

Механизация

УДК 633.5

DOI: 10.31857/S2500262721010166

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСТЯЖЕНИЯ ГРУППЫ СТЕБЛЕЙ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**Ю.Ф. Лачуга¹**, академик РАН, **М.М. Ковалев²**, доктор технических наук, **Г.А. Перов²**, кандидат технических наук, **А.В. Галкин²**, кандидат технических наук¹*Российская академия наук,
119334, Москва, Ленинский проспект, 32 А*
²*Федеральный научный центр лубяных культур,
170041, Тверь, Комсомольский проспект, 17/56
E-mail: m.kovalev@fncl.k.ru*

При работе сельскохозяйственных машин их рабочие органы взаимодействуют с растениями, которые испытывают различные деформации, в том числе растяжения группы стеблей. Для проектирования механизмов сельскохозяйственных машин необходимо знать закономерности поведения растительных материалов при деформациях. Цель исследования – разработка уточненной методики определения закономерностей изменения силы, необходимой для растяжения группы растительных материалов, в зависимости от их относительного удлинения с учетом разной формы и площади поперечного сечения стеблей. Приведена уточненная методика определения закономерности изменения силы, необходимой для растяжения группы параллельных стеблей, графоаналитическим способом, которая меняется по ломаной кривой. Получены зависимости для определения силы удлинения слоя параллельных и хаотически уложенных стеблей с учетом длины участков взаимодействия растений, толщины и плотности слоя, установлены условия при выполнении которых будет осуществляться его растяжение. Результаты исследований предназначены для использования при составлении расчетно-теоретической основы инженерных методов проектирования механизмов сельскохозяйственных машин с учетом специфических свойств растительных материалов как деформируемых механических систем.

METHOD FOR DETERMINING THE PATTERN OF STRETCHING GROUPS OF STEMS OF PLANT MATERIALS**Lachuga Yu.F.¹, Kovalev M.M.², Perov G.A.², Galkin A.V.²**¹*Russian Academy of Sciences,
119334, Moscow, Leninskiy prosp., 32A*
²*Federal Research Center for Bast Crops, 170041,
Tver, Komsomolsky Prospekt, 17/56
E-mail: m.kovalev@fncl.k.ru*

When working with agricultural machines, their working organs interact with plants that experience various deformations, including stretching deformations of a group of stems. To design the mechanisms of agricultural machines, it is necessary to have regularities of the behavior of plant materials under deformation. The aim of the study is to develop a refined method for determining the regularities of changes in the force required for stretching a group of plant materials, depending on their relative length, taking into account the different shape and cross-sectional area of the stems. The object of the study was plant materials with stems having different shapes and cross-sectional areas. A refined method is given for determining the regularity of changes in the force required for stretching a group of parallel stems, graphoanalytically, which changes along a polyline curve. Dependences are obtained for determining the tensile strength of a layer of parallel and chaotically stacked stems, taking into account the length of the areas of plant interaction, the thickness and density of the layer, and conditions are set for its stretching. The research results are intended for use in drawing up the computational and theoretical basis of engineering methods for designing agricultural machinery mechanisms, taking into account the specific properties of growing materials as deformable mechanical systems.

Ключевые слова: растительные материалы, отдельные стебли и группы стеблей, форма, поперечное сечение, площадь, сила растяжения, удлинение, графические зависимости

Key words: plant materials, individual stems and groups of stems, shape, cross-section, area, tensile strength, length, graphic dependencies

Для научно-обоснованного совершенствования и создания новых технических средств механизации процессов в растениеводстве необходимо глубокое изучение растительных объектов. Механизмы и рабочие органы сельскохозяйственных машин при выполнении технологических процессов взаимодействуют с растительными материалами, представляющими собой созданные природой конструкции, которые во многих случаях относятся к живым организмам [1-3]. При этом растительные материалы видоизменяются и испытывают определенные деформации: растяжения, сжатия, резания, сдвига, кручения и др. Деформации растяжения материалов имеют место во многих процессах, выполняемых сельскохозяйственными машинами [4-6]. Форма стеблей в поперечном сечении (в плоскости, перпендикулярной оси стебля) разнообраз-

ная: округлая (у злаков), эллиптическая (у опунций), трехгранная (у осок), четырехгранная (у пустырника, крапивы), многогранная (у многих кактусов), ребристая (у валерианы и др.). Кроме того, у большинства злаковых, а также зонтичных и тыквенных растений стебли внутри полые. Все это следует учитывать при проектировании сельскохозяйственных машин [6-8].

В свою очередь рабочие органы сельскохозяйственных машин, деформирующие материалы, испытывают нагрузки, зависящие от свойств материалов, которые характеризуются совокупностью показателей, учитывающих их строение, сопротивление воздействию нагрузкам, плотность, содержание влаги, трение о рабочие органы, внутренние трения и др. Поэтому при разработке технических средств необходимо знать параметры либо зависимости для расчета этих нагру-



Рис. 1. Схемы взаимного расположения и взаимодействия группы (слоя) стеблей при растяжении: 1, 2 – захваты; 3 – стебли; P – растягивающие силы.

зок, а также поведение растительных материалов при деформациях, что рассматривается в механике растительных материалов [9-11].

При работе сельскохозяйственных машин, взаимодействующих со стеблями, во многих случаях (при тереблении льна и уборке конопли, с очесом семенных коробочек или метелок, уборке зерновых и зернобобовых культур способом очеса на корню и др.) происходит одновременное растяжение группы стеблей, когда образуется их непрерывный поток [12-14].

Силы, необходимые для осуществления этих операций, исследованы достаточно полно для единичного стебля, а для группы стеблей, характеризующейся совокупностью примыкающих единичных материалов, этот вопрос мало исследован [15-17]. Следует так же отметить, что расчеты проведены применительно к единичным цилиндрическим стеблям, с заполненными структурообразующими компонентами поперечными сечениями. Кроме того, в расчетах принимается условная, а не фактическая площадь поперечного сечения полых стеблей разной формы [18-20]. Поэтому требуется разработка методики для определения закономерностей растяжения группы стеблей с учетом фактической площади и формы их поперечного сечения.

Цель исследования – разработка уточненной методики определения закономерности изменения силы, необходимой для растяжения группы растительных материалов, в зависимости от их относительного удлинения, с учетом разной формы и площади поперечного сечения стеблей.

Методика. В процессе исследования использовали методы общего и логического анализа, расчетно-конструктивный метод.

Исследование процесса растяжения стеблей проводили применительно к группе стеблей для двух случаев их укладки – параллельной (рис. 1, а) и хаотической (рис. 1, б).

Определение закономерности удлинения группы стеблей выполнено для цилиндрических (рис. 2, а), цилиндрических полых (рис. 2, б), эллиптических полых (рис. 2, в) и эллиптических полых (рис. 2, г) стеблей злаковых культур, которые служат основой продуктов питания человека.

При выборе модели для механического расчета растительных материалов принято, что группа параллельно расположенных стеблей вследствие своей подвижности относится к сыпучей среде. Группа стеблей, уложенных хаотически и не заполняющих занимаемое пространство непрерывным способом – дискретная среда [11-13].

Для параллельно уложенных стеблей принято, что если их свойства сопротивляться удлинению и диаметры одинаковы, то сила, необходимая для растяжения группы стеблей, будет определяться как произведение силы растяжения одного стебля на их количество в группе. При разных свойствах стеблей сопротивляться удлинению, таких как размеры, кривизна, форма, фрикционные свойства, влажность, связность и др., сила P растяжения группы стеблей будет представлять собой сумму неодинаковых по величине сил, растягивающих отдельные стебли, при этом большая сила будет растягивать стебель, который сильнее сопротивляется растяжению.

Для определения силы P, необходимой для удлинения группы стеблей, строятся диаграммы растяжения каждого из них, представляющие собой графическую

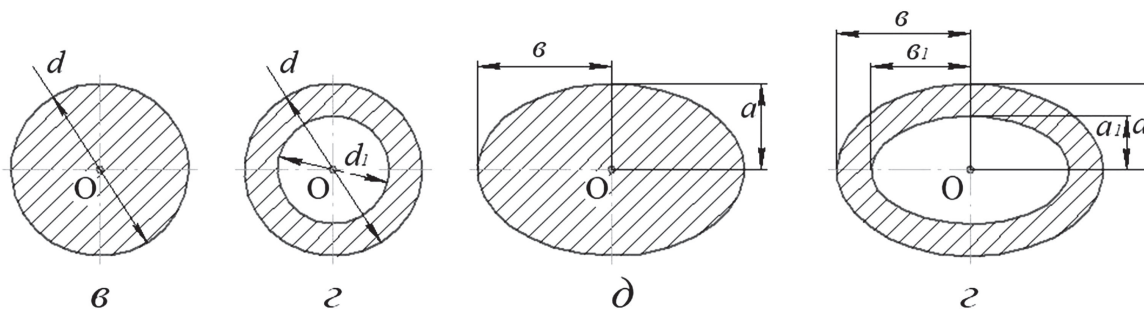


Рис. 2. Схемы поперечных сечений стеблей (обозначения в тексте).

зависимость относительного удлинения ε от растягивающего напряжения σ , которые известны [11-13]. Относительное удлинение $\varepsilon = \Delta l/l$, где Δl – удлинение стебля при действии напряжения σ , l – длина стебля до начала растяжения, а $\sigma = P/F$, где P – сила, действующая на стебель при его удлинении, F – площадь поперечного сечения стебля.

Тогда для стебля:
цилиндрического

$$\sigma = 4P/\pi d^2, \quad (1)$$

где d – диаметр стебля (если стебель конусный по длине, то d – диаметр в его наименьшем поперечном сечении);

цилиндрического полого

$$\sigma = 4P/\pi(d^2 - d_i^2), \quad (2)$$

где d_i – внутренний диаметр поперечного сечения стебля;

эллиптического с заполненным поперечным сечением

$$\sigma = 4P/\pi a b, \quad (3)$$

где a и b – его малая и большая полуоси эллипса;
эллиптического полого

$$\sigma = 4P/\pi(a b - a_i b_i), \quad (4)$$

где a_i , b_i – малая и большая полуоси внутреннего эллипса.

Экспериментальными исследованиями [20] получены формулы для определения зависимости толщины δ_c стенки стебля от его диаметра d и фактической F_ϕ площади поперечного сечения, действительные для наиболее часто встречающихся диаметров полых стеблей льна-долгунца от $8 \cdot 10^{-4}$ до $2,2 \cdot 10^{-3}$ м: $\delta_c \approx 0,25d$; $F_\phi \approx 0,589d^2$.

Тогда при диаметре стеблей $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м, толщине стенки $\delta_c = 5 \cdot 10^{-4}$ м внутренний диаметр стебля $d_i = d - 2\delta_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м. Для вычисления напряжения σ значения диаметров d и d_i подставляются в формулу (2).

Для определения напряжения σ по формуле (2) целесообразно использовать и фактическую площадь F_ϕ поперечного сечения стебля, которая при его диаметре $2 \cdot 10^{-3}$ м составляет $2,4 \cdot 10^{-6}$ м², что в 1,4 раза меньше условной площади F , равной $3,3 \cdot 10^{-6}$ м², принимаемой в расчетах.

Результаты и обсуждение. При проведении исследований определяли силу P , необходимую для удлинения группы стеблей и закономерность ее изменения с ростом относительного удлинения, исходя из того, что диаграммы растяжения их известны. Располагая диаграммами растяжения, можно построить графические зависимости относительного удлинения ε от напряжения σ для каждого стебля группы и нанести на один график при одних и тех же масштабных коэффициентах (рис. 3, а).

Построенные для каждого стебля кривые на графиках нумеруют, а соответствующие окончанию удлинения стеблей и их разрыву концы кривых обозначают как $B_1 \dots B_6$. Затем в зоне нахождения всех кривых на оси абсцисс отмечается некоторая точка, в которой относительное удлинение $\varepsilon = \varepsilon_0$, и через нее проводят вертикальную линию до пересечения с построенными кривыми в точках $A_1 \dots A_6$.

Из этих точек проводят горизонтальные линии до пересечения с осью ординат. Точки пересечения горизонталей с этой осью соответствуют напряжениям $\sigma_1 \dots \sigma_6$ стеблей. При таких напряжениях σ_i относительное приращение каждого стебля равно ε_0 . Умножая величины этих напряжений σ (формулы 1-4) на фактические площади S поперечного сечения стеблей получаем силу P , необходимую для относительного удлинения соответствующего стебля до значения $\varepsilon = \varepsilon_0$.

Тогда для соответствующих поперечных сечений стеблей эти растягивающие силы P_i определяются следующим образом:

цилиндрических

$$P_i = \pi d_i^2 \sigma_i / 4, \quad (5)$$

где i – номер стебля;

цилиндрических полых

$$P_i = \pi(d_i^2 - d_{i1}^2) \sigma_i / 4; \quad (6)$$

эллиптических с заполненным поперечным сечением

$$P_i = \pi a_i b_i \sigma_i; \quad (7)$$

эллиптических полых

$$P_i = \pi(a_i b_i - a_{i1} b_{i1}) \sigma_i. \quad (8)$$

Определенная по формулам (5-8) сила P выражается ординатой $\varepsilon_0 c$ на рис. 3, б, на котором по оси абсцисс откладывается относительное удлинение ε_0 группы стеблей, а по оси ординат – сила их растяжения P . В этом случае, из расчетов и построений следует, что относительное удлинение ε_0 группы стеблей равно от-

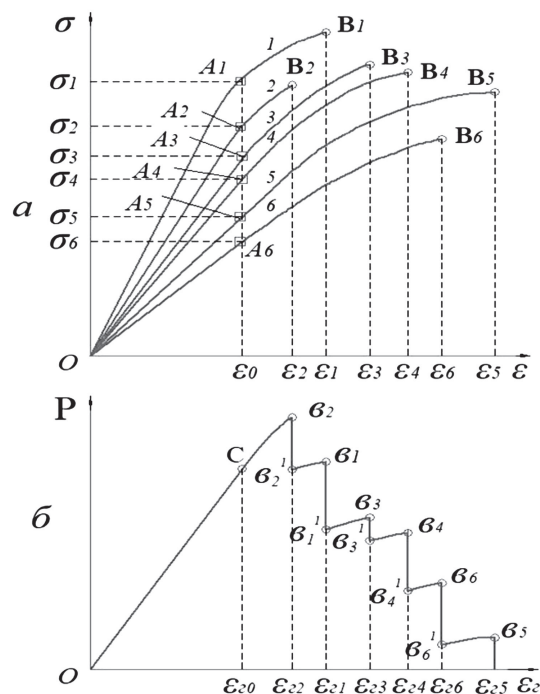


Рис. 3. График к расчету силы P , необходимой для растяжения группы из шести стеблей (а), и закономерность изменения этой силы с ростом относительного удлинения ε (б).

носителю удлинению одного стебля. Дальнейшее удлинение группы всех стеблей происходит лишь до относительного удлинения ε_2 , соответствующего положению точки B_2 на графике (см. рис. 3, а). Аналогично находится относительное удлинение ε_1 , соответствующее положению точки B_1 на графике, а также относительные удлинения $\varepsilon_3 \dots \varepsilon_6$, соответствующие положениям точек $B_3 \dots B_6$ (рис. 3, а).

Таким образом, вся группа стеблей будет удлиняться под действием силы P лишь до относительного удлинения ε_{22} , после чего стебель 2 разорвется. Далее будет удлиняться стебли 1, 3... 6 до относительного удлинения ε_{11} , при котором произойдет разрыв стебля 1, а стебли 3... 6 будут продолжать удлиняться до относительного удлинения ε_{33} , когда разорвется стебель 3 и так далее. Требуемая для всех этих удлинений растягивающая сила P для цилиндрических стеблей при напряжении σ_p , соответствующем рассматриваемым деформациям, рассчитывается по формуле (5), цилиндрических полых (6), эллиптических с заполненным поперечным сечением (7), эллиптических полых (8).

Графически представленная закономерность изменения удлинения и разрыва группы из шести стеблей показана на рис. 3, б. На нем по оси абсцисс откладывается относительное удлинение ε группы стеблей, в том же масштабе, в котором отложено относительное удлинение ε на оси абсцисс на рис. 3, а, а по оси ординат откладывается растягивающая сила P . Этот график показывает изменение силы P при растяжении группы стеблей по ломаной кривой $OCb_2b_2'b_1b_1'b_3b_3'b_4b_4'b_6b_6'b_5\varepsilon_5$. Длины участков b_2b_2' , $b_2'b_1$, b_1b_1' , $b_1'b_3$, b_3b_3' , $b_3'b_4$, b_4b_4' , $b_4'b_6$, b_6b_6' , $b_6'b_5$, $b_5\varepsilon_5$ определяются свойствами каждого стебля из этой группы сопротивляться растяжению и расположением на рис. 3, а точек $B_1 \dots B_6$, соответствующих окончанию удлинения стеблей и их разрыву. При ином расположении этих точек (например, больших расстояниях по оси абсцисс от ε_1 до ε_2 или от ε_2 до ε_3 и так далее) ломаные участки b_2b_1' , $b_1'b_3$, b_3b_4' , $b_4'b_6$, b_6b_5 расположились бы иным образом, а линии b_2b_2' , b_1b_1' , b_3b_3' , b_4b_4' , b_6b_6' и $b_5\varepsilon_5$ остались вертикальными.

Методика определения закономерности растяжения большей или меньшей группы стеблей аналогична изложенной.

При растяжении группы параллельных или хаотически уложенных стеблей (см. рис. 1) когда одна их часть закреплена в одном захвате, а вторая в другом, в первую очередь разрывается либо растягивается наиболее слабо сцепленная между стеблями часть или несколько таких частей [12-13].

На рис. 1, а показано взаимодействие параллельных растений, условно отодвинутых одно от другого для изображения сил трения F_i , а на рис. 1, б – взаимодействие изогнутых растений, раздвинутых для анализа процесса воздействия одних растений на другие.

Слой материалов (рис. 1, а) состоит из стеблей 1...6 и 1'...6', подвергающихся растяжению. В соответствии с принципом равенства действия и противодействия сила P действует на стебли 1...6 влево, а на стебли 1'...6' действует такая же сила P , но направленная вправо. При сдвиге стеблей 1...6 от остальных в местах их контакта возникнут силы трения F_i . Со стороны стебля 2' на стебель 1 будут действовать силы трения F_1 на участке A_1B_1 , а на стебель 3 – сила трения F_2 на участке C_1D_1 . На стебель 4 со стороны стебля 3' будут действовать силы трения F_3 . Аналогичным образом будут действовать на стебли 5' и 6 силы трения

F_4 и F_5 . Тогда для удлинения слоя материалов сила P должна преодолеть сумму всех этих сил трения.

Расчет сил трения проводится при допущениях, что ширина слоя a и плотность ρ материалов одинаковы по всей его длине.

Тогда сила действия одного растения на другое определится как [11]:

$$F = \int_0^l dF = afglh\rho, \quad (9)$$

где l – длина участка взаимодействия растений; dF – элементарная сила трения; f – коэффициент трения скольжения растения о растение; g – ускорение свободного падения; h – глубина слоя.

В соответствии с (9) для участка A_1B_1 длиной l_1 сила трения равна

$$F_1 = afgl_1h\rho,$$

где h_1 – толщина (диаметр) верхнего стебля.

Силы трения $F_2 \dots F_5$ определяются аналогично силе трения F_1 .

Исходя из этого имеем, что удлинение слоя материалов при действии растягивающей силы будет равно:

$$P \geq afg\rho(l_1 h_1 + \dots + l_5 h_5), \quad (10)$$

где $l_2 \dots l_5$ – длины соответствующих участков взаимодействия растений; $h_2 \dots h_5$ – расстояния, 1-2; 1-3; 1-4; 1-5 между слоями стеблей, отсчитываемые от верхнего уровня первого стебля.

В общем случае для взаимодействия n растений формула (10) запишется следующим образом:

$$P \geq afg\rho \sum_{(i=1)}^n l_i h_i, \quad (11)$$

где i – номер зоны взаимодействия растений, n – число зон взаимодействия растений.

Рассмотренная схема растяжения группы растений дает в определенной степени идеализированное представление о механике этого процесса. В действительности растяжения слоя материалов значительно сложнее. В слое при действии силы растяжения P на изогнутые взаимодействующие растения (см. рис. 1, б) кроме сил трения между растениями возникают силы сцепления $P_{сц}$, так как смещению растений 1, 3, 4, 6 влево препятствуют растения 2', 4', 6', 7'. С учетом этого растяжение слоя материалов будет проходить при выполнении неравенства [13]:

$$P \geq afg\rho \sum_{(i=1)}^n l_i h_i + P_{сц}, \quad (12)$$

где $P_{сц}$ – сила сцепления между растениями.

Неравенство (12) с одной стороны характеризует закономерности растяжения группы материалов, а с другой, отражает случайные явления в этом процессе. При наличии в группе большого количества материалов, взаимодействие между которыми носит случайный характер, исследование деформации следует проводить методами статистической механики.

Растительные материалы – сложные реологические тела. При деформации их поведение зависит от преобладания и проявления разных фундаментальных свойств, которое различно в разных условиях. В связи с этим требуется проведение дополнительных исследований для изучения закономерностей изменения силы сцепления от таких свойств, как размерные показате-

ли, влажность, кривизна, прочность, фрикционные свойства и др.

Исследованные реологические характеристики могут быть использованы для регулирования параметров технологических процессов производства, служить исходными данными при конструировании машин и механизмов.

Таким образом, в результате исследований предложена усовершенствованная методика определения закономерности растяжения группы параллельных стеблей растительных материалов в зависимости от их относительного удлинения, с учетом различной формы и площади поперечного сечения стеблей. Закономерность растяжения группы параллельных стеблей установлена с использованием графической зависимости относительного удлинения ε стебля от растягивающего напряжения σ .

Сила P , необходимая для удлинения группы параллельных стеблей, определяется зависимостями (5-8) и при растяжении группы стеблей изменяется по ломаной кривой (см. рис. 3, б), зависящей от свойств каждого стебля группы сопротивляться растяжению.

При действии растягивающей силы P удлинение слоя параллельно или хаотически уложенной группы стеблей будет проходить при выполнении неравенств (11) и (12). Чем больше толщина слоя h и длина l участков взаимодействия стеблей тем большая сила P необходима для его растяжения.

Усовершенствованная методика определения закономерностей растяжения группы параллельно или хаотически уложенных стеблей может быть пригодна для использования в расчетно-теоретической основе инженерных методов проектирования механизмов сельскохозяйственных машин, базирующихся на результатах изучения закономерностей поведения растительных материалов при нагружении, как деформируемых механических систем.

Литература

1. Крагельский И.В. Физико-механические свойства стеблей льна и конопли // Свойства сельскохозяйственных растений. М.: ВИСХОМ, 1939. С. 182–190.
2. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений (методы исследования, приборы, характеристики). М.: Колос, 1970. 424 с.
3. Бурмистрова М.Ф., Колюлькова Г.Г. Физико-механические свойства сельскохозяйственных растений. М.: Сельхозгиз, 1955. 360 с.
4. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высшая школа, 1968. 512 с.
5. Козлов В.П. Разработка технологии плющения льна и создание плющильных аппаратов льнокомбайнов: дис....канд. техн. наук. Тверь, 2002. 194 с.
6. Лукьянова И.В. Анализ видовых и сортовых особенностей устойчивости злаковых культур к полеганию с учетом их физико-механических свойств и архитектоники для использования в селекции: дис....д.б.н. Краснодар, 2008. 554 с.
7. Киселев С.Н., Левшин А.Г., Клепинин Н.И. Сельскохозяйственные машины. М.: Колос С. 2008. 816 с.
8. Повышение равномерности распределения непьющих известковых удобрений по поверхности поля / Ю.Ф. Лачуга, Ю.Т. Фаринюк, М.М. Ковалев и др. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2016. №6. С. 12–15.
9. Multi – scale morphological characterization of flax: from the stem to the fibrils / K. Charlet, S. Jernot, M. Gomina, et al. // Carbohydrate Polymers. 2010. Vol. 82. No. 1. P. 54–61.
10. Limont A.S. Morphological indices of fiber flax stalks and machines for its harvesting // Europäische Fachhochschule. 2015. No. P. 79–84.
11. Хайлис Г.А. Механика растительных материалов. Киев: изд-во УААН, 1994. 334 с.
12. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів / Г.А. Хайлис, А.Ю. Горбовий, З.А. Гошко и др. Луцьк: ред.-вид. Відділ ЛДТУ, 1998. 268 с.
13. Ковалев Н.Г., Хайлис Г.А., Ковалев М.М. Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства). М.: ИК «Родник», 1998. 208 с.
14. Саркисян Г.М. Исследование принципа строения стеблей при конструировании сельхозмашин // Тракторы и сельхозмашины. 1992. № 5. С.21–22.
15. Быков Н.Н. Физико-механические свойства стеблей льна-долгунца при растяжении // Тр. ВНИИ льна. Торжок, 1974. Вып. 12. С.65–72.
16. Черников В.Г., Порфирьев С.Г., Ростовцев Р.А. Очесывающие аппараты льноуборочных машин (теория, конструкция и расчет): монография. М.: «Издательство ВИМ», 2004. 240 с.
17. Ковалев М.М., Галкин А.В., Просолов С.В. Определение разрывного усилия стеблей льна // Высокоэффективные разработки и инновационные проекты в льняном комплексе России: тез. докл. Вологда, 2007. С. 112–115.
18. Шейченко В.О. Обґрунтування параметрів та режиму роботи льнобрального апарату з поперечними рівчаками: дис....канд. техн. наук. Дослідницьке, 2006. 126 с.
19. Dehondt G. Dehondt lance sa nouvelle ar racheuse de lin // Le courrier cauchois. Vendredi, 27 juin 2008. P. 5–6.
20. Определение зависимости толщины стенки стебля льна-долгунца от его диаметра / М.М. Ковалев, А.В. Галкин, Д.Г. Фадеев и др. // Инновац. разработки для производства льна: мат. Межд. науч.-практ. конф. Тверь: ФГБНУ ВНИИМЛ; Твер. гос. ун-т, 2015. С. 120–124.

Поступила в редакцию 02.11.20
После доработки 04.12.20
Принята к публикации 21.12.20