

УДК 677.017.27

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ НАСЛЕДСТВЕННОЙ ВЯЗКОУПРУГОСТИ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ  
ТРИКОТАЖНЫХ КОМПРЕССИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

**THE APPLICATION OF THE COMPLETE VISCOELASTICITY THEORY  
FOR THE PRESSURE CHANGES APPRISAL  
OF KNITTED COMPRESSIVE CLOTHES**

*М.А. МАРИНКИНА, М.С. БОГАТЫРЕВА, Л.Л. ЧАГИНА, С.Е. ПРОТАЛИНСКИЙ*  
*M.A. MARINKINA, M.S. BOGATYRYOVA, L.L. CHAGINA, S.E. PROTALINSKY*

**(Костромской государственной университет)**  
**(Kostroma State University)**  
E-mail: lyu-chagina@yandex.ru

*В статье представлены результаты исследования релаксационных свойств льняных компрессионных изделий с использованием теории наследственной вязкоупругости. Полученные релаксационные параметры позволяют спрогнозировать потенциальную возможность изделий сохранять первоначальный уровень давления, оказываемый ими на тело человека (например, спортсмена).*

*The article presents the research results of the linen compressive clothes relaxation properties, by usage of the complete viscoelasticity theory. The received relaxation data offer an opportunity to predict the clothes potency to keep the original human body pressure level (for example, sportsmen).*

**Ключевые слова:** теория наследственной вязкоупругости, релаксационные свойства, льняные компрессионные изделия, уровень давления.

**Keywords:** complete viscoelasticity theory, relaxation properties, linen compressive clothes, pressure level.

Характеристики растяжимости, получаемые при приложении нагрузок, которые меньше разрывных, определяют условия использования трикотажа для различных видов изделий. Данные воздействия вызы-

вают возникновение релаксационных процессов, приводящих к снижению физико-механических свойств изделий.

Одним из наиболее значимых показателей качества компрессионных изделий яв-

ляется сохранение первоначального состояния и обеспечение заданного уровня компрессии при эксплуатации. Необходимое давление на тело человека обеспечивается свойствами полотен и размерами изделия. Высокая остаточная деформация при эксплуатационных нагрузках, значительное изменение линейных размеров после стирки препятствуют сохранению первоначальных размеров изделий и структуры трикотажного полотна, что негативно сказывается на компрессионных свойствах изделий в процессе их эксплуатации [1].

На сегодняшний момент не существует методов, позволяющих произвести точную оценку поведения материала при эксплуатации изделия и прогнозирование изменения давления изделия на тело человека. В ряде исследований представлена необходимость учета релаксационных характеристик полотен при оценке качества компрессионных изделий [2], [3]. В существующих методах либо не учитывается связь нагрузки, оказываемой на трикотажное изделие, с давлением на тело человека (спортсмена), либо не принимается во внимание форма части тела, на которую оказывается компрессионное воздействие. Кроме того, измерения проводятся непосредственно на человеке в индивидуальном порядке, что затрудняет прогнозирование поведения изделий в зависимости от их конструктивного решения и вида применяемых трикотажных полотен.

Теорией, позволяющей описывать релаксационные процессы сложных материалов, независимо от длительности проведения эксперимента, прогнозировать их свойства, является теория наследственной вязкоупругости. Согласно этой теории упругие силы зависят не только от мгновенно полученных смещений, но и от предшествующих деформаций, которые оказывают тем меньшее влияние на них, чем больше времени прошло с момента предшествующих деформаций.

В процессе релаксации наблюдается уменьшение усилия в материале при постоянной деформации с изменением времени. Уравнение состояния пряжи теории наслед-

ственной вязкоупругости для режима заданных деформаций имеет вид:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E - \varepsilon_0 E \int_0^t K(\tau) d(\tau), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  – величина деформации при релаксации;  $t$  – момент времени, в который необходимо вычислить напряжение,  $\sigma$ ;  $E$  – мгновенный модуль упругости, МПа;  $K(\tau)$  – ядро релаксации,  $\tau^{-1}$ ;  $\tau$  – переменная интегрирования.

Установлено, что для описания релаксационных свойств текстильных материалов целесообразно применять ядро Ржаницина А.А., приведенное к двухпараметрическому виду [4]:

$$K(t) = (1 - \alpha) B^{-\alpha} t^{\alpha-1} \alpha e^{-\left(\frac{t}{B}\right)^{-\alpha}}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – параметр ядра релаксации, характеризующий спектр релаксации, то есть предел релаксационной способности материала;  $B$  – параметр ядра релаксации, имеющий смысл времени, по истечении которого напряжение пряжи изменяется в  $k$  раз, где

$$k = 0,37 + 0,63\alpha, \quad (3)$$

$t$  – рассматриваемый момент времени.

Уравнение состояния (1) для режима постоянной деформации с учетом (2) будет иметь вид:

$$\sigma(\tau) = \varepsilon_0 E - \varepsilon_0 E (1 - \alpha) \left( 1 - e^{-\left(\frac{t}{B}\right)^{-\alpha}} \right). \quad (4)$$

Представленную зависимость можно применить для оценки релаксационной способности трикотажных полотен, в частности, используемых при изготовлении компрессионных изделий.

В качестве объектов исследования выбраны льняные трикотажные полотна с вложением и без вложения полиуретановых (п/у) нитей. Суть методики оценки изменения давления компрессионного изделия [5] заключается в следующем. Объект исследования располагается на устройстве, на датчике фиксируется первоначальный уро-

вень нагрузки изделия на рабочую часть (в дальнейшем нагрузки). Далее через установленные промежутки времени снимаются показания нагрузки с датчика. Измерения производятся до тех пор, пока значения нагрузки не перестанут изменяться. Затем изделие снимается с формы.

Длина поперечного сечения при соответствующей нагрузке находится по графику, составленному для конкретного прибора. Расчет давления осуществляется по формуле, предложенной В.Н. Филатовым [6].

Результат исследования отображается в виде графиков зависимости нагрузки, оказываемой на пробы, от времени испытания.

Для расчета параметров релаксации экспериментальные кривые разбивались тремя точками на два отрезка (рис. 1 – расстановка точек на кривой релаксации на примере пробы из льняного трикотажного полотна шириной 50 мм с полиуретановыми нитями).

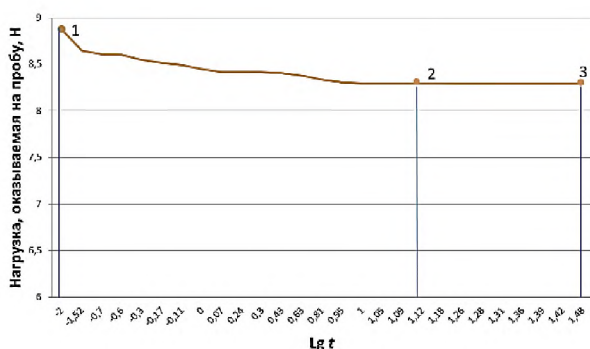


Рис. 1

Выбор точек осуществляли произвольно, с последующей корректировкой в зависимости от результатов аппроксимации.

Параметр  $\alpha$ , характеризующий спектр релаксации, рассчитывали следующим образом [7]:

$$\alpha = \frac{\ln \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_2}}{\ln \left( \frac{t_3}{t_2} \right)}, \quad (5)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – значения нагрузки в точках 1, 2, 3, Н;  $t_2, t_3$  – время эксперимента в соответствующей точке графика, ч.

Параметр  $B$ , имеющий смысл времени, по истечении которого напряжение полотна изменяется в  $k$  раз, рассчитывали по формуле:

$$B = \frac{t}{\left[ \ln \left( \frac{1 - \alpha}{\sigma_1 - \alpha} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}}}, \quad (6)$$

где  $t$  – конечный момент времени испытания, ч.

Для расчета параметра  $E$  использовали формулу:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – напряжение в образце при  $t=0$ , Н;  $\varepsilon$  – величина деформации при  $t=0$ , мм.

В табл. 1 представлен пример расчета параметров релаксации проб.

Таблица 1

Вид пробы	Ширина пробы, мм	Период испытания относительно мокрых образцов	Моменты времени, соответствующие точкам на графике, ч			$\alpha$	B, ч	k	$\varepsilon_p, \text{мм}$	E, Н/мм
			$t_1$	$t_2$	$t_3$					
Лен без п/у нитей	60	До	0	13	30	0,814	461,64	0,883	258,8	0,022
		После	0	13	30	0,262	22265	0,535	255,3	0,024
Лен с п/у нитями	60	До	0	13	30	0,343	1898985	0,586	257,8	0,026
		После	0	13	30	0,524	1117	0,700	255,2	0,028

Ошибки аппроксимации для всех образцов не превышают 10%, следовательно, модель релаксации, изначально предложенная для нитей, справедлива и для трикотажных полотен.

Параметры релаксации позволяют судить о характере поведения полотна при

проведении эксперимента. Параметр  $\alpha$  отражает потенциальную способность пробы к релаксации. Чем  $\alpha$  ближе к 1, тем вероятнее развитие необратимых деформаций в материале, тем ниже его релаксационная способность. Высокая релаксационная способность материала более предпочтительна

для компрессионных изделий, так как трикотажное полотно в этом случае имеет более подвижную структуру, лучше адаптируется к форме тела и к движениям человека. Подвижность структуры обеспечивается не только межмолекулярными связями льняной пряжи и полиуретановых нитей, но и петельной структурой полотна и процентным содержанием его компонентов. Изделия, изготовленные из полотен с высокой релаксационной способностью, обеспечивают свободу движения человека (например, спортсмена), сохраняя при этом компрессионные свойства.

Параметр В характеризует время, в течение которого напряжение в полотне из-

менится в  $k$  раз. Чем выше значение В, тем дольше потенциальная длительность сохранения изделием компрессионных свойств.

Трикотажное полотно имеет более сложную структуру, чем пряжа или нить, следовательно, параметры  $\alpha$  и В по отдельности не могут объективно охарактеризовать его деформационные свойства. Для комплексного анализа релаксационной способности полотен и потенциальной длительности сохранения в нем напряжений целесообразно учитывать значение показателя  $k$ . В табл. 2 представлены результаты расчета показателя  $k$  по формуле (5), полученные для разных видов образцов, до и после мокрой обработки.

Таблица 2

Вид пробы	Ширина пробы, мм	Период испытания относительно мокрых обработок					
		$k$		$\epsilon_p, \text{мм}$		$E, \text{Н/мм}$	
		до	после	до	после	до	после
Лен без п/у нитей	50	0,883	0,380	276,8	272,2	0,029	0,031
Лен без п/у нитей	55	0,883	0,372	268,2	266,3	0,024	0,021
Лен без п/у нитей	60	0,883	0,535	258,8	255,3	0,022	0,024
Лен без п/у нитей	65	0,883	0,969	246,6	256,5	0,021	0,021
Лен без п/у нитей	70	0,883	0,981	239,2	237,5	0,022	0,019
Лен с п/у нитями	50	0,586	0,476	275,9	271,3	0,032	0,033
Лен с п/у нитями	55	0,586	0,914	267,3	263,9	0,027	0,034
Лен с п/у нитями	60	0,586	0,700	257,8	255,2	0,026	0,028
Лен с п/у нитями	65	0,586	0,824	249,4	245,2	0,020	0,026
Лен с п/у нитями	70	0,586	0,981	239,5	238,7	0,020	0,026

Результаты исследований показали, что до мокрых обработок полотна с одинаковыми структурными характеристиками и волокнистым составом обладают одинаковым уровнем релаксационной способности. При этом вероятность накопления необратимых деформаций у льняных проб выше, чем у проб с вложением полиуретановых нитей ( $k=0,813$  и  $k=0,343$  соответственно). Скорость релаксации льняных проб достаточно высокая. Через относительно короткий промежуток времени напряжения в данных полотнах уменьшаются на 11,7%. Достижение изделиями с такими параметрами необходимого уровня давления на тело человека сопровождается жесткостью их посадки, что вызывает дискомфорт у спортсмена.

Более подвижная структура полотен с вложением полиуретановых нитей обеспечивает значительно больший период релак-

сации. Сохранение такими пробами напряжений в течение всего периода эксплуатации обеспечивает не только сохранение первоначального уровня давления, но и комфортность компрессионных изделий с соответствующими параметрами во время их носки.

После мокрых обработок в характере поведения проб наблюдаются значительные изменения. Релаксационная способность полотен без вложения полиуретановых нитей с шириной от 50 до 60 мм возрастает, в то же время снижается скорость их релаксации. Данные характеристики предпочтительны для компрессионных изделий. Однако изменения свойств этих проб вызваны увеличением подвижности структуры полотен, используемых для их изготовления, за счет набухания пряжи при стирке и ослабления связей в трикотажных петлях, вызванных в том числе и растяже-

нием полотен при проведении первого этапа эксперимента. Пробы теряют свои первоначальные свойства, что в дальнейшем может сказаться на их долговечности.

Более стабильно после мокрых обработок ведут себя пробы шириной 65 и 70 мм. На первом этапе испытаний они подвергались меньшим растягивающим нагрузкам, стирка повлияла на первоначальные свойства полотен в меньшей степени. Релаксационная способность данных проб и потенциальное время сохранения ими напряжений остались практически на прежнем уровне.

У пробы шириной 50 мм с вложением полиуретановых нитей после мокрых обработок наблюдается улучшение потенциальной релаксационной способности и поддержание времени сохранения напряжений на первоначальном уровне. Можно говорить о том, что компрессионные изделия, изготовленные из данного полотна и оказывающие соответствующий уровень давления (2,061 кПа), сохраняют необходимый уровень давления на протяжении всего периода эксплуатации, в том числе после проведения мокрых обработок. В то же время такие изделия являются удобными, адаптируясь к движениям человека (спортсмена).

У остальных проб с вложением полиуретановых нитей после мокрых обработок снизились как релаксационная способность, так и длительность сохранения напряжений в полотне. Однако высокие значения показателя  $k$  говорят о потенциальном изменении первоначального давления изделий на тело человека не более чем на 30%. Целесообразно проведение опытной носки компрессионных изделий с соответствующими параметрами для получения информации об их комфортности для человека.

## ВЫВОДЫ

1. Для оценки релаксационных процессов в компрессионных изделиях возможно применение базовых положений теории наследственной вязкоупругости.

2. С использованием разработанного метода проведены испытания проб, изготовленных из льняных трикотажных полотен с вложением и без вложения полиуретановых нитей, осуществлен расчет параметров уравнения состояния теории наследственной вязкоупругости.

3. Установлено, что кривые релаксации являются источником получения информации о поведении полотен при их эксплуатации и позволяют спрогнозировать изменение первоначального уровня давления. Ошибка аппроксимации кривых релаксации проб не превышает 10%, что позволяет сделать вывод о возможности применения данной теории для трикотажных полотен.

4. Получено, что после мокрых обработок снижаются релаксационная способность компрессионных изделий и длительность сохранения напряжений в полотне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Маринкина М.А., Чагина Л.Л., Проталинский С.Е., Богатырева М.С. К вопросу учета стабильности нагрузки, оказываемой компрессионными изделиями в процессе эксплуатации // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, № 5. С.118...123.
2. Маринкина М.А., Чагина Л.Л. Анализ методов для определения давления одежды на тело человека // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, № 3. С. 13...17.
3. Дроботун Н.В. Разработка методов оценки упругорелаксационных свойств высокоэластичного трикотажа и проектирования медицинских изделий компрессионного назначения: Дис...канд. техн. наук. – СПб.: Санкт-Петербург. гос. ун-т технологии и дизайна, 2009.
4. Фурьчева М.С. Вывод двухпараметрических ядер наследственности для описания деформационных свойств текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, №1. С. 7...10.
5. Маринкина М.А. Разработка методик оценки и исследование свойств, определяющих качество изделий компрессионного назначения из льняных трикотажных полотен: Дис...канд. техн. наук. – Кострома: Костромской гос. технолог. ун-т, 2015.
6. Филатов В.Н. Упругие текстильные оболочки. – М.: Легпромбытиздат, 1987.
7. Богатырева М.С., Ерохова М.Н. Механика текстильных материалов. – 1-е изд. – Кострома: Изд-во Костромского гос. технолог. ун-та, 2006.

## REFERENCES

1. Marinkina M.A., Chagina L.L., Protalinskij S.E., Bogatyreva M.S. K voprosu ucheta stabilnosti nagruzki, okazyvaemoj kompressionnymi izdelijami v processe jekspluatacii // Izv. vuzov. Tehnologija tekstilnoj promyshlennosti. – 2015, № 5. S. 118...123.

2. Marinkina M.A., Chagina L.L. Analiz metodov dlja opredelenija davlenija odezhdy na telo cheloveka // Izv. vuzov. Tehnologija tekstilnoj promyshlennosti. – 2013, № 3. S. 13...17.

3. Drobotun N.V. Razrabotka metodov ocenki uprugorelaksacionnyh svojstv vysokorastjazhimogo trikotazha i proektirovanija medicinskih izdelij kompressionnogo naznachenija: Dis...kand. tehn. nauk. – SPb.: Sankt-Peterburg. gos. un-t tehnologii i dizajna, 2009.

4. Furycheva M.S. Vyvod dvuhparametricheskih jader nasledstvennosti dlja opisaniya deformacionnyh

svojstv tekstilnyh materialov // Izv. vuzov. Tehnologija tekstilnoj promyshlennosti. – 2000, №1. S. 7...10.

5. Marinkina M.A. Razrabotka metodik ocenki i isledovanie svojstv, opredelajushhih kachestvo izdelij kompressionnogo naznachenija iz lnjanyh trikotazhnyh poloten: Dis...kand. tehn. nauk. – Kostroma: Kostromskoj gos. tehnolog. un-t, 2015.

6. Filatov V.N. Uprugie tekstilnye obolochki. – M.: Legprombytizdat, 1987.

7. Bogatyreva M.S., Erohova M.N. Mehanika tekstilnyh materialov. – 1-e izd. – Kostroma: Izd-vo Kostromskogo gos. tehnolog. un-ta, 2006.

Рекомендована кафедрой дизайна, технологии, материаловедения и экспертизы потребительских товаров. Поступила 30.03.18.