

МЕХАНИЗАЦИЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 519.86:621.867.24

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ СЕТЧАТЫХ ЛЕНТ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ

В. А. ШАРШУНОВ, С. В. КУРЗЕНКОВ, М. В. ЦАЙЦ, А. Л. БОРИСОВ, Н. С. СЕНТЮРОВ

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: nikolay_senturov@rambler.ru

(Поступила в редакцию 05.03.2026)

В данной статье представлены результаты комплексного экспериментально-теоретического исследования механического поведения сетчатых лент из стекловолокна и полиэфира, подвергаемых комбинированному нагружению (растяжению с одновременным изгибом). Актуальность работы обусловлена необходимостью точного прогнозирования деформационных характеристик рабочих органов ленточных транспортеров, применяемых в сельскохозяйственном машиностроении, в частности для очистки вороха льнокостры. Применяемая при этом лента транспортера сетчатая, с прямоугольным или квадратным сечением. В ходе исследования была разработана специализированная лабораторная установка, позволяющая варьировать длину рабочего участка и величину вертикального перемещения нагружающего элемента. Авторами проведена калибровка зависимости силы натяжения от перемещения с учетом геометрической нелинейности системы. На основании полученных данных построены многофакторные математические модели относительного удлинения, учитывающие влияние длины образца, приложенной нагрузки и их взаимодействия. Проведенный дисперсионный анализ подтвердил статистическую значимость исследуемых факторов.

Сравнительный анализ материалов показал, что стекловолоконная сетка характеризуется высокой жесткостью и хрупким характером разрушения, в то время как полиэфирная лента проявляет большую пластичность и стабильность при деформации. Дополнительные испытания на разрыв на стенде Kason WDW-50S позволили определить предельные усилия и деформации, что легло в основу создания замкнутой математической модели системы. Сформированная поведенческая модель позволяет разграничивать рабочую область функционирования ленты и зону ее разрушения. Полученные результаты имеют практическую значимость для проектирования надежных транспортирующих систем, обеспечивающих стабильность технологического процесса за счет минимизации изменения геометрии ячеек сетки под нагрузкой.

Ключевые слова: сетчатая лента, стекловолокно, полиэфир, комбинированное нагружение, относительное удлинение, математическое моделирование, предел прочности, льнокострада, деформация, ленточный транспортер.

This article presents the results of a comprehensive experimental and theoretical study of the mechanical behavior of fiberglass and polyester mesh belts subjected to combined loading (tension and bending). The relevance of this study stems from the need to accurately predict the deformation characteristics of belt conveyor components used in agricultural engineering, particularly for cleaning flax bale heaps. The conveyor belt used in this application is mesh, with a rectangular or square cross-section. During the study, a specialized laboratory setup was developed that allowed for varying the length of the working section and the vertical displacement of the loading element. The authors calibrated the tension force-displacement relationship, accounting for the geometric nonlinearity of the system. Based on the obtained data, multivariate mathematical models of relative elongation were constructed, accounting for the influence of sample length, applied load, and their interaction. An analysis of variance confirmed the statistical significance of the studied factors.

A comparative analysis of the materials revealed that the fiberglass mesh is characterized by high rigidity and brittle fracture, while the polyester tape exhibits greater ductility and stability under deformation. Additional tensile tests on a Kason WDW-50S rig determined the ultimate forces and deformations, which formed the basis for the development of a closed-loop mathematical model of the system. The resulting behavioral model allows for delineation of the belt's operating range and its failure zone. The obtained results have practical significance for the design of reliable conveying systems that ensure process stability by minimizing mesh cell geometry changes under load.

Key words: mesh belt, fiberglass, polyester, combined loading, relative elongation, mathematical modeling, tensile strength, flax shive, deformation, belt conveyor.

Введение

Сетчатые ленты широко применяются в технологических установках, включая транспортные системы. Их механическое поведение при эксплуатации определяется не только свойствами материала, но и геометрией рабочего участка, а также характером нагружения.

В большинстве известных работ рассматривается либо чистое растяжение, либо упрощенные схемы нагружения. Однако в реальных условиях сетчатая лента подвергается комбинированному воздействию – растяжению и изгибу, что приводит к нелинейному распределению напряжений и дефор-

маций. И. Д. Симонов-Емельянов: исследовал параметры различных типов структур и их влияние на характеристики полимерных композитов со стекловолокном [1]. Современные исследователи (РФ): Г. З. Татлыева, Э. Ш. Теляков (изучали свойства стеклопластиков на основе конкретных марок смол, например, Norpol), а также группы из БНТУ и Ивановского государственного политехнического университета [2]. Jayabal et al.: определяли механические характеристики гибридных композитов (кокосовое волокно/стекловолокно) на полиэфирной матрице [4]. Aramide et al. (F. O. Aramide): проводили детальные тесты на растяжение, упругость и ударную вязкость при различных объемных долях стекловолокна в полиэфире [3]. (Aramide, Jayabal) фокусируются на математическом моделировании разрушения сеток. Разработаны модели, позволяющие предсказать точку разрыва полотна в зависимости от угла приложения нагрузки (эффект ориентации волокон). Ученые установили, что свойства полотна напрямую зависят от схемы плетения. Однонаправленные волокна дают максимальную прочность вдоль нитей (подчиняясь закону Гука), а хаотично распределенные маты обеспечивают изотропность (одинаковые свойства во всех направлениях), но с меньшими пиковыми показателями.

Стекловолокно лидирует в задачах, требующих жесткости и термостойкости, тогда как полиэфирные полотна незаменимы там, где важна эластичность и химическая инертность.

Для целей выделения минеральных примесей из вороха льнокустры транспортером с волнообразной сетчатой лентой [5, 6], ранее установлено, что требуется сетчатая лента с квадратным сечением $(0,8...1,0) \times (0,8...1,0)$ мм [7]. Квадратное сечение сетки из полиэфира получают основовязальный методом. Пучки полиэфирных волокон соединяются между собой на высокопроизводительном оборудовании. В отличие от простого переплетения, здесь используется дополнительная прошивная нить, которая «связывает» основу и уток, формируя четкий квадратный контур [8].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование деформации сетчатых лент, разработка калибровочной зависимости между перемещением и силой, построение многофакторной модели деформации, определение предельных характеристик материалов, формирование замкнутой математической модели системы.

Основная часть

Объектами исследований являлись два типа материалов: стекловолоконная и полиэфирная сетки.

Испытания проводились на лабораторной установке, включающей: фиксированные зажимы; регулируемый рабочий участок длиной $L = 0,02...0,16$ м; изменяемое воздействие на ленту Δ в пределах $0,3...0,5$ м; нагружающий элемент (ролик); систему измерения перемещения и силы; лабораторную установку исследования материалов на разрыв.

С целью исследования деформации ячеек сетчатой ленты при растяжении, а также определения предела прочности на разрыв по схеме, соответствующей характеру деформации сетчатой ленты в рабочей зоне транспортера с волнообразной сетчатой лентой, была изготовлена лабораторная установка (рис. 1) [9, 10].

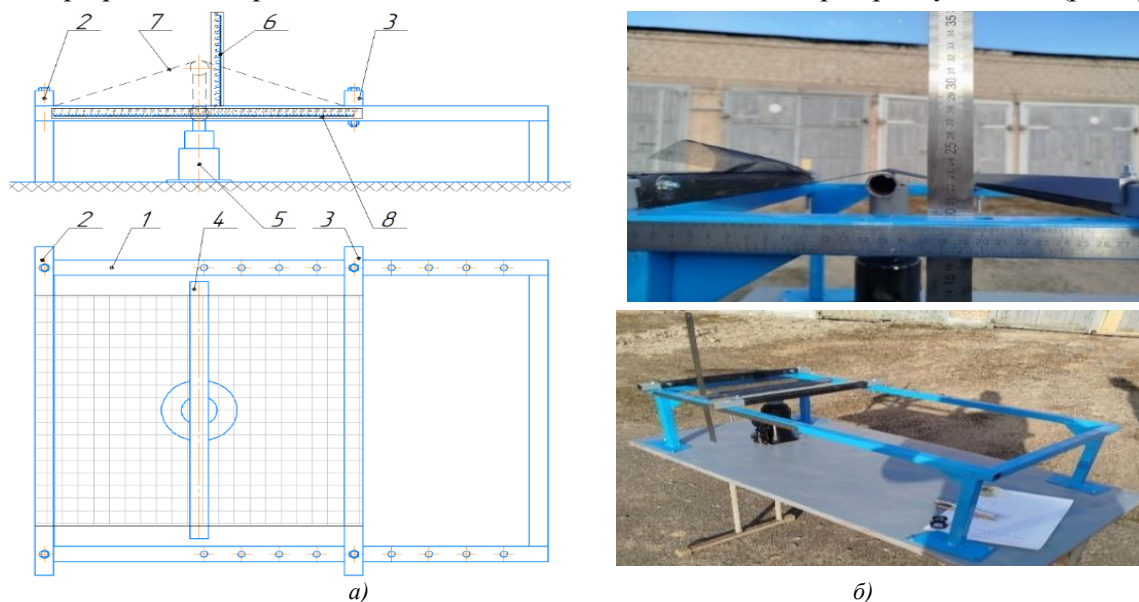


Рис. 1. Установка для исследования сетчатой ленты: а – схема установки; б – общий вид

На раме 1 устанавливались неподвижная 2 и переставная 3 прижимные планки с резиновыми уплотнениями. Переставная прижимная планка устанавливалась на расстоянии от неподвижной на расстоянии $0,3...0,5$ м, с шагом $0,1$ м. Подъемный механизм 5 с упором цилиндрического сечения 4 устанавливался в центре между прижимными планками, при этом упор цилиндрического сечения устанавливался параллельно прижимным планкам. Параллельно перемещению упора 4 нанесена

шкала 6 с нулевой отметкой в плоскости установки сетчатой ленты 7 в прижимные планки. На горизонтальный элемент рамы нанесена шкала 8 с нулевой отметкой в точке фиксации сетчатой ленты в неподвижной прижимной планке.

Опыты проводили следующим образом. В процессе проведения исследований переставная прижимная планка устанавливалась на расстоянии 0,30, 0,40 и 0,50 м от неподвижной прижимной планки. Зажимные устройства устанавливались в одной плоскости, и в них между эластичными уплотнениями укладывался фрагмент сетчатой ленты и фиксировался зажимными винтами. Измерение сечения ячейки сетчатой ленты производили в зажатом состоянии в центральной части половины исследуемого фрагмента с помощью лупы измерительной ЛИ-3-10^х (ТУ РБ-14541426.020-99).

Затем, подъемным механизмом, плавно перемещали в вертикальном направлении упор цилиндрического сечения, натягивая фрагмент сетчатой ленты. При этом фиксировали изменение сечения ячеек сетчатой ленты. Натяжение сетчатой ленты производили до момента ее разрыва, который фиксировался по шкале вертикальной линейки ГОСТ 5094–74 с точностью до 1 мм, что соответствовало величине Δ (рис. 2).

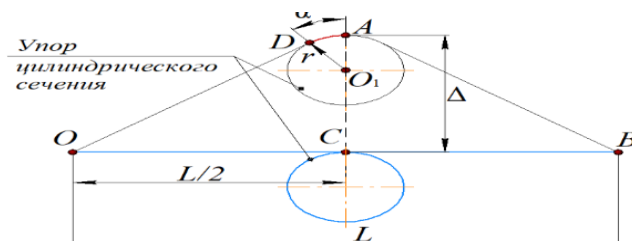


Рис. 2. Схема к определению удлинения сетчатой ленты

Длину L' деформированной сетчатой ленты определяли по зависимости:

$$L' = 2 \left(\sqrt{L^2 + (\Delta - r)^2} - r^2 + \pi r \alpha \right), \quad (1)$$

где L – длина фрагмента сетчатой ленты, м; Δ – высота подъема упора подъемного механизма в момент обрыва, м; r – радиус упора цилиндрического сечения, м; α – половина угла обхвата цилиндрического упора сетчатой ленты при ее растяжении, рад.

Относительное удлинение ϵ_c участка L сетчатой ленты определялось по зависимости:

$$\epsilon_c = \frac{L' - L}{L} = \frac{L'}{L} - 1. \quad (2)$$

Нагрузка прикладывалась через перемещение Δ , что требует калибровки.

Зависимость силы (H) от перемещения определялась экспериментально и аппроксимировалась выражением (табл. 1):

$$F = a_1 \cdot \Delta + a_2 \cdot \Delta^2 + a_3 \cdot L + a_4 \cdot \Delta \cdot L + a_5 \quad (3)$$

Аппроксимация экспериментальных данных позволила выявить следующие зависимости:

– для стекловолокна

$$F(\Delta, L) = (800 - 600L) \cdot \Delta + 4000 \cdot \Delta^2; \quad (4)$$

– для полиэфира

$$F(\Delta, L) = (500 - 400L) \cdot \Delta + 2500 \cdot \Delta^2. \quad (5)$$

Полученные зависимости характеризуются коэффициентом детерминации $R^2 > 0,99$.

Анализ этих зависимостей позволил на основании их динамики выявить важные характеристики исследуемых материалов: стекловолокно – это «жесткий» материал, при небольших Δ наблюдался линейный рост силы, а при больших Δ – резкое и нелинейное ее увеличение; полиэфир – пластичный материал, при использовании которого наблюдался плавный рост силы и меньшая его чувствительность при изменении Δ .

Таблица 1. Результаты исследования усилия натяжения сетчатой ленты от перемещения Δ , аппроксимированные выражением (3)

Δ , м	Стекловолокно			Полиэфир		
	$L=0,30$, м	$L=0,40$, м	$L=0,50$, м	$L=0,30$, м	$L=0,40$, м	$L=0,50$, м
0,02	18	15	12	10	8	6
0,04	38	32	26	22	18	14
0,06	62	52	42	36	30	24
0,08	90	75	60	52	44	36
0,10	125	105	85	70	60	50
0,12	165	140	115	90	78	66
0,14	210	180	150	115	100	85
0,16	260	225	190	140	125	105

Исследования деформаций ячеек сетчатой ленты при приведенном характере нагружения показали, что их растяжимость как по ширине, так и по длине изменялась несущественно и находилась на уровне погрешности измерений.

Характер разрыва сетчатых лент из стекловолокна и полиэфира отличается мгновенностью (рис. 3, а) по всей ширине и постепенностью (рис. 3, б), начиная с края.



Рис. 3. Разрыв сетчатой ленты из стекловолокна (а), разрыв сетчатой ленты из полиэфира (б)

Стекловолокно разрывается мгновенно, что характеризует непредсказуемость использования этого материала, полиэфир более вязкий материал, поэтому его разрыв происходит постепенно и его можно спрогнозировать и избежать.

Проведены дополнительные испытания, позволившие определить: усилие при разрыве $F_{кр}$; удлинение при разрыве; предельную деформацию. Для определения усилия при разрыве сетчатой ленты исследования проводили на испытательном стенде Kason WDW-50S. Испытательный стенд основан на создании деформации образца путем перемещения траверсы с заданной скоростью и одновременном измерении нагрузки с помощью датчиков. Он работает под управлением компьютера с программным обеспечением MaxTest (рис. 4), которое обрабатывает данные в реальном времени, строит графики нагружения и рассчитывает физико-механические характеристики.

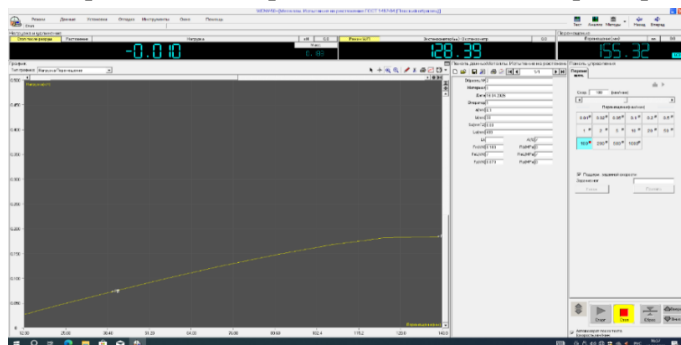


Рис. 4. Программное обеспечение и вариант отображения данных в ней

В эксперименте исследуемый фрагмент сетчатой ленты шириной 0,03 м помещался между подвижной и неподвижной траверсами в сменные захваты для фиксации плоского образца. Перемещением подвижной траверсы создавалась нагрузка (растяжение) на испытуемый образец. При этом усилие фиксировалось высокоточным тензодатчиком, а деформация образца – с помощью датчика перемещения (энкодера) (табл. 2).

Стекловолоконная лента значительно прочнее полиэфирной. Ее средние показатели усилия при разрыве варьируются от 168,67 до 214,67 Н. У стекловолоконной ленты наблюдается больший разброс значений стандартного отклонения выборки (до 24,71), что может быть связано со спецификой структуры волокна или его хрупкостью при фиксации образцов (табл. 3). Стекловолоконная лента обладает высокой эластичностью при растяжении. При максимальной длине (0,4 м) её удлинение составляет в среднем 0,105 м.

Полиэфирная лента демонстрирует идеальную линейную связь по усилию ($R^2 = 1$), что говорит о высокой однородности материала или стабильности условий испытаний (табл. 4, 5).

Таблица 2. Результаты исследований усилия при разрыве стекловолоконной сетчатой ленты

Показатели	Уровни варьирования фактора (длина фрагмента сетчатой ленты L , м)				Число уровней		Графическая интерпретация	
	0,1	0,2	0,3	0,4	$n_{yp} =$	4	<div><div>$F, \text{ Н}$</div><div>$F = 14,3L + 155,83$ $R^2 = 0,955$</div></div>	
$F, \text{ Н}$	168	182	200	200	$\Phi = (\Sigma \Sigma F)^2 / N =$			
	164	200	190	234	$= 440450,08$			
	174	185	192	210				
n	3	3	3	3	$N =$	12		
ΣF	506,0	567,0	582,0	644,0	$\Sigma \Sigma F =$	2299,0		
ΣF^2	85396,0	107349,0	112964,0	138856,0	$\Sigma \Sigma F^2 =$	444565,0		
$Л = (\Sigma F^2) / n$	85345,3	107163,0	112908,0	138245,3	$\Sigma Л =$	443661,7		
$\Phi = \Sigma F / n$	168,67	189,00	194,00	214,67				
S	7,12	13,64	7,48	24,71	Формула			
Δx	5,46	10,46	5,74	18,95	Коэффициент детерминации		$R^2 = 0,955$	

Таблица 3. Результаты исследований удлинения при разрыве стекловолоконной сетчатой ленты

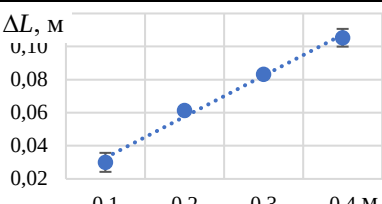
Показатели	Уровни варьирования фактора (длина фрагмента сетчатой ленты L , м)				Число уровней		Графическая интерпретация
	0,1	0,2	0,3	0,4	$n_{ур} =$	4	
ΔL , м	0,036	0,061	0,084	0,102	$\Phi = (\sum \Delta L)^2 / N =$		<div><div>ΔL, м</div><div>$0,10$ $0,08$ $0,06$ $0,04$ $0,02$</div><div></div><div>$0,1$ $0,2$ $0,3$ $0,4$ м</div></div>
	0,026	0,061	0,083	0,111	$=$ 0,05880		
	0,028	0,062	0,083	0,103			
n	3	3	3	3	$N =$	12	
$\sum \Delta L$	0,090	0,184	0,250	0,316	$\sum \Delta L =$	0,8400	
$\sum \Delta L^2$	0,0028	0,0113	0,0208	0,0333	$\sum \Delta L^2 =$	0,0682	
$Л = (\sum \Delta L^2) / n$	0,0027	0,0113	0,0208	0,0333	$\sum Л =$	0,0681	
$\Phi = \sum \Delta L / n$	0,03000	0,06133	0,08333	0,10533			
S	0,00748	0,00082	0,00082	0,00698	Формула		
Δx	0,00574	0,00063	0,00063	0,00535	Коэффициент детерминации		
					$R^2 = 0,992$		

Таблица 4. Результаты исследований усилия при разрыве полиэфирной сетчатой ленты

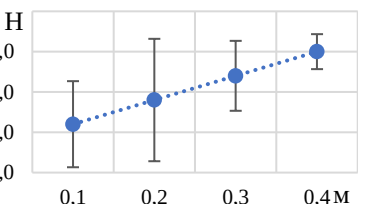
Показатели	Уровни варьирования фактора (длина фрагмента сетчатой ленты L , м)				Число уровней		Графическая интерпретация
	0,1	0,2	0,3	0,4	$n_{ур} =$	4	
F , Н	85	82	102	104	$\Phi = (\Sigma \Sigma F)^2 / N =$		<div>F, Н</div> 
	90	104	94	96	$=$		
	71	78	86	100	$=$		
n	3	3	3	3	$N =$	12	
ΣF	246,000	264,000	282,000	300,000	$\Sigma \Sigma F =$	1092,0	
ΣF^2	20366,0	23624,0	26636,0	30032,0	$\Sigma \Sigma F^2 =$	100658,0	
$Л = (\Sigma F^2) / n$	20172,0	23232,0	26508,0	30000,0	$\Sigma Л =$	99912,0	
$\Phi = \Sigma F / n$	82,00	88,00	94,00	100,00			
S	13,93	19,80	11,31	5,66	Формула		$F = 6L + 76$
Δx	10.68	15.18	8.67	4.34	Коэффициент детерминации		$R^2 = 1$

Таблица 5. Результаты исследований удлинения при разрыве полиэфирной сетчатой ленты

Показатели	Уровни варьирования фактора (длина фрагмента сетчатой ленты L , м)				Число уровней		Графическая интерпретация
	0,022	0,034	0,058	0,075	$n_{ур} =$	4	
ΔL , м	0,015	0,04	0,053	0,074	$\Phi = (\Sigma \Delta L)^2 / N =$		<div>ΔL, м</div> <div>$=$</div> <div>0,0266</div>
	0,03	0,039	0,05	0,075	$=$		
	3	3	3	3			
	n	0,067	0,113	0,161	0,224	$N =$	
$\Sigma \Delta L$	0,0016	0,0043	0,0087	0,0167	$\Sigma \Sigma \Delta L =$	0,5650	
$\Sigma \Delta L^2$	0,0015	0,0043	0,0086	0,0167	$\Sigma \Sigma \Delta L^2 =$	0,0313	
$Л = (\Sigma \Delta L^2) / n$	0,02233	0,03767	0,05367	0,07467	$\Sigma Л =$	0,0311	
$\Phi = \Sigma \Delta L / n$	0,01061	0,00455	0,00572	0,0082			
S	0,00748	0,00082	0,00082	0,00698	Формула		
Δx	0,00574	0,00063	0,00063	0,00535	Коэффициент детерминации		
						$R^2 = 0.994$	

Полиэфирная лента менее податлива: при той же длине 0,4 м она удлиняется на 0,075 м.

Математические модели ($R^2 \geq 0,99$) (табл. 3 и 5) позволяют с высокой точностью прогнозировать деформацию материала при любой длине фрагмента в исследуемом диапазоне.

Относительное удлинение определялось по зависимости (2).

Таблица 6. Сводные данные результатов исследований

Материал: стекловолокно – 1, полиэфир – 2	Длина фрагмента (начальная), м	Усилие при разрыве, Н	Удлинение фрагмента при разрыве, м
1	0,1	168,67	0,03
1	0,2	189	0,0613
1	0,3	194	0,0833
1	0,4	214,67	0,1053
2	0,1	82	0,0223
2	0,2	88	0,0377
2	0,3	94	0,0537
2	0,4	100	0,0747

Применялись: регрессионный анализ, коэффициент детерминации R^2 , дисперсионный анализ, оценка стандартных отклонений [11, 12].

Получены зависимости:

– стекловолокно:

$$\varepsilon_c = 0,52 \cdot L + 0,0018 \cdot F + 0,0025 \cdot L \cdot F + 1,12; \quad (6)$$

– полиэфир:

$$\varepsilon_c = 0,38 \cdot L + 0,0022 \cdot F + 0,0016 \cdot L \cdot F + 1,05. \quad (7)$$

Все факторы L , F , $L \cdot F$ статистически значимы.

Наибольший вклад в отклик для стекловолокна оказывает взаимодействие факторов, а для полиэфира – нагрузка.

Модели предельной деформации для исследуемых материалов искали в виде:

$$\varepsilon_{кр} = c_0 + c_1 \cdot L; \quad (8)$$

$$F_{кр} = d_0 + d_1 \cdot L. \quad (9)$$

где c_0 – предельная деформация при $L \rightarrow 0$; c_1 – коэффициент снижения деформируемости при увеличении длины; d_0 – базовая прочность материалов; d_1 – вклад длины (эффект перераспределения нагрузки).

Эксперименты показали, что при увеличении длины рабочего участка возрастает неоднородность напряжений, усиливаются краевые эффекты, возникает преждевременная локализация деформации.

Были получены следующие адекватные модели:

– для стекловолокна:

$$\varepsilon_{кр} = 0,33 - 0,17 \cdot L; \quad (10)$$

$$F_{кр} = 120 + 280 \cdot L, \quad (11)$$

– для полиэфира:

$$\varepsilon_{кр} = 0,24 - 0,13 \cdot L; \quad (12)$$

$$F_{кр} = 80 + 200 \cdot L. \quad (13)$$

Так как коэффициент детерминации этих моделей составил $R^2 > 0,95$, был сделан вывод о высокой устойчивости и адекватности моделей и возможности использования их при проектировании сельскохозяйственных машин, в частности – ленточных транспортеров.

На основании проведенных исследований была выработана поведенческая модель использования исследуемых материалов в качестве транспортируемых лент:

$$\Phi(L, F) = \varepsilon_c(L, F) - \varepsilon_{кр}(L), \quad (14)$$

где $\Phi < 0$ – рабочая область работы ленты; $\Phi = 0$ – граница разрушения; $\Phi > 0$ – разрушение ленты.

Заключение

Результаты исследований сетчатых лент из стекловолокна и полиэфира показывают, что: деформация сетчатой ленты определяется не только нагрузкой, но и длиной рабочего участка; взаимодействие факторов L и F является ключевым и отражает перераспределение напряжений; стекловолоконная сетка демонстрирует более жесткое и нелинейное поведение; полиэфирная сетка характеризуется большей пластичностью и стабильностью.

Растяжимость ячеек при исследуемых нагрузках на сетчатую ленту как по ширине, так и по длине находится на уровне погрешности измерений, поэтому можно говорить о том, что в рамках изучаемых режимов работы сетчатой ленты ее растяжимость практически не влияет на просыпаемость примесей через ленту.

Дополнительные испытания на разрыв позволили доопределить модель, введя ограничения по прочности. Система описывается уравнениями:

$$F = f(\Delta, L),$$

$$\varepsilon_c = f(L, F),$$

$$\Phi(L, F) < 0.$$

1. Разработана лабораторная установка для исследования сетчатых лент. 2. Выполнена калибровка зависимости силы от перемещения. 3. Построена многофакторная модель деформации. 4. Проведен корреляционный анализ, подтвердивший значимость факторов. 5. Определены предельные характеристики материалов. 6. Сформирована замкнутая математическая модель системы.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании ленточных систем, в том числе для очистки вороха льнокостры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Симонов-Емельянов, И. Д. Построение структур полимерных композиционных материалов и их свойства / И. Д. Симонов-Емельянов. – М.: МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 2005. – 64 с.
2. Татлыева, Г. З. Исследование физико-механических свойств стеклопластиков на основе полиэфирных смол марки Norpol / Г. З. Татлыева, Э. Ш. Теляков // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 1. – С. 138–142.
3. Aramide F. O., Oladele I. O., Folorunso D. O. Evaluation of the Mechanical Properties of Glass Fibre Reinforced Polyester Composites // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2014. – Vol. 2, No. 2. – P. 112–118. [DOI: 10.4236/jmmce.2014.22015].
4. Jayabal S., Sathiyamurthy S., Loganathan K. T. Effect of Glass Fiber Orientation on Mechanical Properties of Glass-Polyester Composites // International Journal of Applied Engineering Research. – 2012. – Vol. 7, No. 11. – P. 1245–1252.
5. Патент № 2752475 С1 Российской Федерации, МПК B07B 4/08, B07B 9/00, D01B 1/10. Устройство для очистки льнокостры: № 2021100782: заявл. 15.01.2021; опубл. 28.07.2021 / М. В. Симонов, В. А. Шаршунов, Н. С. Сентюров, М. В. Цайц; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет».
6. Поисковые эксперименты процесса выделения минеральных примесей из вороха льнокостры транспортером с волнообразной колеблющейся сетчатой лентой / В. А. Шаршунов, А. Н. Карташевич, В. Н. Босак, Н. С. Сентюров // Агропанорама. – 2023. – № 3(157). – С. 8–13. – DOI 10.56619/2078-7138-2023-157-3-8-13.
7. Шаршунов, В. А. Обоснование размера ячеек для выделения минеральных примесей из льнокостры / В. А. Шаршунов, Н. С. Сентюров // Инновационная деятельность в модернизации АПК: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 частях, Курск, 07 декабря 2016 года – 09 2017 года. Том Часть 1. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия им. профессора И. И. Иванова, 2017. – С. 356–359.
8. Григорьев, Ю. Н. Геосинтетические материалы в дорожном строительстве / Ю. Н. Григорьев, А. П. Лупанов. – М.: МАДИ, 2011. – 112 с.
9. Аналитические исследования рабочей зоны эксцентрика в устройстве очистки льнокостры с колеблющейся сетчатой лентой / В. А. Шаршунов, С. В. Курзенков, М. В. Цайц, Н. С. Сентюров // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2026. – № 1. – С. 127–132.
10. Теоретическое обоснование кинематики эксцентрикового воздействия на сетчатую ленту транспортера для очистки вороха льнокостры / В. А. Шаршунов, С. В. Курзенков, М. В. Цайц, Н. С. Сентюров // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2026. – № 1. – С. 100–105.
11. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Родин. – Л.: Колос, 1972. – 168 с.
12. Митков, А. Л. Статистические методы в сельхозмашиностроении / А. Л. Митков. – Москва, 1978. – 360 с.