

Научная статья

УДК 677.021: 539.422.5

doi 10.34216/2587-6147-2021-2-52-19-26

Евгений Львович Пашин<sup>1</sup>

Александр Валерьевич Орлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Костромская государственная сельскохозяйственная академия, пос. Каравеево, Россия

<sup>2</sup>Костромской государственный университет, Кострома, Россия

<sup>1</sup>evgpashin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5871-874X>

<sup>2</sup>aorlov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4995-3393>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ И РАЗРЫВА ЛЬНЯНЫХ ВОЛОКОН ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

**Анотация.** В статье проведен анализ ряда существующих работ, рассматривающих особенности процесса разрыва льняного волокна, в том числе связанных с поведением связей в матрице волокон. В частности, указано на необходимость учета постепенного разрушения индивидуальных волокнистых пучков в ходе разрыва. По результатам анализа составлена многокомпонентная механическая модель, учитывающая различные эффекты, имеющие место в ходе разрыва. На основании этой модели создана программа для ЭВМ, выполняющая моделирование поведения пучка при разрыве. Проведено моделирование разрыва нескольких прядей льняного волокна, обладающих различными характеристиками. Результаты моделирования согласуются с наблюдаемым поведением реальных образцов, что позволяет использовать данную модель для оценки влияния различных свойств льняного волокна на его прочностные характеристики.

**Ключевые слова:** лен, трепаное волокно, разрыв, моделирование, упругость, внутреннее трение, волокнистый пучок, растяжение

**Для цитирования:** Пашин Е. Л., Орлов А. В. Моделирование процесса нагружения и разрыва льняных волокон при одноосном растяжении // Технологии и качество. 2021. № 2(52). С. 19–26. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2021-2-52-19-26/>

Original article

Evgeniy L. Pashin<sup>1</sup>, Aleksandr V. Orlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kostroma State Agricultural Academy, Karavayevo, Russia

<sup>2</sup>Kostroma State University, Kostroma, Russia

## MODELLING FLAX FIBRE STRETCHING AND TEARING PROCESS UNDER SINGLE AXIS LOAD

**Abstract.** The article examines existing works considering the process of tearing of flax fibre, specifically fibrous matrix and linkages within it. In particular authors point out the necessity of taking into account the destruction of individual fibres during deformation and tearing process. The end result of this analysis is a multipart mechanical model allowing for various effects that may take place during the said process. This model is implemented in software and used to model the behaviour of several strands of fibre of varying quality. The results match the observed behaviour of actual samples with similar properties, which allows using the model presented to estimate the effect various properties of flax fibre have on its tensile strength.

**Keywords:** flax, flax fibre, scotched flax, tearing, model, elasticity, internal friction, fibrous strand, stretching

**For citation:** Pashin E. L., Orlov A. V. Modelling flax fiber stretching and tearing process under single axis load. *Tekhnologii i kachestvo* = Technologies & Quality. 2021;2(52):19–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2021-2-52-19-26>.

По действующим государственным стандартам важнейшим показателем качества льняного волокна является его разрывное усилие. Его определяют посредством одноосного разрыва навесок технических волокнистых комплексов в виде отрезков длиной 0,27 м и массой 0,42 г [1, 2]. Для испытания используют мят-

никовые динамометры, конструкции которых не лишены недостатков [3]. Однако при создании более совершенной техники возникает необходимость в моделировании процесса разрыва волокон, например для оценки влияния их свойств на результаты разрыва [4], контроля воспроизводимости получаемых результатов, а также тестирования машин. Подобные разработки

© Пашин Е. Л., Орлов А. В., 2021

проводились в области механики нити, в частности ее старения [5].

С этой целью рассмотрим особенности структуры навески льняных волокон, подвергаемых разрыву в воздушно-сухом состоянии. Она состоит из волокнистых прядей (ВП), каждая из которых в результате механической переработки варьируемых по свойствам стеблей тресты состоит из пучков волокон (ПВ). По своей структуре эти пучки представляют соединенные между собой анастомозными связями элементарные комплексы (ЭК) в виде совокупности смещенных по длине друг относительно друга элементарных волокон (ЭВ) конечной длины и веретенообразной формы. ЭВ связаны (склеены) между собой органической композицией, состоящей из неволокнистых примесей [6]. В ее состав может входить лигнин, который по мере биологического созревания льняного растения способен «цементировать» ЭВ между собой, затрудняя их продольные смещения [7].

При осевом растяжении ПВ в зависимости от их структуры, свойств ЭВ и клеящей композиции могут возникать различные структурные изменения и деформации с последующим разрывом. Возникающие при этом усилия во многом связаны с особенностями ослабления межволоконных связей в процессе преобразования стеблей соломы в тресту. В отличие от исходных ПВ в стеблях соломы в тресте они имеют более рыхлое состояние и в меньшей степени связаны друг с другом. Причиной этому является результат действия ферментативной системы пектиноразлагающих и иных микроорганизмов, активно развивающихся в процессе росной мочки, как повсеместно используемого способа получения тресты [8]. По завершению процесса получения тресты ЭВ в ПВ удерживаются посредством отдельных участков склейки, расположенных в основном в местах контакта волокон. В воздушно-сухом состоянии смещение ЭВ друг относительно друга из-за указанной склейки является затруднительным. Однако в процессе роста натяжения из-за неровноты свойств и размеров склейки количество участков склейки уменьшается из-за возрастающих касательных напряжений. При дальнейшем растяжении происходит разрыв ВП, состоящих из ПВ, у которых в месте разрыва могут наблюдаться как разрушенные, так и целые с сохраненными окончаниями элементарные волокна [9].

Таким образом, льняное волокно представляет собой совокупность субструктур в виде сборной конструкции, которая при одноосном натяжении и разрыве разрушается поочередно (рис. 1). Этот процесс может протекать по

разным сценариям. Если между элементарными волокнами связи не разрушены, что характерно для недолежалой тресты или стеблей с повышенным содержанием лигнина, то в основном будет наблюдаться разрыв элементарных волокон. Сам пучок при этом деформируется как упругое тело с величиной относительного удлинения до 2–3 %. При другом сценарии, если в процессе росной мочки, в результате биодеструкции внутренней структуры стебля, связи между волокнами ослаблены, а места склейки не лигнифицированы, то возможны относительные смещения ЭВ. Такие смещения будут происходить из-за разрушения локально и случайно расположенных связей вплоть до полного отсутствия контактов между этими волокнами и разрыва ПВ. Общая деформация ВП в процессе растяжения до разрыва может заметно возрастать, что подтверждается практикой испытаний [10].

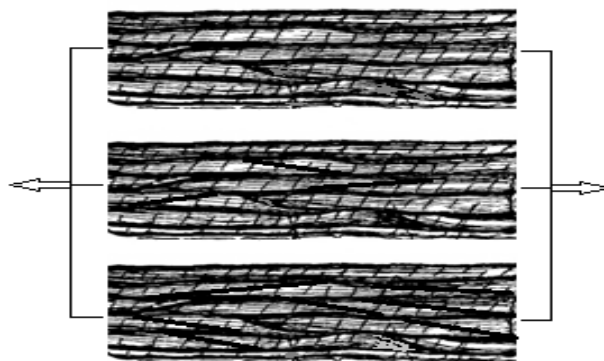


Рис. 1. Представление льняного волокна в виде сборной конструкции пучка при растяжении

При таком рассмотрении нельзя не учитывать повышенную гетерогенность свойств льняного волокна [11], обусловленную вариацией диаметра ЭВ, расположением волокон по длине стеблей, степенью их биологической зрелости и вылежки при получении тресты [12]. Это во многом определяет характер указанных сценариев структурных изменений при одноосном растяжении и разрыве волокнистых комплексов. При этом очевидно, что они будут протекать в условиях одновременного и стохастического проявления свойств элементарных волокон, клеящей композиции и возникающих при растяжении напряжений в каждом элементе склейки.

С учетом [13] отметим, что льняное волокно в виде совокупности параллельных ВП может быть подобно структуре армированного дискретными волокнами композиционного материала. При таком подходе моделирование процесса растяжения и разрыва требует учета особенностей деформирования и разрушения как каждого ВК, так и в целом всей системы из

них в виде параллельных элементов. Последнее возможно на основе теорий разрыва пучка волокон, известных в области текстильного материаловедения [14–17].

При рассмотрении различных моделей разрушения армированных волокнами композитов [18] для нашей задачи, когда наполнитель представлен в виде дискретных параллельных между собой волокон, наиболее приемлемыми являются вероятностные модели с проявлением сдвиговых явлений [19].

Заслуживает внимания вероятностная модель, предложенная Б. Розеном [20]. Ее основой служат представления о том, что в условиях варьирования параметров, определяющих структуру и свойства волокнистых комплексов, их разрушения будут протекать в определенной последовательности. Первые разрывы связей возникают в дефектных (наиболее ослабленных) местах при низком уровне напряжений. В дальнейшем, за счет наличия более прочных связей произойдет последующее увеличение растягивающей нагрузки при одновременном разрушении других слабых связей. Наконец, после разрушения всех связей волокнистый комплекс будет разрываться.

При использовании моделей сдвигового анализа прочность армированного волокнами композита определяется с учетом так называемой неэффективной  $l^*$  и критической  $l_{кр}$  длин волокон. Величина  $l_{кр}$  увеличивается с уменьшением касательных напряжений  $\tau_{г.р}$ , соответствующих сдвиговой прочности границы раздела «волокно – матрица», и увеличением растягивающих напряжений  $(\sigma_{в})_{в}$ , определяющих прочность волокон на разрыв, а также с увеличением их диаметра  $d_{в}$  [21].

Понятия  $l_{кр}$  и  $l^*$  вытекают из особенностей распределения напряжений по длине дискретных волокон как армирующих элементов. Применительно к  $l_{кр}$  возникающие при одноосном растяжении касательные напряжения имеют максимальные значения на концах волокон, а растягивающие на этих участках минимальны и не обеспечивают упрочнение композиции «волокно – матрица». Такое соотношение напряжений определяет сущность неэффективной длины волокон  $l^*$  как расстояние от их концов, где растягивающие напряжения в значительной степени не достигают напряжений, характеризующих прочность волокна на разрыв. При этом максимальное касательное напряжение, возникающее вблизи концов волокон, может лимитироваться пределом сдвиговой устойчивости системы волокно – матрица.

При определенных соотношениях длины волокон и значений  $l^*$  и  $l_{кр}$  растягивающие напряжения в волокнах оказываются недостаточными для того, чтобы вызвать их разрушение. В этом случае они начинают выскальзываться (вытаскиваться) из матрицы с волокном. Иными словами, при прочих равных условиях с уменьшением силы связи (склейки) между волокнами вероятность появления при разрыве неразрушенных, но вытянутых из массива (комплекса композита) волокон может возрастать. Явлениями пластичности и вязкости ВП при растяжении в воздушно-сухом состоянии, в отличие от поведения волокон в мокром виде [14], возможно пренебречь.

С учетом указанных модельных представлений о разрушении волокнистых композитов и понятий неэффективной и критической длин волокна становится возможным рассмотрение процесса нагружения при растяжении ВП следующим образом. На начальных этапах в них начинают формироваться напряжения различной природы, вызывающие начальную деформацию ЭК в ПВ. При этом ЭК начинают растягиваться не одновременно из-за отсутствия их параллелизации и несовершенства условий зажима. Далее в прядях возникают деформации в основном упругого характера. На последующих этапах, в зависимости от длины, диаметра элементарных волокон, сил и мест склейки, а также вариации по этим параметрам, могут происходить разрушения связей, согласно указанной выше вероятностной картине разрушения. Будут наблюдаться изменения взаимного положения волокон. В волокне, полученном из стеблей перележалой тресты, число таких случаев будет значительным.

Изменения, связанные со смещением волокон друг относительно друга, можно представить в виде элементов трения, но с конечной величиной смещения  $\Delta$ . Такие смещения, с позиций механики композитов, можно рассматривать как дефекты, определяющие прочность на разрыв волокнистого полимера [22]. Характер изменения прочности связей от их проявления можно принять сходным с изменением в композите касательных напряжений на границе «волокно – матрица», а именно от максимальной величины в центре длины ЭВ до нуля к их концам.

В результате разрыва ВП часть составляющих его элементарных волокон может быть разрушена посредством поперечных разрывов, а часть останется целыми из-за их выскальзывания при растаскивании пучков.

Такой порядок нагружения и разрыва волокон можно представить в виде линейной мо-

дели деформации, подобно [23], но с ограниченной по длине зоной смещения  $\Delta_{см}$  ЭВ (рис. 2). Применительно к совокупности ПВ, состоящих из ЭК, линейная модель будет иной, но сходной с моделью разрыва совокупности параллельных пучков и учитывающей особенности разрыва технического льняного волокна на существующих разрывных машинах.

Как следует из представленной схемы, механическими аналогами возникающих при растяжении упругой деформации и связей (склеек) в виде силы трения, являются пружина и элемент трущихся на участке контакта  $\Delta_{см}$  между собой определенных по размеру поверхностей. Поэтому возникающая сила трения  $F_{тр}$  изменяется по величине и времени действия. Аналогом звена прослабления прядей при их начальном натяжении является элемент «люфта»  $\Delta_{просл}$ .

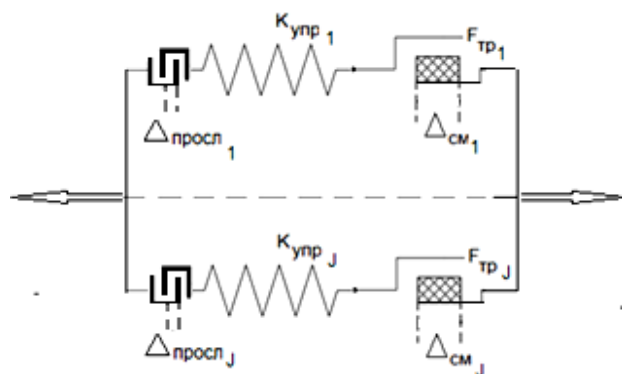


Рис. 2. Модель деформируемой при растяжении навески льняного волокна

При такой аналогии взаимодействия элементов системы при растяжении определяются случайно изменяющимися величинами коэффициентов упругости, сил сцепления волокон в виде  $F_{тр}$  и люфтов  $\Delta_{просл}$ . Допустим, что их величины подчиняются закону нормального распределения. При формировании деформации пренебрегаем силами инерции, так как масса волокон не значительна и поэтому процесс разрыва можно рассматривать, как квазистатический.

Структурно-имитационное моделирование процесса разрыва предложено разбить на две стадии – моделирование поведения образца и моделирование приложения нагрузки. С учетом отсутствия связи исследуемых сил и скорости приложения нагрузки будем моделировать простейший случай, когда образец волокна деформируется с постоянной линейной скоростью.

Согласно названным выше условиям, сила упругости  $F_{упр i}$ , формируемая каждым ВП, может быть вычислена следующим образом:

$$F_{упр i}(x) = K_{упр i}(x - \Delta_{просл i}), \quad (1)$$

где  $K_{упр i}$  – коэффициент упругости;

$\Delta_{просл i}$  – величина люфта, вызванного недостаточным начальным натяжением пучка;

$x$  – общая величина деформации образца.

Эффект от разрушения связей между ЭВ будем учитывать так:

$$F_i(x) = \begin{cases} \min(F_{тр i}, F_{упр i}(x)), & \text{если } x < x_{крит i}, \\ 0, & \text{если } x \geq x_{крит i}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $F_{тр i}$  – величина силы разрушения связей для данного пучка;

$x_{крит i}$  – критическая деформация, вычисляемая по следующей формуле:

$$x_{крит i} = \frac{F_{тр i}}{K_{упр i}} + \Delta_{просл i} + \Delta_{см i}, \quad (3)$$

где  $\Delta_{см i}$  – величина области контакта в данном пучке.

Применяя зависимости (1)–(3), по достижении пучком величины деформации, равной  $x_{крит i} - \Delta_{см i}$ , начинается разрушение связей между элементарными волокнами, а по достижении пучком величины деформации  $x_{крит i}$  происходит его полное разрушение. В интервале между этими двумя значениями величина  $F_{тр i}$  убывает по линейному закону до нуля в момент разрушения пучка.

Непосредственное моделирование возникающих усилий при растяжении предложенной системы на ЭВМ осуществлялось по следующему алгоритму.

1. Формирование набора индивидуальных пучков и генерация случайных значений коэффициентов  $K_{упр i}$ ,  $F_{тр i}$ ,  $\Delta_{просл i}$ ,  $\Delta_{см i}$ . При этом значения распределяются по нормальному закону. Математическое ожидание  $\mu$  и стандартное отклонение  $\sigma$  задается пользователем. Начальная величина деформации  $x$  принимается равной 0.

2. Величина деформации  $x$  итеративно наращивается с выбранным шагом. На каждой итерации для заданной величины деформации по формулам (1)–(3) вычисляется совокупное усилие, оказываемое образцом:  $F(x) = \sum F_i(x)$ .

Реализация п. 2 повторяется до тех пор, пока величина усилия  $F(x)$  не достигнет нуля, что будет означать полное разрушение образца.

Используя этот алгоритм, была составлена программа для ЭВМ. С ее помощью был

произведен численный эксперимент применительно к ВП, состоящей из ПВ, совокупно включающих 300 ЭК.

Исследовали 4 варианта ВП (Вар 1 – Вар 4), каждый с параметрами, представленными в таблице. При выборе табличных значений исходили из общепринятых представлений об изменении структуры исследуемых волокон, полученных из тресты различной степени вылежки и из стеблей с отличающейся вариацией по диаметру [6–8, 11]. Предполагали, что при получении тресты не наблюдалась деструкция целлюлозы волокон. Поэтому средние значения упругих характеристик волокон остаются неизменными. Их стандартные отклонения в процессе вылежки возрастают из-за отличия реакции стеблей разного диаметра на действие

микроорганизмов. Основные изменения структуры связаны с уменьшением по мере вылежки сил связи между элементарными волокнами и ростом величины их относительного смещения. Одновременно с этим по мере вылежки наблюдается рост варьирования по указанным параметрам. С учетом сказанного образец волокна (Вар 1) относится к недолежалой тресте, состоящей из выровненных по диаметру стеблей. Волокно (Вар 2) тоже из недолежалой тресты, но при наличии стеблей с повышенной вариацией диаметра. Образец (Вар 3) получен из хорошо вылежанной тресты, состоящей из стеблей, мало отличающихся по диаметру, а волокно по (Вар 4) сходно по вылежке с (Вар 3), но получено из стеблей с большей вариацией диаметра.

Т а б л и ц а

Свойства и параметры, используемые при моделировании

Свойства и параметры структуры модели	Статистические параметры по вариантам пучков							
	Математическое ожидание				Стандартное отклонение			
	Варианты пучков							
	Вар 1	Вар 2	Вар 3	Вар 4	Вар 1	Вар 2	Вар 3	Вар 4
$K_{\text{впр } i_s}$ , Н/м	300	300	300	300	50	100	50	100
$F_{\text{тр } i_s}$ , Н	1,0	1,0	0,3	0,3	0,07	0,3	0,02	0,1
$\Delta_{\text{прсл } i_s}$ , мм	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$\Delta_{\text{см } i_s}$ , мм	0,5	0,5	2,0	2,0	0,03	0,15	0,07	0,7

Результаты моделирования представлены на рисунке 3 в виде зависимостей  $F(x)$ .

Сравнивая полученные модельные зависимости, выявляются различия по разрывному усилию волокон, полученных из стеблей тресты разной вылежки (Вар 1 и Вар 3). Из-за ослабления связей между ЭВ среднее значение разрывной нагрузки у волокон из недолежалой тресты значительно больше, чем у волокна из тресты нормальной вылежки.

Представляет интерес сравнение результатов разрыва волокон с равной разрывной нагрузкой, но имеющих разное варьирование по силам сцепления волокон, и их смещениям друг относительно друга. При таких условиях среднее значение разрывного усилия также снижается (Вар 1 и Вар 2; Вар 3 и Вар 4), одновременно с этим наблюдается рост общей деформации при разрыве. Этот рост объясняется повышенной вариацией сил связи и величиной участков контакта между волокнами.

Стоит обратить внимание на характер изменения силы сопротивления одноосной деформации моделируемой системы перед формированием максимального усилия для образца (Вар 3). На определенном участке усилие при растяжении стабилизируется и даже снижается, несмотря на растяжение волокон. Такая особен-

ность, вероятно, объясняется относительным смещением волокон, которое при определенном сочетании иных параметров ослабляет реакцию системы волокон при ее растяжении.

Следует отметить, что указанные изменения  $F(x)$  согласуются с реальными результатами испытаний льняных волокон при их одноосном растяжении и разрыве [24, 25].

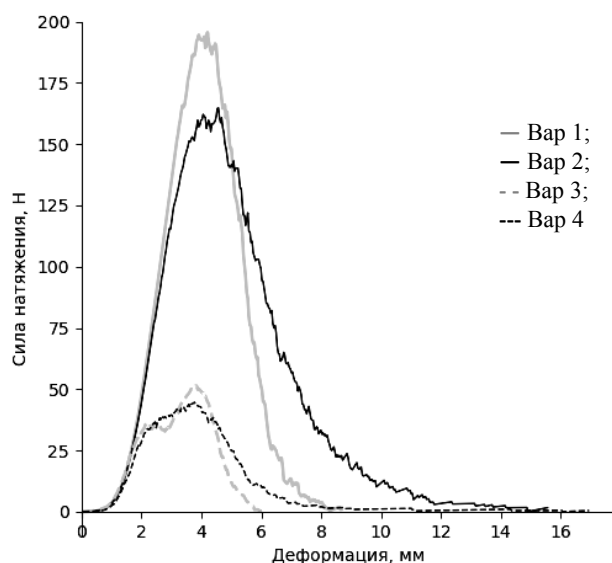


Рис. 3. Изменение усредненных по 300 элементарным комплексам сил натяжения в зависимости от деформации

## ВЫВОДЫ

1. При моделировании процесса одноосного растяжения и разрыва льняных волокон в виде параллелизованных ВП необходимо учитывать особенности внутренней структуры волокнистых пучков, полученных из стеблей, отличающихся по биологической спелости и диаметру, а также из тресты разной степени вылежки.

2. При растяжении и разрыве волокна, в условиях воздушно-сухого состояния и отсутствия деструкции целлюлозы в ЭВ, на величину деформации совокупности ВП оказывает влияние относительное продольное смещение ЭВ вследствие частичного разрушения окружающих ПВ тканей и клеящего комплекса, удерживающего волокна в пучках. При таких условиях процесс растяжения и разрыва ВП можно моделировать с использованием вероятностных моделей разрушения армированных дискретными волокнами композитов с применением сдвигового анализа.

3. При структурно-имитационном моделировании процесса разрыва совокупности ВП структуру каждой пряжи возможно представить в виде последовательно расположенных звеньев: линейного элемента с коэффициентом упругости, элемента «сухого трения», обеспечивающего формирование силы трения на ограниченной длине контакта, а также наличия прослабления в виде «зазора» определенного размера. При этом параметры каждого звена являются случайными величинами, изменяющимися по закону нормального распределения с наперед заданным средним значением и дисперсией.

4. Полученные по результатам моделирования зависимости усилия и деформации согласуются с экспериментальными и выявляют существенное влияние сухого трения на величину разрывного усилия и общей деформации дисперсии параметров совокупности ВП.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 53484–2009. Лен трепаный. Технические условия : изд. офиц. : дата введения 01.01.2011 / Федеральное агентство по техническому регулированию. М. : Стандартинформ, 2010. 13 с.
2. ГОСТ Р 53549–2009. Лен чесаный. Технические требования : изд. офиц. : дата введения 01.01.2011 / Федеральное агентство по техническому регулированию. М. : Стандартинформ, 2010. 20 с.
3. Голубков В. С., Пирогов К. М., Смушкович Б. Л. Испытательные машины в текстильном материаловедении. М. : Легпромбытиздат, 1988. 208 с.
4. Назаренко Е. В., Рыклин Д. Б., Соколов С. В. Имитационное моделирование процесса растяжения и разрыва пучка волокон // Вестник Витебского ГТУ. 2014. Вып. 27. С. 62–69.
5. Севостьянов П. А. Моделирование старения нитей и волокон методами компьютерной имитации // Технологии и качество. 2019. № 4(46). С. 36–39.
6. Ордина В. М. Структура лубоволокнистых растений и ее изменение в процессе переработки. М. : Легкая индустрия, 1978. 127 с.
7. Гребёнкин А. Н. Взаимосвязь структуры, свойств и технологии диспергирования лубоволокнистого сырья в ультразвуковых и гидродинамических полях : дис. ... д-ра техн. наук / Санкт-Петерб. гос. ун-т технологий и дизайна. СПб., 2003. 432 с.
8. Пашин Е. Л., Пашина Л. В. Агропромышленные технологии получения льна. В 4-х ч. Ч 3. Производство тресты : учебное пособие. Кострома : Костром. гос. технол. ун-т, 2013. 155 с.
9. Берестнёв В. А., Флексер Л. А., Лукьянова Л. М. Микроструктура волокон и элементарных нитей и особенности их разрушения. М. : Лег. и пищ. пром-сть, 1982. 248 с.
10. Вихарев С. М., Федосова Н. М., Батьков Н. В. Информационно-измерительная система на базе разрывной машины РМП-1 // Вестник Костромского государственного технологического университета. 2008. № 1. С. 78–80.
11. Перепелкин К. Е. Структура и свойства волокон. М. : Химия, 1985. 208 с.
12. Тихвинский С. Ф. Улучшение качества прядильного льна. Л. : Колос, 1978. 112 с.
13. Пестовская Е. А. Развитие теории и совершенствование технологических процессов мокрого прядения льна : монография. Иваново : ИГТА, 2010. 200 с.
14. Крагельский И. В. Физические свойства лубяного сырья. М.-Л. : Гизлегпром, 1939. 470 с.
15. Поздняков Б. П. Методы статистического контроля и исследования текстильных материалов. М. : Легкая индустрия, 1978. 280 с.
16. Прочность пучка волокон // Студопедия : сайт (2013–2020). URL: [https://studopedia.ru/6\\_25574\\_prochnost-puchka-voлокon.html](https://studopedia.ru/6_25574_prochnost-puchka-voлокon.html) (дата обращения: 06.11.2020).
17. Севостьянов П. А., Забродин Д. А., Дасюк П. Е. Компьютерное моделирование в задачах исследования текстильных материалов и производств. М. : Тисо Принт, 2014. 264 с.

18. Справочник по композиционным материалам : в 2 кн. : пер. с англ. / под ред. Дж. Любина ; под ред. Б. Э. Геллера. М. : Машиностроение, 1988. Кн. 1. 448 с. , Кн. 2. 584 с.
19. Landis C. M., Beyerlein I. J., McMeeking R. M. Micromechanical simulation of the failure of fiber reinforced composites // *J. Mech. Phys. Solids*. 2000. No 14. P. 621–648.
20. Rosen B. W. Tensile failure of fibrous composites // *AIAA J.* 1968. No 2. P. 1985–1991.
21. Прочность при растяжении КМ, армированных дискретными волокнами // *Студопедия* : сайт (2013–2020). URL: [https://studopedia.ru/14\\_110141\\_prochnost-pri-rastyazhenii-km-armirovannih-diskretnimi-voлокнами.html](https://studopedia.ru/14_110141_prochnost-pri-rastyazhenii-km-armirovannih-diskretnimi-voлокнами.html) (дата обращения: 06.11.2020).
22. Минин В. Н., Громов А. Н., Григорьев В. П. Дефектность и полимерные свойства полимерных материалов. Л. : Химия, 1986. 184 с.
23. Радов А. В., Севостьянов П. А. Исследование роли ньютоновского трения в некоторых волокнистых продуктах методами статистического компьютерного моделирования // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2008. № 1. С. 92–95.
24. Вихарев С. М., Федосова Н. М. Особенности представления экспериментальных данных при использовании модернизированной разрывной машины // *Научные труды молодых ученых КГТУ*. Вып. 10. Ч. 1. Кострома, 2009. С. 6–9.
25. Федосова Н. М., Вихарев С. М. Влияние технологических приемов и степени вылежки тресты на прочностные характеристики однотипного льняного волокна // *Вестник Костромского государственного технологического университета*. 2012. № 2. С. 23–25.

## REFERENCES

1. GOST R 53484–2009. Len trepanyj. Tekhnicheskie usloviya : izd. ofic. : data vvedeniya 01.01.2011 / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskemu regulirovaniyu. M. : Standartinform, 2010. 13 s.
2. GOST R 53549–2009. Len chesanyj. Tekhnicheskie trebovaniya : izd. ofic. : data vvedeniya 01.01.2011 / Federal'noe agentstvo po tekhnicheskemu regulirovaniyu. M. : Standartinform, 2010. 20 s.
3. Golubkov V. S., Pirogov K. M., Smushkovich B. L. Ispytatel'nye mashiny v tekstil'nom materialovedenii. M. : Legprombytizdat, 1988. 208 s.
4. Nazarenko E. V., Ryklin D. B., Sokolov S. V. Imitacionnoe modelirovanie processa rastyazheniya i razryva puchka volokon // *Vestnik Vitebskogo GTU*. 2014. Vyp. 27. S. 62–69.
5. Sevost'yanov P. A. Modelirovanie stareniya nitej i volokon metodami komp'yuternoj imitacii // *Tekhnologii i kachestvo*. 2019. № 4(46). S. 36–39.
6. Ordina V. M. Struktura lubovoloknistyh rastenij i ee izmenenie v processe pereabotki. M. : Legkaya industriya, 1978. 127 s.
7. Grebyonkin A. N. Vzaimosvyaz' struktury, svojstv i tekhnologii dispergirovaniya lubovoloknistogo syr'ya v ul'trazvukovyh i gidrodinamicheskikh polyah : dis. ... d-ra tekhn. nauk / Sankt-Peterb. gos. un-t tekhnologii i dizajna. SPb., 2003. 432 s.
8. Pashin E. L., Pashina L. V. Agropromyshlennye tekhnologii polucheniya l'na. V 4-h ch. Ch 3. Proizvodstvo tresty : uchebnoe posobie. Kostroma : Kostrom. gos. tekhnol. un-t, 2013. 155 s.
9. Berestnyov V. A., Flekser L. A., Luk'yanova L. M. Mikrostruktura volokon i elementarnyh nitej i osobennosti ih razrusheniya. M. : Leg. i pishch. prom-st', 1982. 248 s.
10. Viharev S. M., Fedosova N. M., Bat'kov N. V. Informacionno-izmeritel'naya sistema na baze razryvnoj mashiny RMP-1 // *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2008. № 1. S. 78–80.
11. Perepelkin K. E. Struktura i svojstva volokon. M. : Himiya, 1985. 208 s.
12. Tihvinskij S. F. Uluchshenie kachestva pryadil'nogo l'na. L. : Kolos, 1978. 112 s.
13. Pestovskaya E. A. Razvitie teorii i sovershenstvovanie tekhnologicheskikh processov mokrogo pryadeniya l'na : monografiya. Ivanovo : IGTA, 2010. 200 s.
14. Kragel'skij I. V. Fizicheskie svojstva lubyanogo syr'ya. M.-L. : Gizlegprom, 1939. 470 s.
15. Pozdnyakov B. P. Metody statisticheskogo kontrolya i issledovaniya tekstil'nyh materialov. M. : Legkaya industriya, 1978. 280 s.
16. Prochnost' puchka volokon // *Студопедия* : сайт (2013–2020). URL: [https://studopedia.ru/6\\_25574\\_prochnost-puchka-voлокна.html](https://studopedia.ru/6_25574_prochnost-puchka-voлокна.html) (дата обращения: 06.11.2020).
17. Sevost'yanov P. A., Zabrodin D. A., Dasyuk P. E. Komp'yuternoe modelirovanie v zadachah issledovaniya tekstil'nyh materialov i proizvodstv. M. : Tiso Print, 2014. 264 s.
18. Справочник по композиционным материалам : в 2 кн. : пер. с англ. / под ред. Д.ж. Любина ; под ред. В. Е. Геллера. М. : Машиностроение, 1988. Кн. 1. 448 с. , Кн. 2. 584 с.

19. Landis C. M., Beyerlein I. J., McMeeking R. M. Micromechanical simulation of the failure of fiber reinforced composites // *J. Mech. Phys. Solids*. 2000. No 14. P. 621–648.
20. Rosen B. W. Tensile failure of fibrous composites // *AIAA J.* 1968. No 2. P. 1985–1991.
21. Prochnost' pri rastyazhenii KM, armirovannyh diskretnymi voloknami // *Studopediya : sajt* (2013–2020). URL: [https://studopedia.ru/14\\_110141\\_prochnost-pri-rastyazhenii-km-armirovannyh-diskretnymi-voloknami.html](https://studopedia.ru/14_110141_prochnost-pri-rastyazhenii-km-armirovannyh-diskretnymi-voloknami.html) (data obrashcheniya: 06.11.2020).
22. Minin V. N., Gromov A. N., Grigor'ev V. P. Defektnost' i polimernye svoystva polimernyh materialov. L. : Himiya, 1986. 184 s.
23. Radov A. V., Sevost'yanov P. A. Issledovanie roli n'yutonovskogo treniya v nekotoryh voloknistyh produktah metodami statisticheskogo komp'yuternogo modelirovaniya // *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti*. 2008. № 1. S. 92–95.
24. Viharev S. M., Fedosova N. M. Osobennosti predstavleniya eksperimental'nyh dannyh pri ispol'zovanii modernizirovannoj razryvnoj mashiny // *Nauchnye trudy molodyh uchenyh KGTU. Vyp. 10. Ch. 1. Kostroma*, 2009. S. 6–9.
25. Fedosova N. M., Viharev S. M. Vliyaniye tekhnologicheskikh priemov i stepeni vylezhki tresty na prochnostnye harakteristiki odnotipnogo l'nyanogo volokna // *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2012. № 2. S. 23–25.

Статья поступила в редакцию 11.02.2021  
Принята к публикации 27.05.2021