. Sharshunov¹, DSc in Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus,
S. V. Kurzenkov², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
V. A. Levchuk², **M. V. Tsaits**²

¹Educational Institution “Belarusian State University of Food and Chemical Technologies”, 3 Schmidt Ave.,
212027 Mogilev, the Republic of Belarus, 8 (0222) 64 82 27

²Educational Institution “Belarusian State Order of the October Revolution and the Red Banner of Labor Agricultural Academy”, 5 Michurina Str., 213410 Gorki, the Republic of Belarus, +375 (25) 906 37 38, baa_bgd@tut.by

INVESTIGATION OF THE NATURE OF FLAX SEEDPODS DEFORMATION AND DESTRUCTION

The article presents a theoretical analysis of the deformation of the flax seedpod during its transverse compression, taking into account the resulting elastic deformations occurring in its shell. Analytical dependencies to determine the values of projections of points deformations lying on the surface of a flax seed pod during its compression were obtained.

A technique has been developed and experimental studies have been carried out to determine the magnitude of the elastic deformation of the flax seedpod, as well as the nature of its destruction. The data determining the relationship between the compression value of the flax seedpod and the values of the compression force at the same time, for various diameters of the flax seedpods were obtained. The values of the dependence of the mechanical stress arising in the seedpod on its relative deformation are determined. Calculated values of Young's modulus values for seedpods of various diameters have been obtained. The values of the limiting value of compression of the seedpod, determining the moment of its destruction are established.

Key words: flax; seed box; deformation; elastic stress; Young's modulus; destruction of the seedpod; transverse compression.

Fig. 3. Table 1. Ref.: 8 titles.

Введение. основополагающим технологическим процессом получения семян является процесс отделения семенной части урожая льна-долгунца от стеблей, который издавна осуществляется двумя принципиально различными способами: отрывом коробочек льна от стеблей (очес) или разрушением коробочек на стеблях (обмолот) с последующей сепарацией [1].

В разработанном в УО БГСХА обмолачивающем устройстве для линии первичной переработки льна Van Dommele или Depoortere процесс отделения семенной части от стеблей льна происходит за счет комбинированного (очесывающе-плющильного) воздействия эластичного рабочего органа [2—4]. В процессе плющения разработанным обмолачивающим устройством происходит поперечное сжатие семенных коробочек льна и их разрушение с выделением семян [5].

При моделировании деформации формы коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой в процессе обмолота [5] было установлено, что деформация семенной коробочки льна происходит неравномерно, а величина поперечного сжатия не равна продольному расширению. Это связано с упругими свойствами семенной коробочки.

Таким образом, целью работы является определение проекций деформаций точек поверхности семенной коробочки льна при ее сжатии, а также изучение упругих свойств ее материала и характера разрушения.

Материалы и методы исследования. Проанализируем деформацию семенной коробочки льна при ее сжатии на основании изменения проекций вектора деформации. Для этого рассмотрим идеализированную модель, при которой, сжимая коробочку льна на величину Δ_{kz} вдоль вертикальной оси симметрии, ее поверхностные точки осуществляют переход на поверхность некоторого эллипсоида. Будем считать, что такое смещение до разрыва (разрушения) коробочки происходит симметрично располагающихся на ее поверхности поперек вертикальной оси симметрии и при неизменной величине вектора деформации в любой ее точке, т. е.

$$|\vec{\Delta}_i| = \sqrt{\Delta_{xi}^2 + \Delta_{yi}^2 + \Delta_{zi}^2} = \text{const}. \quad (1)$$

Для того чтобы проанализировать пространственные деформации точек семенной коробочки льна при сжатии, представим ее в виде шара с центром в точке $O_k(0; 0; 0)$ и диаметром, равным d_k . Тогда уравнение такого шара примет следующий вид:

$$x^2 + y^2 + z^2 = \frac{d_k^2}{4}. \quad (2)$$

В точку O_k поместим и центр эллипсоида с полуосями: $d_k/2 + \Delta_{kx}/2$ — по оси O_kx ; $d_k/2 + \Delta_{ky}/2$ — по оси O_ky ; $d_k/2 - \Delta_{kz}/2$ по оси O_kz , который представляет собой геометрическую модель деформируемой коробочки. Математическое уравнение такой поверхности будет иметь следующий вид:

$$\frac{x^2}{\left(\frac{d_k + \Delta_{kx}}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{d_k + \Delta_{ky}}{2}\right)^2} + \frac{z^2}{\left(\frac{d_k - \Delta_{kz}}{2}\right)^2} = 1,$$

где Δ_{kx} , Δ_{ky} , Δ_{kz} — величины, характеризующие деформации формы шара в направлениях осей пространственной декартовой системы координат, м.

Ввиду того, что при сжатии семенная коробочка не ограничена с боков, то смещения поверхностных ее точек в направлениях осей O_kx и O_ky плоскости xO_ky на поверхность эллипсоида примем одинаковыми: $\Delta_{kx} = \Delta_{ky}$. При этом уравнение эллипсоида запишется в виде

При этом точка O переходит вертикально вниз на эту же величину $\Delta_{kz} / 2$ на поверхность эллипсоида. Значит точка O семенной коробочки деформируется в точку O' $(0; 0; \Delta_{kz} / 2)$, а вектором деформации является вектор $\overrightarrow{\Delta_o} = \overrightarrow{OO'}$ $(0; 0; \Delta_{kz} / 2)$ с длиной

$$|\overrightarrow{\Delta_o}| = |\overrightarrow{OO'}| = \sqrt{O^2 + O^2 + \left(\frac{\Delta_{kz}}{2}\right)^2} = \frac{\Delta_{kz}}{2}. \quad (4)$$

Определим проекции и вектора деформаций точек семенной коробочки, лежащих на ее поверхности в плоскости $xO_k y$ (см. рисунок 1). Можно заметить, что в данном случае это точки окружности $x^2 + y^2 = (d_k / 2)^2$, которые в плоскости $xO_k y$ переходят в точки сечения оболочки эллипсоида, который представляет собой окружность, заданную уравнением $x^2 + y^2 = \left(\frac{d_k + \Delta_{kx}}{2}\right)^2$. В направлении оси $O_k z$ эти точки перемещений не имеют, т. е. $\Delta_z = 0$.

Для определенности в качестве одной из таких точек можно взять точку B с координатами $(d_k / 2; 0; 0)$ на шаре, которая переходит на эллипсоид в точку B' $(\frac{d_k}{2} + \Delta_{Bx}; \Delta_{By}; 0)$,

где $\frac{\Delta_{Bx}}{2} = \frac{\Delta_{By}}{2}$. Тогда $\Delta_B = \overrightarrow{BB'}$ $(\Delta_{Bx}; \Delta_{Bx} - 0; 0) = (\Delta_{Bx}; \Delta_{Bx}; 0)$.

Тогда с учетом условий (1) и (4) величина вектора деформации в точке B

$$|\overrightarrow{\Delta_B}| = \sqrt{(\Delta_{Bx})^2 + (\Delta_{Bx})^2 + 0^2} = \Delta_{Bx} \sqrt{2}; \quad |\overrightarrow{\Delta_B}| = |\overrightarrow{\Delta_o}| \Rightarrow \Delta_{Bx} \sqrt{2} = \frac{\Delta_{kz}}{2} \Rightarrow \Delta_{Bx} = \Delta_{By} = \frac{\Delta_{kz}}{2\sqrt{2}};$$

$$\cos(\alpha) = \frac{\Delta_{Bx}}{|\overrightarrow{\Delta_B}|} = \frac{\Delta_{Bx}}{\Delta_{Bx} \sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \angle \alpha = 45^\circ; \quad \cos(\beta) = \frac{\Delta_{Bx}}{|\overrightarrow{\Delta_B}|} = \frac{\Delta_{Bx}}{\Delta_{Bx} \sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \angle \beta = 45^\circ;$$

$$\cos(\gamma) = \frac{0}{\Delta_{Bx} \sqrt{2}} = 0 \Rightarrow \angle \gamma = 90^\circ.$$

Можно сделать вывод, что в плоскости $xO_k y$ точки переходят в точки эллипсоида под углом 45° к радиусу точек недеформируемой поверхности (см. рисунок 1, а).

Из этой же схемы (см. рисунок 1, б) можно определить величину Δ_{kx} с точки зрения распространения деформирования. Для этого рассмотрим треугольник $O_k B' B''$. Он является прямоугольным с гипотенузой $O_k B'$ и катетами $B' B''$, $O_k B''$:

$$O_k B' = \frac{d_k + \Delta_{kx}}{2}; \quad B' B'' = \Delta_{Bx}; \quad O_k B'' = \frac{d_k}{2} + \Delta_{Bx}.$$

По теореме Пифагора

$$\left(\frac{d_k + \Delta_{kx}}{2}\right)^2 = \left(\frac{d_k}{2} + \Delta_{Bx}\right)^2 + \Delta_{Bx}^2.$$

Упростим данное выражение:

$$\Delta_{kx} = \frac{-2d_k + 2\sqrt{d_k^2 + 4\Delta_{Bx}(d_k + \Delta_{Bx})}}{2} = -d_k + \sqrt{d_k^2 + 4\Delta_{Bx}(d_k + \Delta_{Bx})}$$

или

$$\Delta_{kx} = -d_k + \sqrt{d_k^2 + \frac{4\Delta_{kz}}{2\sqrt{2}} \left(d_k + \frac{\Delta_{kz}}{2\sqrt{2}}\right)} = -d_k + \sqrt{d_k^2 + \sqrt{2}\Delta_{kz} \left(d_k + \frac{\Delta_{kz}}{2\sqrt{2}}\right)}.$$

Используем полученные результаты для описания проекций вектора деформаций $\overline{\Delta_M}$ в произвольной точке M , взятой на поверхности недеформированной семенной коробочки льна. Для определенности будем считать, что выбранная нами точка находится в первом октанте ($x_M > 0$; $y_M > 0$; $z_M > 0$), а ее координаты в декартовой пространственной системе, соответственно, равны x_M, y_M, z_M .

Нам известно, что все точки на шаре недеформированной поверхности с аппликатой z_M образуют окружность, которая в проекции на плоскость $xO_k y$ будет задаваться уравнением

$$x^2 + y^2 = \frac{d_k^2}{4} - z_M^2.$$

Тогда ордината точки M с ее абсциссой будет связана соотношением

$$y_M = \pm \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - z_M^2 - x_M^2}.$$

В рассматриваемом случае формула (15) примет следующий вид:

$$y_M = \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - z_M^2 - x_M^2}.$$

Предположим, что при деформации $\Delta_{kz} / 2$, которую коробочка испытывает в ее верхней точке O и нижней точке O_1 , лежащих на вертикальной оси ее симметрии, выбранная нами точка M переходит в точку M' на деформированную ее поверхность, т. е. эллипсоид, заданный уравнением (2). Пусть точка M' ($x_{M'}, y_{M'}, z_{M'}$). Тогда проекции вектора деформации на оси пространственной системы координат будут, соответственно, равны $\Delta_{Mx} = x_{M'} - x_M$, $\Delta_{My} = y_{M'} - y_M$, $\Delta_{Mz} = z_{M'} - z_M$.

Направление вектора деформации $\overline{\Delta_M}$ будет задаваться его направляющими косинусами:

$$\cos(\alpha) = \frac{\Delta_{Mx}}{|\overline{\Delta_M}|} = \frac{x_{M'} - x_M}{\sqrt{(x_{M'} - x_M)^2 + (y_{M'} - y_M)^2 + (z_{M'} - z_M)^2}}; \quad (5)$$

$$\cos(\beta) = \frac{\Delta_{My}}{|\overline{\Delta_M}|} = \frac{y_{M'} - y_M}{\sqrt{(x_{M'} - x_M)^2 + (y_{M'} - y_M)^2 + (z_{M'} - z_M)^2}}; \quad (6)$$

$$\cos(\gamma) = \frac{\Delta_{Mz}}{|\overline{\Delta_M}|} = \frac{z_{M'} - z_M}{\sqrt{(x_{M'} - x_M)^2 + (y_{M'} - y_M)^2 + (z_{M'} - z_M)^2}}, \quad (7)$$

где α, β, γ — углы, образованные вектором $\overline{\Delta_M}$ с положительными направлениями осей $O_k x, O_k y, O_k z$ соответственно.

Из курса математики [6] известно, что для любого вектора в пространстве

$$\cos^2(\alpha) + \cos^2(\beta) + \cos^2(\gamma) = 1. \quad (8)$$

Используя равенство (8) и равенство $\Delta_{Mx} = \Delta_{My}$ ($\angle\alpha = \angle\beta$), получим

$$\cos(\alpha) = \pm 1 / \sqrt{2} \sin(\gamma).$$

Для выбранной нами точки M можем записать

$$\angle\alpha = \angle\beta = \arccos\left(1/\sqrt{2} \sin(\gamma)\right). \quad (9)$$

С учетом (5)...(7) и (9) можем определить величины проекций деформаций семенной коробочки льна в выбранной точке M :

$$\cos(\alpha) = \Delta_{Mx} / \left|\overline{\Delta_M}\right| \Rightarrow \Delta_{Mx} = \cos(\alpha) \cdot \left|\overline{\Delta_M}\right| = (\Delta_{\text{кз}} \sin(\gamma)) / 2\sqrt{2}; \quad (10)$$

$$\cos(\beta) = \Delta_{My} / \left|\overline{\Delta_M}\right| \Rightarrow \Delta_{My} = \cos(\beta) \cdot \left|\overline{\Delta_M}\right| = (\Delta_{\text{кз}} \sin(\gamma)) / 2\sqrt{2}; \quad (11)$$

$$\cos(\gamma) = \Delta_{Mz} / \left|\overline{\Delta_M}\right| \Rightarrow \Delta_{Mz} = \cos(\gamma) \cdot \left|\overline{\Delta_M}\right| = 0,5\Delta_{\text{кз}} \cos(\gamma). \quad (12)$$

Равенства (10)...(12) показывают, что все точки с аппликатой z_M на поверхности недеформированной семенной коробочки подчиняются общему закону деформации, зависящему от величины $\Delta_{\text{кз}} / 2$ и угла, образованного вектором деформации с положительным направлением оси $O_{\text{кз}}$.

Причем это хорошо вписывается в теорию уже рассмотренных случаев. Тогда получим:

– при $\gamma = 180^\circ$ $\Delta_{Oz} = \Delta_{\text{кз}} / 2$; $\Delta_{Ox} = 0$; $\Delta_{Oy} = 0$;

– при $\gamma = 90^\circ$ $\Delta_{Bz} = 0$; $\Delta_{Bx} = \Delta_{\text{кз}} / 2\sqrt{2}$; $\Delta_{By} = \Delta_{\text{кз}} / 2\sqrt{2}$.

Также можно спрогнозировать, что, например, при $\gamma = 135^\circ$ получим $\Delta_{Lz} = -\Delta_{\text{кз}} / 2\sqrt{2}$; $\Delta_{Lx} = \Delta_{\text{кз}} / 4$; $\Delta_{Ly} = \Delta_{\text{кз}} / 4$ и т. д.

С учетом (10)...(12) точка M на деформируемую поверхность перейдет в точку M' со следующими координатами:

$$x_{M'} = x_M + \Delta_{Mx} = x_M + (\Delta_{\text{кз}} \sin(\gamma)) / 2\sqrt{2}; \quad (13)$$

$$y_{M'} = y_M + \Delta_{My} = y_M + (\Delta_{\text{кз}} \sin(\gamma)) / 2\sqrt{2}; \quad (14)$$

$$z_{M'} = z_M + \Delta_{Mz} = z_M + (\Delta_{\text{кз}} \cos(\gamma)) / 2. \quad (15)$$

Так как $x_{M'}$, $y_{M'}$, $z_{M'}$ лежат на эллипсоиде, то подчиняются равенству (3), из которого с учетом (13)...(15) можно определить величину угла γ , а значит, деформации и механическое напряжение в любой точке семенной коробочки льна при ее поперечном сжатии. Это, в свою очередь, позволит установить предельные механические напряжения для разрушения семенной коробочки и выделения из нее семян.

Для этого достаточно рассмотреть семенную коробочку льна как упругое тело. При поперечном сжатии условием ее разрушения является $\left|\overline{N}_\delta\right| > \left|\overline{F}_{\text{упр}}\right|$, где $\left|\overline{N}_\delta\right|$ — величина силы сжатия семенной коробочки бичом, Н.

При этом, согласно закону Гука, для упругого тела величина силы упругости определяется формулой [7; 8]

$$\left|\overline{F}_{\text{упр}}\right| = ES \frac{\Delta l}{l}, \quad (16)$$

где E — модуль Юнга (упругости материала), Па;

S — площадь поперечного сечения, м^2 ;

Δl — величина поперечного сжатия тела, м;

l — линейная величина, определяющая исходное состояние тела, м.

В дифференциальной форме этот закон в точке рассматриваемого материала имеет следующий вид [7; 8]:

$$\sigma_i = E\varepsilon_i, \quad (17)$$

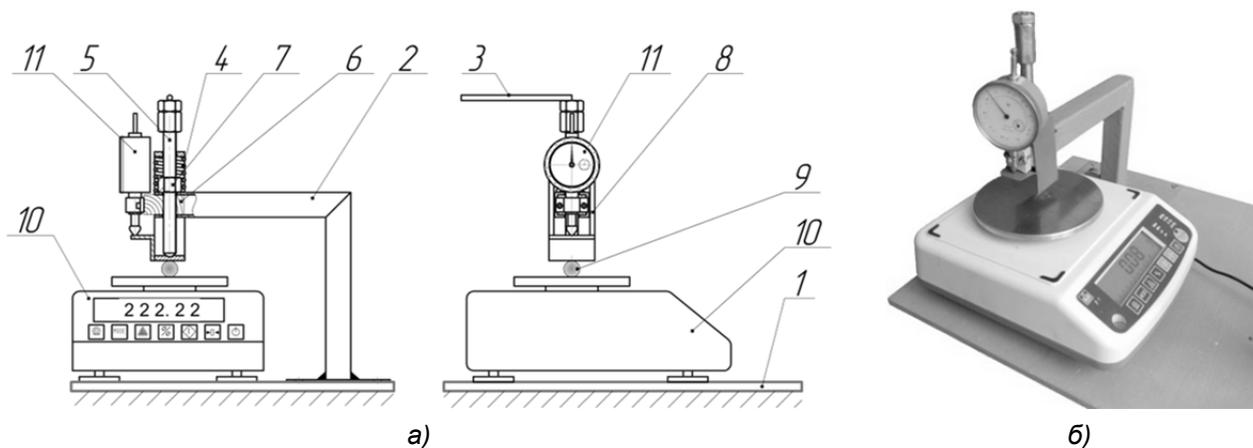
где $\sigma_i = \left| \overline{F_{\text{упр}}} \right| / S_i$ — механическое напряжение в точке, Н / м²;

$\varepsilon_i = \Delta l_i / l$ — величина поперечного сжатия тела в точке.

Физический смысл формулы (17) заключается в том, что механическое напряжение в точках деформируемого тела прямо пропорционально относительному его сжатию с коэффициентом пропорциональности, равным модулю упругости материала данного тела.

Рассматривая формулу (17) применительно к случаю сжатия семенной коробочки льна в целях ее разрушения, можно сделать вывод, что величина механических напряжений в точках коробочки зависит от исходного его состояния ($l = d_k$) и формы (2), ее деформаций в точках, определяемых зависимостями (10) и (11), и формы деформированной поверхности (3). Неизвестной величиной в формулах (16) и (17) является модуль Юнга семенной коробочки льна, который характеризует ее упругие свойства и может быть определен только опытным путем. Экспериментальное определение данного параметра позволит моделировать процесс сжатия и разрушения семенной коробочки льна, а также обосновать рациональную величину зазора между эластичным рабочим органом и сепарирующей решеткой обмолачивающих устройств предлагаемого типа.

Для определения величины упругой деформации, величины деформации коробочки льна при ее разрушении и значений величин сил сжатия при поперечной деформации коробочки, а также модуля Юнга была изготовлена лабораторная установка (рисунок 2). Она представляет собой плиту 1, на которой жестко смонтирована стойка 2 с механизмом разрушения коробочек. Механизм разрушения состоит из рукоятки 3, винта 5 и подпружиненного пружиной 4 ползуна 8, имеющего отполированную рабочую поверхность. Для плавности хода винта 5 установлена упругая резьбовая вставка 6. На плиту 1 под раздавливающий механизм устанавливались весы лабораторные ВК-600 таким образом, чтобы приложение силы разрушения коробочки льна приходилось в центр тарелки весов. Для определения величины смятия коробочки льна на стойке 2 жестко закреплен индикатор часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм, измерительный стержень которого опирается в полку ползуна 8.



1 — плита; 2 — стойка; 3 — рукоятка; 4 — пружина; 5 — винт; 6 — резьбовая упругая вставка; 7 — гайка; 8 — ползун; 9 — коробочка льна; 10 — весы; 11 — видеокамера

Рисунок 2. — Устройство для определения усилия разрушения и величины деформации коробочек льна: а — схема устройства; б — общий вид устройства

Опыты проводили следующим образом. Коробочка льна, диаметр которой предварительно определялся с помощью цифрового штангенциркуля ШЦЦ-I, укладывалась по центру тарелки весов 10, а раздавливающий механизм относительно коробочки располагался так, чтобы ось вращения винта 5 находилась в центре коробочки. При вращении рукоятки 3 винт 5 совершает перемещение по оси вниз и воздействует на ползун 8, который, преодолевая усилие пружины 4, движется в направлении коробочки льна 9. В момент касания рабочей поверхностью ползуна 8 коробочки 9 индикаторная шкала весов отображает усилие, действующее на коробочку льна 9, в этот момент шкалу индикатора ИЧ-10 устанавливали на ноль. В дальнейшем производили сжатие коробочки с шагом 20 мкм и фиксированием силы сжатия в каждом из 14 положений. Также фиксировались значения силы сжатия и величины деформации коробочки в момент ее разрушения. Исследованию подвергались 50 семенных коробочек льна различного диаметра.

Для определения усилия разрушения были заготовлены опытные образцы льна из рулонов льнотресты ОАО «Горкилен» сорта Грант. В исследованиях использовались только целые (нераскрывшиеся) семенные коробочки льна влажностью 12...14 %.

Модуль Юнга материала семенной коробочки льна на основании (16) определяли по зависимости

$$E = \frac{F_{\text{упр}} d_{\text{к}}}{S \Delta_{\text{кз}}}, \tag{18}$$

- где $F_{\text{упр}}$ — сила упругого сжатия коробочки льна, Н;
- $d_{\text{к}}$ — диаметр семенной коробочки льна, м;
- S — площадь поперечного сечения семенной коробочки льна, м²;
- $\Delta_{\text{кз}}$ — величина поперечного сжатия семенной коробочки льна, м.

В результате проведенных исследований по определению деформаций семенной коробочки льна были получены данные, определяющие взаимосвязь величины сжатия (поперечной деформации $\Delta_{\text{кз}}$) семенной коробочки льна и величины силы сжатия F при этом для различных диаметров семенных коробочек льна. На основании полученных данных для средних значений величин деформации и сил сжатия получена графическая зависимость (рисунок 3, а).

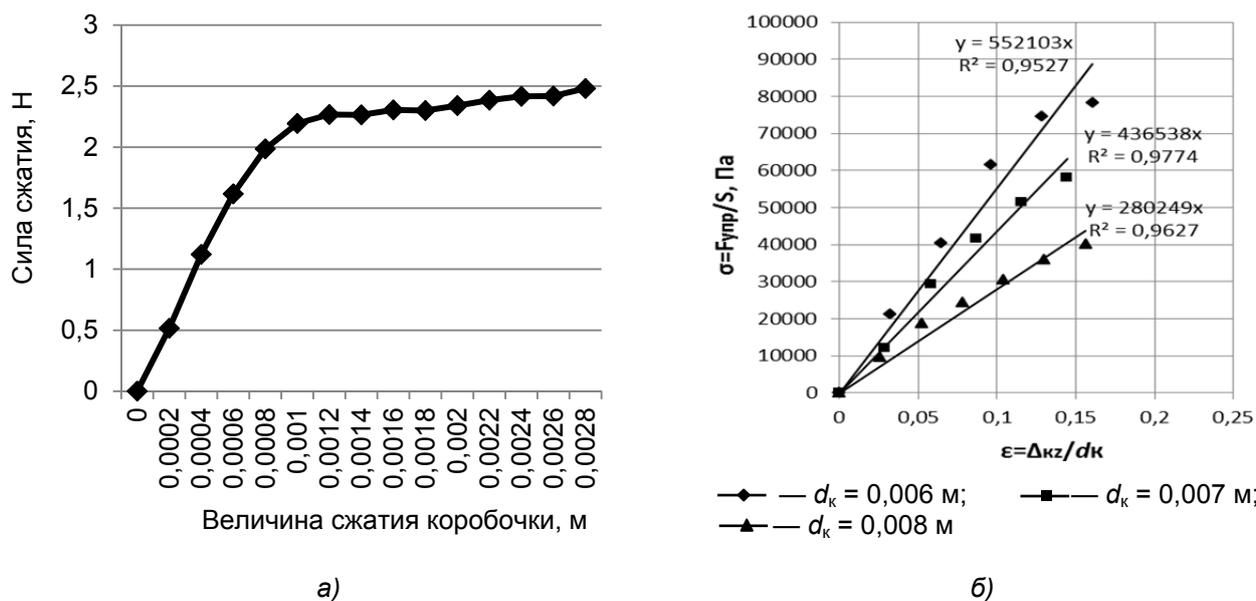


Рисунок 3. — Результаты исследования деформации семенной коробочки льна: а — изменение силы сжатия коробочки от величины сжатия; б — условная диаграмма участка упругости семенной коробочки при различных ее диаметрах для определения модуля Юнга

Анализируя графическую зависимость (см. рисунок 3, а), можно заметить, что на участке сжатия семенной коробочки льна от 0 до 0,0008 м происходит ее упругая деформация. При освобождении семенной коробочки от воздействия приложенной нагрузки на данном участке она принимает свою первоначальную форму. На участке сжатия семенной коробочки льна 0,0008...0,001 м происходит ее разрушение, а дальнейшая деформация сопровождается незначительным снижением силы сжатия. После того как семенная коробочка льна разрушена, ее поперечная деформация сопровождается повторяющимися циклами: незначительным нарастанием сопротивления сжатию, разрушением оболочки и снижением силы сжатия. Циклы нарастания и снижения силы сжатия связаны с морфологией семенной коробочки льна, т. е. наличием в ней семенных гнезд и полугнезд. Диапазон колебания силы сжатия при этом изменяется в пределах от 2,25 до 2,50 Н.

Полученные линейные зависимости (см. рисунок 3, б) с достаточно высокой достоверностью описывают зависимость σ от ε , для семенных коробочек диаметром до 0,006 м коэффициент детерминации $R^2 = 0,95$, для семенных коробочек диаметром 0,007 м коэффициент детерминации $R^2 = 0,98$, а для семенных коробочек диаметром до 0,008 м коэффициент детерминации $R^2 = 0,96$.

На основании формулы (18) установлено, что модуль Юнга для семенной коробочки льна с размерами $d_k = 0,0056...0,0078$ м изменяется от $0,00028 \cdot 10^9$ до $0,00055 \cdot 10^9$ Па, при этом экспериментально определено, что величина ее поперечной деформации $\Delta_{кр}$ до разрушения составляет от 0,0006 до 0,0022 м.

Заключение. В результате анализа деформации семенной коробочки льна при ее поперечном сжатии получены аналитические зависимости для определения угла, задающего направление вектора деформации в любой точке ее поверхности, а также величин проекций деформаций точек, лежащих на поверхности семенной коробочки льна. С учетом упругих свойств семенной коробочки льна данные зависимости позволяют установить предельные механические напряжения для разрушения семенных коробочек и выделения из них семян.

Разработана методика, а также проведены экспериментальные исследования по определению величины упругой деформации семенной коробочки льна и характера ее разрушения. Установлена величина упругой деформации семенной коробочки льна. Получены данные, определяющие взаимосвязь величины сжатия семенной коробочки льна и значений силы сжатия при этом для различных диаметров семенных коробочек льна. Определены значения зависимости механического напряжения, возникающего в семенной коробочке, от ее относительной деформации. Расчетные значения величин модуля Юнга для семенных коробочек диаметром 0,0056...0,0078 м составляют $0,00028 \cdot 10^9...0,00055 \cdot 10^9$ Па. Установлены значения предельной величины сжатия семенной коробочки 0,0006...0,0022 м, определяющей момент ее разрушения.

Список цитированных источников

1. Анализ устройств для отделения семян льна от стеблей / В. А. Шаршунов [и др.] // Вестн. БГСХА. — 2017. — № 4. — С. 174—180.
2. Устройство для отделения семенных коробочек от стеблей льна : пат. 7224 Респ. Беларусь : МПК А 01F 11/00 / В. Е. Круглень, М. В. Лёвкин, В. И. Коцуба, С. Н. Крепочин, В. А. Левчук ; заяв. Белорус. гос. с.-х. акад. ; № u 20100607 ; заявл. 06.07.10 ; дата публ.: 02.02.2011 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. — 2011. — № 2. — С. 154.
3. Устройство для выделения семян из ленты льна : пат. 8183 Респ. Беларусь : МПК А01D 45/06 / В. Е. Круглень, М. В. Лёвкин, В. А. Левчук ; заяв. Белорус. гос. с.-х. акад. ; № u 20110743 ; заявл. 29.09.2011 ; дата публ.: 30.04.2012 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. — 2012. — № 2. — С. 197.
4. Исследование обмолачивающего устройства в линии первичной переработки льна / В. А. Шаршунов [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. — 2015. — № 3. — С. 112—117.

5. Курзенков, С. В. Моделирование деформации коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой в процессе обмолота / С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // *Вестн. БГСХА.* — 2022. — № 1. — С. 142—147.

6. Воднев, В. Т. Основные математические формулы : справочник / В. Т. Воднев, Н. Ф. Наумович, А. Ф. Наумович ; ред. Ю. С. Богданов. — 3-е изд., перераб. и доп. — Минск : Выш. шк., 1995. — 380 с.

7. Математическая физика : энциклопедия / Рос. фонд фундамент. исслед. ; редкол.: Л. Д. Фадеев [и др.]. — М. : Большая рос. энцикл., 1998. — 691 с.

8. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. — 4-е изд. перераб. — М. : Наука, 1968. — 940 с.

Поступила в редакцию 22.03.2022.