

ШЕРСТЯНОЕ ДЕЛО / WOOL BUSINESS

Научная статья / Scientific paper

УДК 677.074:677.3.017.622]:004.94

DOI: 10.26897/2074-0840-2025-1-21-24

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ШЕРСТЯНОЙ ТКАНИ С УЧЕТОМ НАБУХАНИЯ ВОЛОКОН

А.В. АБРАМОВ¹✉, К.Э. РАЗУМЕЕВ¹, Н.Н. УТКИН¹, М.В. РОДИЧЕВА²✉

¹ ФГБОУ ВО Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство); г. Москва, Российская Федерация; ✉ Ant-lin88@mail.ru

² ФГБОУ ВО Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева; г. Орел, Российская Федерация; ✉ rodicheva.unpk@gmail.com

NUMERICAL SIMULATION OF AIR PERMEABILITY OF WOOL FABRIC TAKEN INTO ACCOUNT OF FIBER SWELLING

A.V. ABRAMOV¹✉, K.E. RAZUMEEV¹, N.N. UTKIN¹, M.V. RODICHEVA²✉

¹ The Kosygin State University of Russia; Moscow, Russian Federation; ✉ Ant-lin88@mail.ru

² Orel State University named after I.S. Turgenev; Orel, Russian Federation; ✉ rodicheva.unpk@gmail.com

Аннотация. Приведены результаты компьютерного моделирования воздухопроницаемости шерстяной ткани (B , $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) с учетом набухания при сорбции водяного пара. Показано, что ее наиболее выраженные изменения наблюдаются при относительной влажности воздуха от 0% до 20% и от 60% до 100%.

Ключевые слова: шерстяное волокно, воздухопроницаемость, расход воздуха, набухание, слоистая модель нити

Summary. The results of computer modeling of fabric air permeability (B , $\text{dm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) considering the processes of sorption of water vapor by wool fibers are presented. It is shown that its most pronounced changes are observed at relative air humidity from 0% to 20% and from 60% to 100%.

Keywords: wool fiber, air permeability, air flow, swelling, layered thread model

При поглощении водяного пара шерстяные волокна выделяют тепло, а также изменяют поперечные размеры [1, 2]. Эти особенности позволяют использовать шерстяные материалы при производстве одежды для условий контрастного климата, но осложняют процесс прогнозирования ее качества. Так набухание волокон шерсти снижает пористость и, следовательно, воздухопроницаемость материала. Существующие экспериментальные и расчетные методы не в полной мере учитывают влияние набухания на величину воздухопроницаемости [3].

Цель исследования: построение компьютерной модели и получение численных значений воздухопроницаемости шерстяной ткани, с учетом набухания волокон.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования является ткань шерстяная саржевого переплетения для верхней одежды (табл. 1).

Ткань изготовлена из гребенной пряжи следующего состава: 67% шерстяные волокна, 33% полиэфирные

волокна. В качестве основного сырья использована овечья шерсть, тип – пух.

Воздухопроницаемость ткани измерена по стандартному методу по 12088-72 [4]. При построении численной модели уравнения аэродинамики решены методом конечных элементов.

Результаты и их обсуждение. Воздухопроницаемость ткани измерена при следующих условиях: $t_{\text{окр}} = 21,5 \pm 0,4^\circ\text{C}$, $\varphi = 58 \pm 5\%$ воздуха. Ее среднее значение по пяти точкам: $B_s = 104 \pm 2 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Скорость воздуха через образец составила: $v = 2,8 \text{ м/с}$.

Согласно данным Т. Schmidt при разности давлений $\Delta P = 50 \text{ Па}$ по обе стороны воздух проходит через эффективное поровое пространство материала и почти не проникает в нити [5]. Таким образом воздухопроницаемость ткани определяется расходом воздуха в полях просветах единицы площади полотна [6].

Исходя из этого построены геометрические модели ткани в горизонтальной и вертикальной проекциях в виде кругов диаметром, равным диаметру нитей основы ($d_{\text{н-о}}$) и утка ($d_{\text{н-у}}$), на расстояниях $l_{\text{н-о}}$ и $l_{\text{н-у}}$ друг от друга (рис. 1, а). Для моделирования пятой фазы строения ткани каждый третий круг смещен на величину $0,5 \cdot d_{\text{н-о}}$ и $0,5 \cdot d_{\text{н-у}}$. Эти модели (поз. 1 рис. 1, б) помещены в область размером $100 \times 100 \text{ мм}$ (поз. 2).

Область 2 соответствует воздуху в зоне измерения. При проведении расчетов для нее заданы: температура,

Таблица 1. Характеристика объекта исследований

Table 1. Characteristics of the research object

Толщина образца	Диаметр нитей		Расстояние между нитями	
	основы	утка	по основе	по утку
h , мм	$d_{\text{н-о}}$, мм	$d_{\text{н-у}}$, мм	$l_{\text{н-о}}$, мм	$l_{\text{н-у}}$, мм
0,4	0,36	0,41	0,31	0,46

объемная плотность и динамическая вязкость. Между границами области назначена разность давлений $\Delta p = 50$ Па. Для выполнения требований теории подобия, на крайней левой границе модели задана скорость воздуха по результатам измерений ($v = 2,8$ м/с).

Процесс движения воздуха в области описан системой уравнений (1) [7]:

$$\begin{cases} \rho(\nabla \cdot u)u = \nabla \cdot [-\rho I + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F \\ \rho \nabla \cdot (u) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха в рамках рассматриваемой области, кг/м³; u – скорость движения воздуха

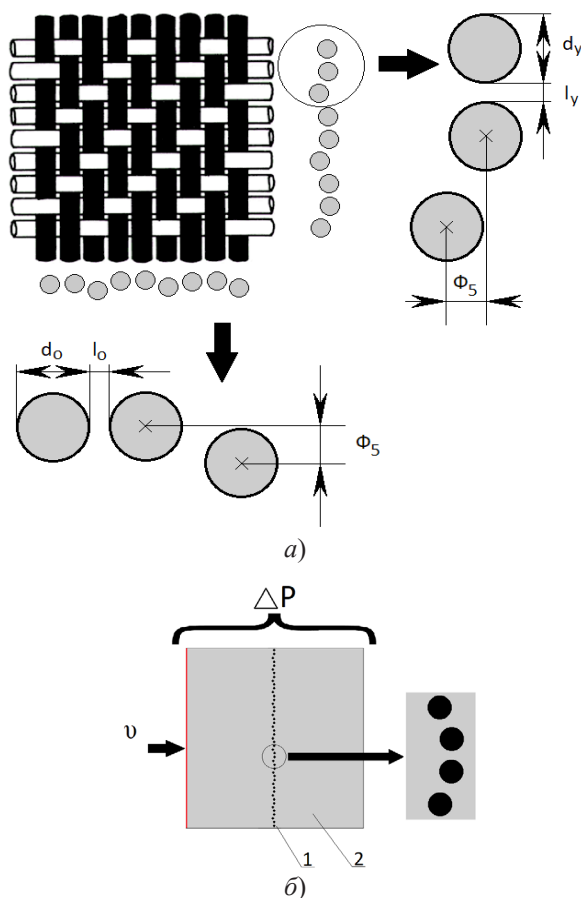


Рис. 1. Геометрические модели:

а – модель шерстяной ткани:

d_o, d_y – диаметры нитей основы и утка;

l_o, l_y – расстояние между нитями основы и утка;

Φ_5 – смещение нити в пятой фазе строения ткани;

б – геометрическая модель системы «воздух – ткань»:

1 – нити ткани в горизонтальной проекции; 2 – воздух;

ΔP – разность давлений; v – скорость воздуха

на входе в рассматриваемую область, м/с

Fig. 1. Geometric models:

a – model of woolen fabric:

d_o, d_y – diameters of warp and weft threads;

l_o, l_y – distance between warp and weft threads;

$F5$ – displacement of the thread

in the fifth phase of the textile structure;

b – geometric model of the “air – fabric” system:

1 – fabric threads in horizontal projection; 2 – air;

ΔP – pressure difference; v – air speed at the entrance

to the area under consideration, m/s

в рассматриваемом пространстве, м/с; I – направление, нормальное к препятствию (системы кругов в модели ткани); μ – динамическая вязкость воздуха, кг/(м·с); F – сила, побуждающая движение воздуха, Н; T – температура воздуха, К.

Система уравнений решена методом конечных элементов относительно поля скорости. Согласно результатам моделирования (рис. 2, а) воздушный поток до контакта с тканью движется равномерно. На верхней и нижней стенках формируются гидродинамические пограничные слои, что соответствует теоретическим представлениям. В зоне контакта с тканью характер потока меняется. За счет гидравлического сопротивления нитей воздушный поток развивается на отдельные струи, проходящие между нитями (поз. 1, рис. 2, б), а на лицевой поверхности ткани формируются застойные зоны (поз. 2).

Расход воздуха, проходящего через ткань, может быть определен по соотношению между скоростью и площадью сечения:

$$V = n \frac{v_o + v_y}{2} l_{n-o} l_{n-y} \quad (2)$$

где n – количество полей просвета в образце ткани площадью 1 м²; v_o – средняя скорость в воздухе между нитями основы, м/с; v_y – средняя скорость в воздухе между нитями утка, м/с; l_o – расстояние между нитями основы, мм; l_y – расстояние между нитями утка, мм.

В этих струях выделены точки – в центре воздушного потока («В») и на периферии («А», «С»). Скорость воздуха в пространстве между нитями принималась равной среднему значению между ними. По полученным значениям проведен расчет воздухопроницаемости ткани (табл. 2).

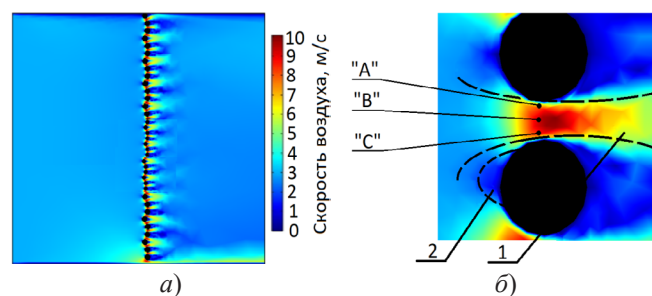


Рис. 2. Результаты моделирования

воздухопроницаемости шерстяной ткани:

а – поле скорости в вертикальной проекции ткани;

б – поле скорости в промежутке между нитями;

1 – застойная зона на поверхности нити;

2 – струя воздуха в промежутке между нитями;

«А», «В», «С» – точки контроля скорости воздуха в потоке воздуха между нитями

Fig. 2. Results of modeling the air permeability of woolen fabric:

a – velocity field in the vertical projection of the fabric;

b – velocity field in the gap between the threads;

1 – stagnation zone on the surface of the thread;

2 – a stream of air in the gap between the threads;

“A”, “B”, “C” – points for controlling air speed in the air flow between the threads

Полученное значение незначительно отличается от измеренного, что свидетельствует о достаточной точности моделирования. Построенная численная модель использована для прогнозирования воздухопроницаемости ткани при различных значениях влажности воздуха.

При моделировании нити учитывалось, что пряжа относится к 70^к, а согласно ГОСТ 30702-2000: ее тонина или диаметр волокон составляет 18,6-20,5 мкм [8]. Нить представлена в виде слоистой модели, в которой волокна располагаются равномерно относительно сердечника и формируют слои [9]. Например, на рисунке 3, а приведена модель с двумя слоями, а также результаты микрофотографирования, подтверждающие правомерность подхода [10]. В этом случае диаметр нити будет пропорционален диаметру волокон и количеству слоев (n) в нити. Исходя из среднего значения диаметра шерстяных волокон в нити (19,5 мкм) нить основы состоит из 18 слоев, а нить утка – из 21 слоя.

Предположим, что шерстяные волокна поглощают водяной пар из воздуха с одинаковой интенсивностью. Тогда диаметр нити будет увеличиваться пропорционально изменению диаметра волокон, что позволяет спрогнозировать его значение [2]. В то же время, увеличение диаметра нити в каждой из систем приведет к пропорциональному уменьшению расстояния между ними (табл. 3). Для каждого сочетания геометрических размеров проведены корректировка моделей и повторное решение системы уравнений (1). Результаты приведены в таблице 3 и на рисунке 4.

Полученную зависимость можно условно разделить на три участка:

– первый (ϕ от 0% до 20%): происходит существенное набухание шерстяных волокон и воздухопроницаемость ткани снижается с 122 $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ до 117 $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

– второй (ϕ от 20% до 60%): набухание шерстяных волокон менее выражено, а воздухопроницаемость снижается с 117 $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ до 99 $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

– третий (ϕ от 60% до 100%): наблюдается выраженное снижение воздухопроницаемости шерстяной ткани с 99 $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ до 70 $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Заключение. Наиболее выраженное изменение воздухопроницаемости рассмотренной шерстяной ткани для верхней одежды наблюдается при влажности воздуха от 0% до 20% и от 60% до 100%. Известно, что воздух, переносимый из-под одежды в окружающую среду, имеет относительную влажность выше 60%. Таким образом при проведении оценки гигиенических свойств шерстяных тканей для одежды необходимо учитывать влияние процессов набухания шерстяных волокон на показатели проницаемости.

Таблица 2. Расчет воздухопроницаемости шерстяной ткани по результатам моделирования

Table 2. Calculation of the breathability of wool fabric based on modeling results

Параметры движения воздуха в ткани				Воздухопроницаемость	
Площадь отверстия, $l_{н-о} \cdot l_{н-у}, \text{м}^2$	Средняя скорость воздуха в поле просвета, $v, \text{м/с}$	Расход воздуха в поле просвета, $\dot{v}, \text{м}^3/\text{с}$	Количество полей просвета в полотне, n , шт	Расчётная, $B_p, \text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Экспериментальная $B_3, \text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
$1,54 \cdot 10^{-7}$	5,1	$1,43 \cdot 10^{-7}$	$15 \cdot 10^4$	108,2	104 ± 2

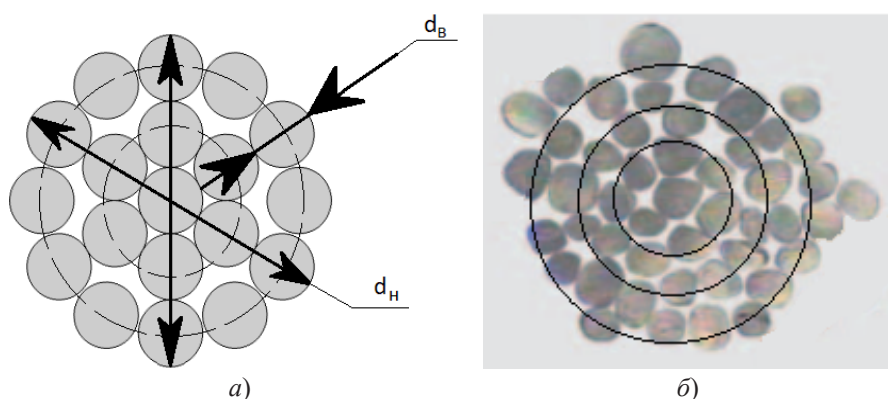


Рис. 3. Модель нити:

a – слоистая модель нити; d_v – диаметр волокна; d_n – диаметр нити; b – условные слои на фотографии нити

Fig.3. Thread model:

a – layered thread model; d_v – fiber diameter; d_n – thread diameter; b – conditional layers in the photograph of the thread

Таблица 3. Результаты моделирования воздухопроницаемости шерстяной ткани с учетом набухания

Table 3. Results of modeling the air permeability of wool fabric taking into account swelling

Относительная влажность воздуха	Диаметр		Расстояние между нитями		Средняя скорость в поле просвета ткани		Расчетное значение воздухопроницаемости
	по основе	по утку	по основе	по утку	по основе	по утку	
%	мм	мм	мм	мм	м/с	м/с	$\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
0	0,34	0,38	0,32	0,5	5,1	5,3	124,8
10	0,34	0,39	0,32	0,48	5,05	5,25	118,7
20	0,35	0,4	0,31	0,47	5,05	5,15	111,5
30	0,35	0,41	0,31	0,47	5	5,15	110,9
40	0,35	0,42	0,31	0,46	5	5,15	108,6
50	0,36	0,41	0,31	0,46	4,95	5,15	108,0
60	0,36	0,42	0,31	0,46	4,95	5,15	108,0
70	0,37	0,43	0,31	0,455	4,9	5,1	105,8
80	0,37	0,44	0,3	0,45	4,9	5,1	101,3
90	0,38	0,44	0,29	0,4	4,85	4,95	85,3
100	0,4	0,47	0,27	0,39	4,65	4,45	71,9

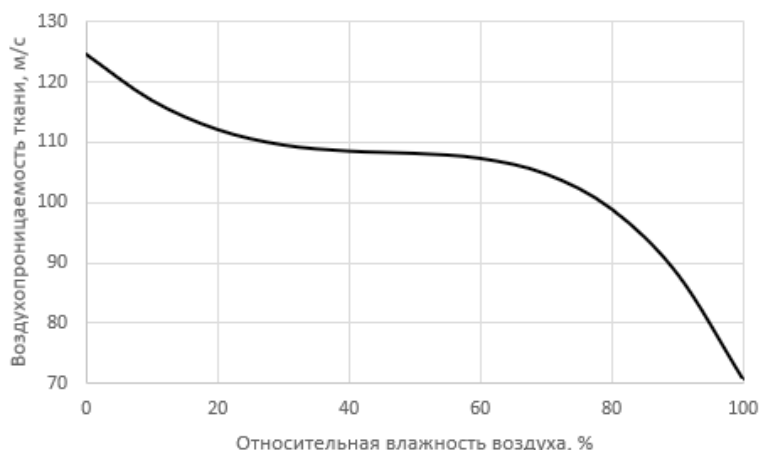


Рис. 4. Зависимость воздухопроницаемости шерстяной ткани от влажности проходящего сквозь нее воздуха

Fig. 4. Dependence of the breathability of woolen fabric on the humidity of the air passing through it

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Финансирование работы отсутствовало.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no conflicts of interest. There was no funding for the work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Huson M.G. Properties of wool // chapter in book: Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres (Second Edition). – 2018. – P. 59-103. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101272-7.00003-1>
2. Ulku S. A Study of Adsorption of Water Vapour on Wool under Static and Dynamic Conditions // Adsorption. – 1998. – V. 4(1). – P. 63-73. Doi: 10.1023/a:1008839404382.
3. Gurarda A., Çeven E.K., Akgün M., Günaydin G.K. Investigation of the Effects of Fabric Structural Properties of Wool Suits on Surface Roughness and Air Permeability // 18th AU-TEX World Textile Conference. – 2018. – V. 1. – P. 365-367. – ID3225. <https://www.researchgate.net/publication/325961643>.
4. ГОСТ 12088-72 Материалы текстильные и изделия из них. Метод определения воздухопроницаемости [Текст]. – Введен 01.01.1979, актуализирован 01.01.2021. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003 г. – 9 с.
5. GOST 12088-72 Textile materials and products made from them. Method for determining air permeability [Text]. – Entered 01/01/1979, updated 01/01/2021. – М.: IPK Standards Publishing House, 2003-9 p.
6. Schmidt T. A combined experimental–numerical approach for permeability characterization of engineering textiles // Polymer Composites. – 2021. – V 1. – P. 1-17. Doi: 10.1002/pc.26064.
7. Kyosov M., Angelova R.A., Stankov P. Numerical modeling of the air permeability of two-layer woven structure ensembles // Textile Research Journal. – 2015. – Vol. 6(19). – pp. 2067-2079. – doi:10.1177/ 0040517515619358.
8. Bejan A. Convection Heat Transfer (4th Edition) // Wiley. – 2013. – 685 p. ISBN-10 9780470900376.

8. ГОСТ 30702-2000 Шерсть. Торговая сельскохозяйственно-промышленная классификация [Текст]. – Введен 01.04.2002. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001 г. – 19 с.

GOST 30702-2000 Wool. Trade agricultural and industrial classification [Text]. – Introduced 04.01.2002. – М.: IPK Publishing House of Standards, 2001-19 p.

9. Grishanov S.A., Lomov S.V., Cassidy T., Harwood R.J. The Simulation of the Geometry of a Two-component Yarn Part II: Fibre Distribution in the Yarn Cross-section // The Journal of The Textile Institute. – 1997. – V. 88(4). – pp. 352-372. Doi:10.1080/00405000.1997.11090889

10. Wan A. Yu W.; Jiang G. Pilling properties of wool single jersey made of compact and conventional ring yarns after anti-felting treatment // Textile Research Journal. – 2014. – V. 84(7). – pp. 673-683. Doi:10.1177/0040517513509854.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Антон Вячеславович Абрамов, докт. техн. наук, профессор РГУ им. А.Н. Косыгина; 119071, Российская Федерация, г. Москва, ул. Малая Калужская, д. 1; e-mail: Ant-lin88@mail.ru;

Константин Эдуардович Разумеев, докт. техн. наук, советник при ректорате, профессор РГУ им. А.Н. Косыгина; 119071, г. Москва, ул. Малая Калужская, д. 1; e-mail: ker2210@yandex.ru;

Николай Николаевич Уткин, аспирант РГУ им. А.Н. Косыгина; 119071, г. Москва, ул. Малая Калужская, д. 1; e-mail: kol.utkin@mail.ru;

Маргарита Всеволодовна Родичева, канд. техн. наук, зав. кафедрой индустрии моды ОГУ им. И.С. Тургенева, 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95, корпус 1, e-mail: rodicheva.unpk@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton V. Abramov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kosygin Russian State University of Economics; 119071, Russian Federation, Moscow, Malaya Kaluzhskaya str.,1; e-mail: Ant-lin88@mail.ru;

Konstantin E. Razumeev, Doctor of Technical Sciences, Advisor to the Rector's Office, Professor, Kosygin Russian State University of Economics; 119071, Russian Federation, Moscow, Malaya Kaluzhskaya str.,1; e-mail: ker2210@yandex.ru;

Nikolay N. Utkin, postgraduate student at the Kosygin Russian State University of Economics; 119071, Russian Federation, Moscow, Malaya Kaluzhskaya str.,1; e-mail: kol.utkin@mail.ru;

Margarita V. Rodicheva, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Fashion Industry of Oryol State University at the I.S. Turgenev, 302026, Russian Federation, Orel, Komsomolskaya str., 95, building 1, e-mail: rodicheva.unpk@gmail.com.

Поступила в редакцию / Received 22.12.2024

Поступила после рецензирования / Revised 16.01.2025

Принята к публикации / Accepted 03.02.2025