

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Научная статья

УДК 677.017

EDN WGSQFM

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-3-73-6-11>

Юрий Степанович Шустов¹

Виктор Павлович Зиновьев²

Айгуль Гарифуллаевна Сеитова³

Тимофей Викторович Зиновьев⁴

¹ Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

^{2,3} Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна, Москва, Россия

⁴ ООО «Точные детали», Москва, Россия

¹ 6145263@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-0740-4572>

² zvp.2013@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8244-2336>

³ <https://orcid.org/0000-0002-2120-4273>

⁴ <https://orcid.org/0009-0008-6828-1175>

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА

Аннотация. В статье приведены теоретические аспекты влияния масштабного фактора на прочностные показатели текстильных материалов, а также результаты экспериментов и расчеты, связанные с применением энергетического метода оценки влияния масштабного фактора на прочностные свойства исследованных образцов. Показано, что удельная работа разрыва является наиболее чувствительным показателем для оценки влияния масштабного фактора на разрывные характеристики. Приведены экспериментальные данные для сравнения влияния масштабного фактора, определяемого с помощью удельной работы разрыва, разрывной нагрузки, разрывного удлинения и разрывного напряжения. Отмечено, что не все текстильные материалы подвержены влиянию масштабного фактора. Имеется ряд материалов, где влияние масштабного фактора чрезвычайно мало или отсутствует вовсе с точки зрения математической статистики. Приведены рекомендации по проведению прочностных испытаний текстильных материалов, в особенности сертификационных, для корректного установления влияния масштабного фактора с целью оценки степени его влияния на прочностные свойства изделий во время их эксплуатации.

Ключевые слова: масштабный фактор, разрывная нагрузка, разрывное удлинение, статистическая модель прочности, энергетический метод оценки, текстильные материалы, удельная работа разрыва

Для цитирования: Энергетический метод оценки прочности текстильных материалов с учетом масштабного фактора / Ю. С. Шустов, В. П. Зиновьев, А. Д. Сеитова, Т. В. Зиновьев // Технологии и качество. 2026. № 3(73). С. 6–11. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-3-73-6-11>.

Original article

Yuri S. Shustov¹

Viktor P. Zinovyev²

Aiygul G. Seitova³

Timofey V. Zinovyev⁴

¹ Kosygin State University of Russia (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia

^{2,3} Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

⁴ LLC “Exact details”, Moscow, Russia

© Шустов Ю. С., Зиновьев В. П., Сеитова А. Г., Зиновьев Т. В., 2026

ENERGY METHOD FOR ASSESSING THE STRENGTH OF TEXTILE MATERIALS TAKING INTO ACCOUNT THE SCALE FACTOR

Abstract. The article presents theoretical aspects of the scale factor influence on the strength properties of textile materials, as well as the results of experiments and calculations related to the use of the energy method for assessing the scale factor influence on the strength properties of the samples studied. It is shown that the specific tensile work is the most sensitive indicator for assessing the scale factor influence on tensile characteristics. Experimental data are provided to compare the scale factor influence determined using the specific tensile work, tensile load, tensile elongation and tensile stress. It is noted that not all textile materials are subject to the scale factor influence. There are a number of materials where the scale factor influence is extremely small or absent altogether from the point of view of mathematical statistics. Recommendations are given for conducting strength tests of textile materials, especially certification tests, to correctly establish the scale factor influence in order to assess the degree of its influence on the strength properties of products during their operation.

Keywords: scale factor, breaking load, tensile elongation, statistical strength model, energy-based evaluation method, textile materials, rupture specific work

For citation: Shustov Yu. S., Zinoviev V. P., Seitova A. G., Zinoviev T. V. Energy method for assessing the strength of textile materials taking into the scale account the scale factor. Technologies & Quality. 2026. No 3(73). P. 6–11. (In Russ.) [https://doi.org/ 10.34216/2587-6147-2026-3-73-6-11](https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-3-73-6-11).

Прочностные испытания текстильных материалов, регламентируемые действующими стандартами [1–6], дают возможность оценить прочностные свойства исследуемых образцов только при определенных условиях, которые никак не раскрывают поведение испытываемых материалов при дальнейшей их эксплуатации в виде готовых изделий. Этот факт является существенным недостатком, так как не учитывает влияния масштабного фактора, который в свою очередь может привести изделия во время их эксплуатации к преждевременному износу или даже разрушению некоторых элементов одежды.

Известно, что длина образца существенно влияет на результат испытаний. Это влияние называется **масштабным фактором** и описано во многих работах, посвященных различным теориям прочности, в частности статистическим теориям прочности полимерных и композиционных материалов [7–12].

Настоящая статья посвящена различным методам оценки влияния масштабного фактора на результаты испытаний и их сравнению между собой для выявления наиболее чувствительных из них и простых, которые можно применять при испытаниях.

В работах [13, 14] сформулировано понятие масштабного фактора в виде следующей функции, значения которой убывают с ростом зажимной длины l испытываемых образцов волокон хлопка:

$$\bar{P}(l) = \bar{P}(l_0) \left(\frac{l_0}{l} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (1)$$

где $\bar{P}(l)$ – средняя разрывная нагрузка волокон при произвольной зажимной длине l ;

$\bar{P}(l_0)$ – средняя разрывная нагрузка волокон при зажимной длине l_0 , являющаяся рекомендуемой зажимной длиной при испытаниях (для волокон хлопка $l_0 = 10$ мм);
 α – параметр распределения Вейбулла, характеризующий свойства материала образца и его структурные особенности.

Однако, поскольку выражение (1) получено из соображений вероятностного распределения в материале образцов неоднородностей критической интенсивности и никак не зависит от их физической природы, то аналогичный подход был применен в исследовании [15] уже к двумерным продуктам, испытания которых доказали также адекватное описание упомянутой функцией результатов оценки прочности образцов в зависимости от их зажимной длины. Под неоднородностью критической интенсивности следует понимать «слабое место» в образце, которое приводит к его разрушению при определенной растягивающей нагрузке.

Однако, как будет видно далее, не все материалы в одинаковой степени подвержены влиянию масштабного фактора. Это связано с несколькими факторами: структурной неравномерностью текстильного материала, общей неровнотой и видом волокнистых материалов, из которых он изготовлен. В этой связи встал вопрос о поиске универсального показателя прочностных свойств материала, который обладал бы наибольшей чувствительностью к влиянию величины испытываемого образца.

Таковыми показателями, на взгляд авторов, могут являться не только разрывная нагрузка, но и работа разрыва, разрывное удлинение и разрывное напряжение, также характеризую-

щие величину неоднородности критической интенсивности. Рассмотрим эти показатели более подробно.

Для удобства сравнения свойств различных материалов воспользуемся относительными характеристиками перечисленных показателей: а именно удельной работой разрыва, относительным разрывным удлинением и разрывным напряжением.

По определению удельная работа разрыва есть отношение абсолютного значения работы к первоначальному объему образца между зажимами, т. е.

$$A_{уд} = \frac{A}{V_{зж}}. \quad (2)$$

Абсолютное значение работы разрыва A определяется по известной формуле

$$A = \int_0^{\epsilon_{разр}} P(\epsilon) d\epsilon, \quad (3)$$

где $P(\epsilon)$ – зависимость нагрузки от удлинения образца, Н;

ϵ – текущее значение абсолютного удлинения образца, мм;

$\epsilon_{разр}$ – абсолютное разрывное удлинение образца, мм.

Объем образца $V_{зж}$, находящийся между зажимами разрывной машины в начальный момент времени и подвергаемый испытанию на растяжение, определяется как

$$V_{зж} = l_{зж} S_{нач}, \quad (4)$$

где $l_{зж}$ – расстояние между зажимами в начале нагружения, мм;

$S_{нач}$ – площадь поперечного сечения ткани в начальный момент (до растяжения).

Однако при растяжении образец удлиняется, а эффективное сопротивляющееся растяжению поперечное сечение ткани уменьшается в соответствии с коэффициентом Пуассона. Тогда его значение в момент разрыва S_p можно определить как

$$S_p = S_{нач}(1 - 2\nu\epsilon_v), \quad (5)$$

где ν – коэффициент Пуассона ($\nu = 0,35$);

ϵ_v – относительное разрывное удлинение волокон хлопка ($\epsilon_v = 0,06$).

Подробнее о методе расчета эффективной площади поперечного сечения ткани на примере хлопчатобумажной ткани молескин можно ознакомиться в статье [16].

Для решения поставленной задачи было отобрано несколько тканей, наиболее широко используемых для изготовления спецодежды,

и проведены испытания этих тканей для определения их разрывной нагрузки и разрывного удлинения с одновременной записью диаграммы растяжения при различных значениях зажимной длины, устанавливаемой на испытательной разрывной машине.

Кроме того, для кусочно-линейной аппроксимации диаграмм растяжения с целью дальнейшего расчета удельной работы разрыва с каждой диаграммы было снято по 6 значений нагрузки в соответствии с абсолютными значениями деформации.

Пример одного из графиков интерполяционной кривой и фактические значения нагрузки (точки на графике) в зависимости от текущего удлинения для образца ткани молескин представлены на рисунке. Зажимная длина при растяжении по утку составляла $l_{зж} = 50$ мм. Из графика видно, что совпадение кривой с экспериментальными точками практически идеальное, а следовательно, и дальнейшие расчеты, связанные с определением удельной работы разрыва образца ткани, также имеют хорошую точность.

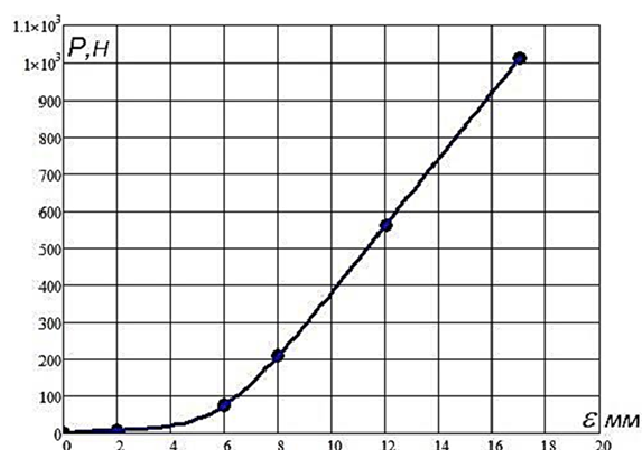


Рис. Пример расчета удельной работы разрыва ткани Молескин по утку при зажимной длине $l_{зж} = 50$ мм

Значения удельной работы разрыва наряду с наиболее часто используемыми прочностными показателями приведены в таблице 1 для каждого из образцов исследованных тканей. Эффективная площадь сечения пряжи:

- для ткани молескин:
основа $S_p = 1,07 \text{ мм}^2$,
уток $S_p = 2,06 \text{ мм}^2$;
- для ткани бязь:
основа $S_p = 0,91 \text{ мм}^2$,
уток $S_p = 0,79 \text{ мм}^2$.

Чувствительность исследуемого прочностного показателя к масштабному фактору можно оценить, сравнив значения показателя при раз-

личных значениях зажимной длины, равной начальному и конечному значениям исследуемого диапазона. Например, рассматривая удельную работу разрыва, чувствительность этого показателя можно оценить как отношение удельной работы при зажимной длине 50 мм к удельной работе при зажимной длине 300 мм, т. е.

$$\lambda_A = \frac{A(l_{\min})}{A(l_{\max})}. \quad (6)$$

Численные значения чувствительности, рассчитанной по формуле (6) на основании данных из таблицы 1 для разных видов ткани, приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 1

Значения прочностных показателей тканей молескин и бязь в зависимости от зажимной длины

Ткань	Зажимная длина, мм	Разрывная нагрузка, Н		Разрывное удлинение, мм / относительное разрывное удлинение, %		Удельная работа разрыва, мДж/мм ³		Разрывное напряжение, Н/мм ²	
		Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток
Молескин	50	700	1009	4,00/8,00	17,0/34,0	24,90	57,84	654	489
	100	655	960	6,50/6,50	26,0/26,0	17,11	36,66	612	466
	200	584	725	11,6/5,80	45,0/22,5	12,89	20,34	546	352
	300	570	607	15,4/5,13	58,0/19,3	11,17	14,26	533	295
Бязь	20	425	286	4,00/20,00	6,32/31,6	19,3	12,8	467	362
	100	457	266	10,0/10,00	19,40/19,4	8,85	7,32	502	336
	200	381	225	18,2/9,10	35,10/17,6	7,11	6,83	419	285
	300	369	201	26,6/8,86	57,70/19,2	6,03	5,50	405	254

Т а б л и ц а 2

Значение чувствительности для тканей молескин и бязь

Ткань	Чувствительность по разрывной нагрузке		Чувствительность по относительному разрывному удлинению		Чувствительность по удельной работе разрыва		Чувствительность по разрывному напряжению	
	Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток
Молескин	1,23	1,66	1,56	1,76	2,23	4,06	1,23	1,66
Бязь	1,15	1,42	2,26	1,64	3,20	2,33	1,15	1,43

Наиболее чувствительным показателем считается тот, который при равном приращении аргумента (зажимной длины) дает наибольшее изменение функции (показателя прочности).

Приведенные в статье экспериментальные данные говорят о том, что масштабный фактор проявляется в зависимости от применяемого показателя прочности и вида испытываемого материала по-разному. В этой связи для наиболее правильной оценки влияния масштабного фактора необходимо применять наиболее чувствительный показатель прочностных свойств материала, а именно – удельную работу разрыва. Однако ввиду того, что определение удельной работы разрыва является довольно сложной процедурой, связанной со сложными расчетами, а также дополнительными исследованиями ткани или другого текстильного материала, то при лабораторных сертификационных испытаниях этот способ мало пригоден и в этом случае можно использовать следующую по чувстви-

тельности характеристику – разрывное удлинение, определение которой не представляет при испытаниях никаких трудностей. Точность при этом уменьшается незначительно.

ВЫВОДЫ

1. Для оценки влияния масштабного фактора на прочностные свойства исследуемого материала можно использовать разрывное удлинение или удельную работу разрыва как наиболее чувствительный показатель.

2. Не у всех исследованных материалов проявляется на уровне значимости влияние масштабного фактора на прочностные показатели.

3. Следует рекомендовать ввести в действующие стандарты при определении масштабного фактора использование показателя «разрывное удлинение» для более полной и правильной оценки прочностных свойств исследуемого материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 3813–72 (ИСО 5081–77, ИСО 5082–82). Материалы текстильные. Ткани и штучные изделия. Методы определения разрывных характеристик при растяжении (с изменениями № 1, 2, 3). М. : Изд-во стандартов, 1972. 20 с.
- ГОСТ 11209–2014. Ткани для специальной одежды. Общие технические требования. Методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2015. 14 с.

3. ГОСТ Р 53226–2008. Полотна нетканые. Методы определения прочности. М. : Стандартинформ, 2009. 20 с.
4. ГОСТ 29104.4–91. Ткани технические. Метод определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве. М. : Изд-во стандартов, 1992. 7 с.
5. ГОСТ 30303–95 (ИСО 1421–77). Ткани с резиновым или пластмассовым покрытием. Определение разрывной нагрузки и удлинения при разрыве. Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. 8 с.
6. ГОСТ 6943.10–79. Материалы текстильные стеклянные. Метод определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве (с Изменениями № 1, 2). М. : Изд-во стандартов, 1980. 79 с.
7. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов : пер. с яп. М. : Мир, 1982. 232 с.
8. Бартенев Г. М., Зуев Ю. С. Прочность и разрушение высокоэластических материалов. М.-Л. : Химия, 1964. 204 с.
9. Бартенев Г. М., Зеленов Ю. В. Физика и механика полимеров : учеб. пособие для вузов. М. : Высшая школа, 1983. 391 с.
10. Волков С. Д. Статистическая теория прочности. М. ; Свердловск : Машгиз, 1960. 196 с.
11. Гуль В. Е., Кулезнев В. Н. Структура и механические свойства полимеров : учеб. для хим.-технол. вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Лабиринт, 1994. 367 с.
12. Разрушение : в 7 т. Т. 2 : Математические основы теории разрушения : пер. с англ. / под ред. Г. Либовица. М. : Мир, 1975. 764 с.
13. Зиновьев В. П. Оптимизация состава и структуры пряжи кольцевого способа прядения с целью рационального использования сырья : дис. ... канд. техн. наук. М. : МТИ, 1985. 184 с.
14. Щербаков В. П., Зиновьев В. П. Зависимость разрывной нагрузки волокон хлопка от зажимной длины // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1988. № 2. С. 23–26.
15. Влияние зажимной длины образца на результаты прочностных испытаний плоских текстильных материалов для спецодежды / В. П. Зиновьев, В. И. Рубцов, А. Н. Тимошенко, И. В. Оленина, С. А. Гаврилков, Ю. С. Шустов // Дизайн и технологии. 2021. № 82(124). С. 81–87.
16. Шустов Ю. С., Зиновьев В. П., Тимошенко А. Н. Метод расчета площади поперечного сечения хлопчатобумажной ткани // Междунар. науч. конф., посвященная 75-летию со дня рождения проф. А. П. Жихарева : сб. науч. тр. М. : РГУ им. А. Н. Косыгина, 2023. С. 214–218.

REFERENCES

1. GOST 3813–72. *Materialy tekstil'nye. Tkani i shtuchnye izdeliya. Metody opredeleniya razryvnykh harakteristik pri rastyazhenii* [State Stadart 3813–72. Textile materials. Fabrics and piece goods. Methods for determining tensile breaking properties]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1972. 20 p. (In Russ.)
2. GOST 11209–2014. *Tkani dlya special'noj odezhdy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy* [State Stadart 11209–2014. Fabrics for special clothing. General specifications. Test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 14 p. (In Russ.)
3. GOST R 53226–2008. *Polotna netkanye. Metody opredeleniya prochnosti* [State Stadart R 53226–2008. Nonwoven fabrics. Methods for determining strength]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 20 p. (In Russ.)
4. GOST 29104.4–91. *Tkani tekhnicheskie. Metod opredeleniya razryvnoj nagruzki i udlineniya pri razryve* [State Stadart 29104.4–91. Method for determining breaking load and elongation at break]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1972. 20 p. (In Russ.)
5. GOST 30303–95. *Tkani s rezinovym ili plastmassovym pokrytiem. Opredelenie razryvnoj nagruzki i udlineniya pri razryve*. [State Stadart 30303–95. Fabrics with rubber or plastic coating. Determination of Breaking Load and Elongation at Break]. Minsk, 1996. 8 p. (In Russ.)
6. GOST 6943.10–79. *Materialy tekstil'nye steklyannye. Metod opredeleniya razryvnoj nagruzki i udlineniya pri razryve*. [State Stadart 6943.10–79. Glass Textile Materials. Method for Determining Breaking Load and Elongation at Break]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1979. 79 p. (In Russ.)
7. Fujii T., Dzako M. Fracture Mechanics of Composite Materials. Moscow, Mir Publ., 1982. 232 p. (In Russ.)
8. Bartenev G. M., Zuev Yu. S. Strength and Fracture of Highly Elastic Materials. Moscow, Leningrad, Khimiya Publ., 1964. 204 p. (In Russ.)
9. Bartenev G. M., Zelenev Yu. V. Physics and Mechanics of Polymers. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1983. 391 p. (In Russ.)

10. Volkov S. D. Statistical Theory of Strength. Moscow ; Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1960. 196 p. (In Russ.)
11. Gul V. E., Kuleznev V. N. Structure and Mechanical Properties of Polymers. 4th ed., revised and enlarged. Moscow, Labyrinth Publ., 1994. 367 p. (In Russ.)
12. Libowitz G. (ed.). Fracture : in 7 vols. Vol. 2 : Mathematical Foundations of Fracture Theory. Moscow, Mir Publ., 1975. 764 p.
13. Zinoviev V. P. Optimization of the Composition and Structure of Ring-Spinning Yarn for the Purpose of Rational Use of Raw Materials : Cand. Techn. Sci. dis. Moscow, MTI, 1985. 184 p. (In Russ.)
14. Shcherbakov V. P., Zinoviev V. P. Dependence of the breaking load of cotton fibers on the clamping length. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Textile Industry Technology]. 1988;2:23–26. (In Russ.)
15. Zinoviev V. P., Rubtsov V. I., Timoshenko A. N., Olenina I. V., Gavrilkov S. A., Shustov Yu. S. Influence of the clamping length of a specimen on the results of strength tests of flat textile materials for workwear. *Dizajn i tekhnologii* [Design and Technology]. 2021;82(124):81–87. (In Russ.)
16. Shustov Yu. S., Zinoviev V. P., Timoshenko A. N. Method for calculating the cross-sectional area of cotton fabric . International scientific conference dedicated to the 75th anniversary of the birth of prof. A. P. Zhikharev : collection of scientific papers. Moscow, Kosygin Ros. St. Univ. Publ., 2023. P. 214–218. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 18.03.2026
Принята к публикации 02.07.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ю. С. Шустов, доктор технических наук, профессор

В. П. Зиновьев, кандидат технических наук

А. Г. Сеитова, младший научный сотрудник

Т. В. Зиновьев, ведущий специалист ООО «Точные детали»