

Научная статья

УДК 687.017.622:687.17

EDN SCNLER

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-1-67-34-40>

Антон Вячеславович Абрамов¹

Николай Николаевич Уткин²

Маргарита Всеволодовна Родичева³

^{1,2} Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

³ Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орел, Россия

¹ Ant-lin88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7082-1344>

² kol.utkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6211-5565>

³ rodicheva.unpk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1092-6141>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ТКАНЕЙ ДЛЯ ВЕРХНЕЙ ОДЕЖДЫ

Аннотация. Проведен анализ подходов к прогнозированию воздухопроницаемости текстильных материалов, предложена классификация доступных расчетных методов. Показано, что численные модели на основе дифференциальных уравнений в настоящее время рассматриваются в качестве основного метода прогнозирования. Представлена обобщенная численная модель процессов движения воздуха в текстильной ткани и результаты расчетов на примере пяти образцов тканей для верхней одежды в условиях пониженных температур. Приведены результаты моделирования в виде распределения поля скоростей воздуха в геометрических моделях, воспроизводящих структуру выбранных образцов. Для верификации результатов моделирования получены экспериментальные значения воздухопроницаемости выбранных образцов, которые сопоставлены с расчетными результатами. Установлено, что прогнозные величины воздухопроницаемости текстильных тканей по авторскому методу соответствуют результатам эксперимента с допустимой погрешностью.

Ключевые слова: воздухопроницаемость, ткань, поле просвета ткани, геометрическая модель ткани, расход воздуха, численная модель, уравнение Навье – Стокса.

Для цитирования. Абрамов А. В., Уткин Н. Н., Родичева М. В. Моделирование воздухопроницаемости тканей для верхней одежды // Технологии и качество. 2025. № 1(67). С. 34–40. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-1-67-34-40>.

Original article

Anton V. Abramov¹

Nikolai N. Utkin²

Margarita V. Rodicheva³

^{1,2} Kosygin State University of Russia (Technologies. Design, Art), Moscow, Russia

³ Turgenyev Oryol State University, Oryol, Russia

NUMERICAL MODEL OF DUST PERMEABILITY PROCESSES OF TEXTILE MATERIALS OF MINER'S SUIT

Abstract. It is shown that improving the safety of miner's suits is associated with the development of theoretical concepts of physical processes in textile materials. The current understanding of the passage of dusty air through a textile material does not always ensure the safety of miner's suits. It has been established that one of the ways to solve this problem is to build and use digital twins of the dust permeability processes of textile materials. The mechanisms of dusty air passage through a textile material are analysed, a model of dust movement in the air flow in the immediate vicinity and structure of the textile material is proposed. A mathematical model of dust particle capture by structural elements of the fabric is compiled. Based on these ideas, a numerical model of the dust permeability of a textile material is compiled, its solution is obtained using the example of fabric, an example of using the modelling results in calculating the dust permeability

and dust capacity of textile materials is shown. Key words: miner's suit, dust permeability, dust capacity, dust particles, numerical model, dust fraction, mechanisms of dust capture by material.

Keywords: air permeability, fabric, fabric clearance field, geometric fabric model, air flow rate, numerical model, Navier–Stokes equation

For citation: Abramov A. V., Utkin N. N., Rodicheva M. V. Numerical model of dust permeability processes of textile materials of miner's suit. Technologies & Quality. 2025. No 1(67). P. 34–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-1-67-34-40>.

Воздухопроницаемость является важным свойством текстильных материалов, которое характеризует интенсивность воздухообмена между пододежным пространством и окружающей средой через пакет одежды. Эту величину принято характеризовать по величине коэффициента воздухопроницаемости, которая выражает объем воздуха, проходящий через единичную площадь текстильного материала при фиксированной разности давлений между ее сторонами. Таким образом, с позиции современной гидродинамики, воздухопроницаемость текстильных материалов можно рассматривать в качестве объемного расхода воздуха через материал при фиксированной разности давлений по обеим сторонам.

Прогнозирование величины воздухопроницаемости материалов различного вида является важным инструментом, который позволяет: обоснованно подбирать структуру пакета материалов для одежды различного назначения; оценивать гигиенические аспекты качества одежды и др.

Прогнозирование величины воздухопроницаемости текстильных материалов и пакетов одежды, как правило, связано с проведением инженерных расчетов процессов движения смеси газов, которой присуще внутреннее трение (воздуха) через пористую систему с определенными структурными характеристиками (текстильный материал). При этом процессе наблюдаются потери энергии движения. Таким образом величина воздухопроницаемости связана со сквозной пористостью материала, которая определяется его толщиной, поверхностной и объемной плотностью [1].

Разработанные к настоящему моменту модели воздухопроницаемости текстильных материалов основаны на использовании классических законов гидродинамики (Дарси, Пуазейля и др.). В зависимости от используемой формы уравнения можно выделить: 1) модели на алгебраических уравнениях; 2) модели на дифференциальных уравнениях.

Модели первой группы появились раньше, по этой причине к настоящему моменту предложены их разнообразные вариации в рас-

четах отечественных и зарубежных исследователей [1–3].

Все эти модели построены на базе фундаментальных соотношений гидродинамики, и поэтому они дают достаточно точные предсказания о величине воздухопроницаемости. Однако результаты расчетов не дают информации о характере процессов фильтрации воздуха через структуру полотна. В то же время при подборе пакетов одежды, особенно на базе современных функциональных материалов, необходимо понимать сущность протекающих в них физических процессов.

Модели второй группы сложнее в использовании, процесс их отладки связан с необходимостью верификации решений экспериментальными данными и требует гораздо больше времени на получение финального результата. В то же время эти модели позволяют не только получать достаточно точное значение воздухопроницаемости текстильных материалов, но обеспечивают возможность:

- получения детальной информации о характере и интенсивности протекающих процессов, так как результат их решения выражен в виде динамики физических полей;
- проведения расчетов на более сложных геометрических моделях текстильных материалов в сравнении с моделями первой группы.

По этим причинам к настоящему моменту модели на дифференциальных уравнениях считаются предпочтительными и представлены многочисленными вариациями [4–6].

Первый этап проведения расчетов по моделям обеих групп связан с построением геометрической модели текстильного материала. Основные вариации таких геометрических моделей приведены на рисунке 1. При проведении расчетов воздухопроницаемости материалов по алгебраическим уравнениям текстильные материалы в основном представляются в виде моделей круга и «идеальный грунт» (см. рис. 1, а, б). При этом нити материала считаются непроницаемыми для воздуха и обозначены на схеме темными областями. Воздушные поры представлены свободным пространством, в котором возможен перенос воздушных потоков под дей-

ствием разности давлений. Как видно, при их построении форма структурных элементов материала существенно упрощается. Тем не менее расчеты, проведенные нами ранее, показывают, что круговая модель позволяет получать достаточно точные результаты.

При проведении расчетов на основе дифференциальных уравнений могут быть использованы детализированные представления материалов в виде моделей типа «решетка» (см. рис. 1, в) и более сложных пространственных представлений (см. рис. 1, з) [4, 5].

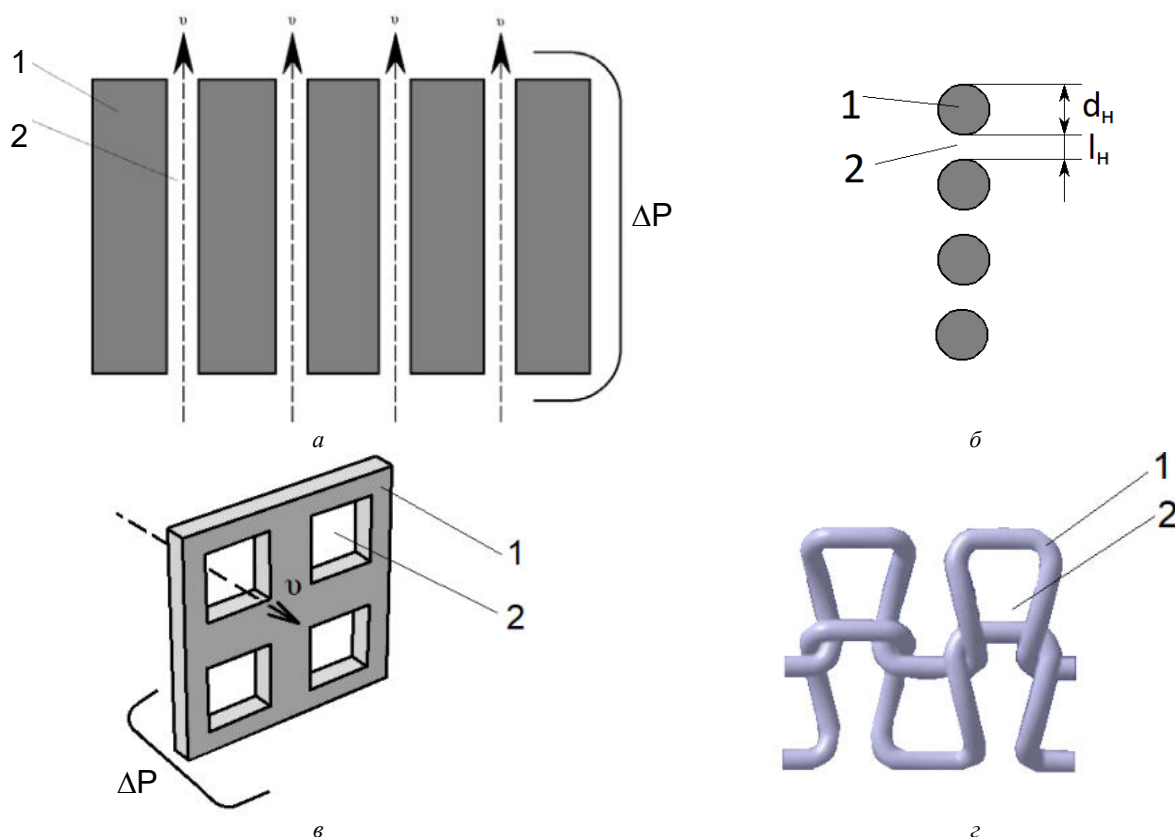


Рис. 1. Варианты геометрического представления текстильных материалов при расчете прогнозной величины воздухопроницаемости:

1 – твердая фаза материала; 2 – воздушное пространство вокруг и в структуре материала

В этих моделях нити текстильного материала также считаются непроницаемыми для воздуха, а перенос осуществляется только в эффективном поровом пространстве, в частности, в сквозных порах. В результате решения моделей получают скорость движения воздуха в материале. По этим данным, зная площадь поры $S_{\text{п}}$, м^2 , можно вычислить величину расхода воздуха в каждой из них $\dot{m}_{\text{п}}$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, например по формуле

$$\dot{m}_{\text{п}} = v_{\text{обр-ср}} S_{\text{п}}. \quad (1)$$

где $v_{\text{обр-ср}}$ – средняя скорость воздушного потока в сквозных порах образца, м/с .

Далее, умножив полученное значение на количество пор (n , шт.), содержащихся в единичной площади текстильного материала, можно найти общую воздухопроницаемость текстильного материала B , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ по формуле

$$B = \dot{m}_{\text{п}} n. \quad (2)$$

Для расчета скорости движения воздуха в порах текстильного материала может быть использовано уравнение движения вязкой среды в следующем виде [7]:

$$\rho_{\text{в}} \frac{\partial v}{\partial \tau} + \rho_{\text{в}} (v \cdot \nabla) v = \nabla [-pI + \mu(\nabla v + (\nabla v)^T)] - 12 \frac{\mu}{d^2} + \Delta p, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха при данной температуре, кг/м^3 ;

v – скорость движения воздуха, м/с ;

p – давление в точке, Па ;

I – единичный вектор;

T – температура воздуха в точке, К ;

τ – время, с ;

μ – динамическая вязкость воздуха, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

d – характерный диаметр канала, через который протекает воздушный поток, м .

Для обеспечения математической замкнутости уравнение движения (3) решается в системе с уравнением неразрывности в виде

$$\rho_n \nabla \cdot (v) = 0.$$
 (4)

На основе уравнений (1)–(4), а также представления текстильной ткани в виде системы проекций нитей систем основы и утка на горизонтальную и вертикальную плоскости нами разработан расчетный метод прогнозирования воздухопроницаемости текстильных тканей [8]. Рассмотрим его более подробно на примере нескольких образцов тканей, который могут использоваться при производстве одежды для условий пониженных температур (табл. 1).

Расчеты проводятся на основе круговой модели (см. рис. 1, б). Для ее получения рассматриваемый образец текстильной ткани проецируется на вертикальную и горизонтальную плоскости в соответствии со следующей схемой (рис. 2, а).

Рис. 2, а). Расчеты проводятся на основе круговой модели (см. рис. 1, б). Для ее получения рассматриваемый образец текстильной ткани проецируется на вертикальную и горизонтальную плоскости в соответствии со следующей схемой (рис. 2, а).

Таблица 1

Характеристика исследуемых тканей

Показатель	Номер образца				
	1	2	3	4	5
Толщина, мм	0,40	0,45	0,28	0,34	0,41
Поверхностная плотность, г/м ²	215	245	148	226	227
Количество нитей на 100 мм (по основе), шт.	226	339	220	383	416
Количество нитей на 100 мм (по утку), шт.	318	201	293	273	265
Диаметр нитей (по основе), мм	0,25	0,23	0,19	0,21	0,19
Диаметр нитей (по утку), мм	0,2	0,23	0,19	0,2	0,22
Расстояние между нитями (по основе), мм	0,19	0,06	0,26	0,05	0,046
Расстояние между нитями (по утку), мм	0,09	0,26	0,15	0,16	0,16

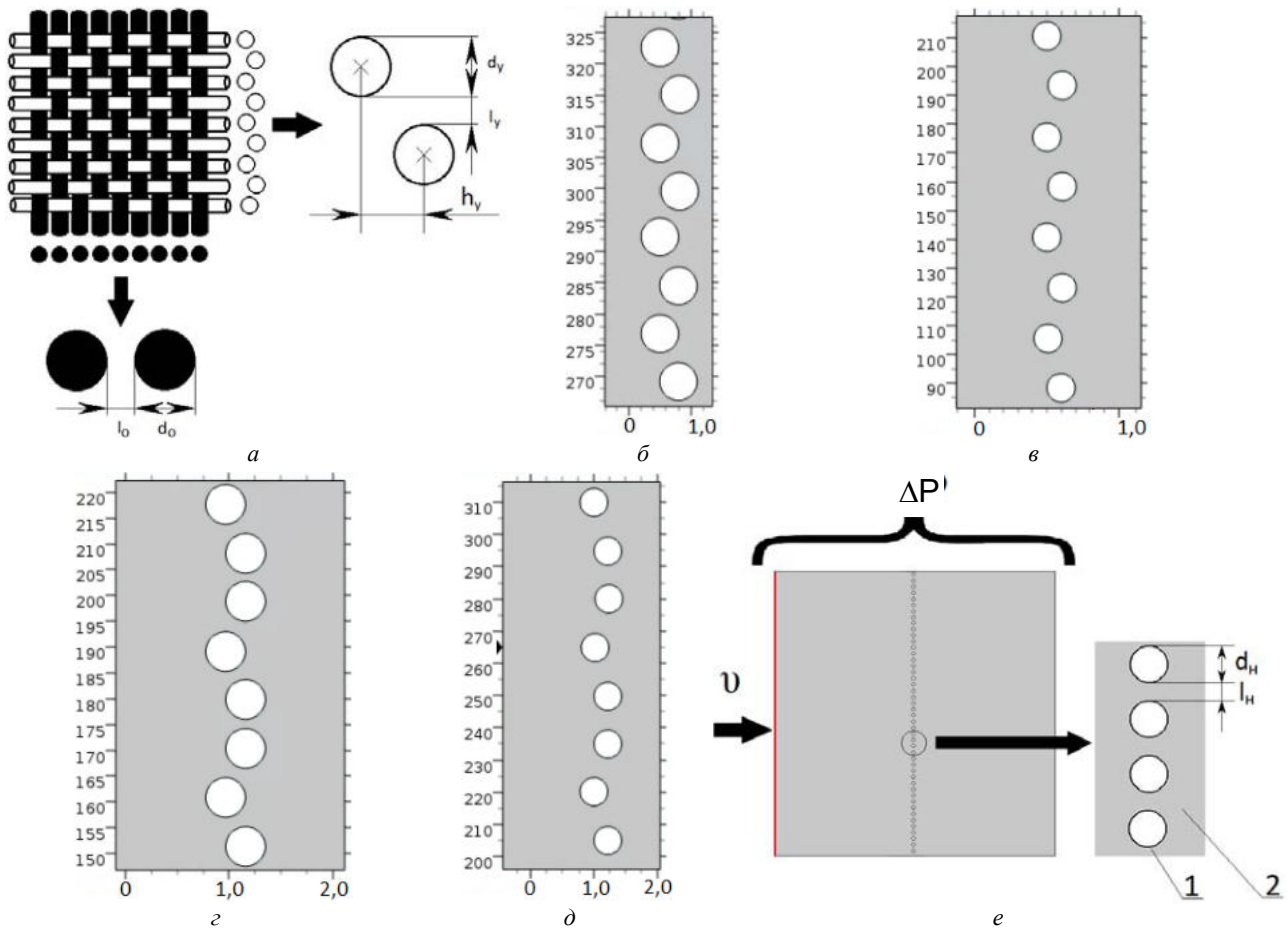


Рис. 2. Геометрические модели текстильных образцов тканей:
а – схема построения моделей; б, в – модели по основе и утку ткани по образцу № 1;
г, д – модели по основе и утку ткани по образцу № 5;
е – схема назначения граничных условий:
1 – сплошная среда внутри нити; 2 – воздушная среда

При построении геометрической модели определяющие ее размеры d_o , d_y , l_o , l_y , h_y заданы в параметрическом виде. За счет изменения значений этих параметров в модели можно воспроизвести любую текстильную ткань. Например, на рисунке 2, б–д приведены примеры моделей некоторых из рассматриваемых образцов тканей, параметры которых соответствуют приведенным в таблице 1 размерам.

Учитывая, что расчеты направлены на вычисление скорости движения в воздушной среде, помимо самих текстильных материалов в модель вводится воздушный объем определенного размера. Для обеспечения возможности верификации получаемых данных размеры этого пространства в рассматриваемом случае соответствуют размеру зоны измерения в приборе ВПТМ-2 по стандартному методу [9].

Как показывает практика, этот метод до настоящего момента активно используется для оценки величины воздухопроницаемости тек-

стильных материалов различного вида и строения [10].

На рисунке 2, б–д представлены лишь фрагменты этих моделей, которые достаточно наглядно иллюстрируют взаимное расположение нитей систем основы и утка в структуре тканей.

Для численного решения уравнений (3), (4) для моделей задаются граничные условия. На левой границе, которая соответствует входу потока в пространство модели, задается скорость движения воздуха, генерируемая прибором ВПТМ-2, а между левой и правой границами назначается разность давлений воздуха, под действием которого воздух проходит сквозь материал (см. рис. 2, е). Согласно паспорту прибора, это значение принято равным $\Delta p = 50$ Па.

С учетом размеров представленных моделей в результате решения уравнений (3), (4) получают распределение поля скорости в каждой из них. Некоторые из этих результатов приведены на рисунке 3.

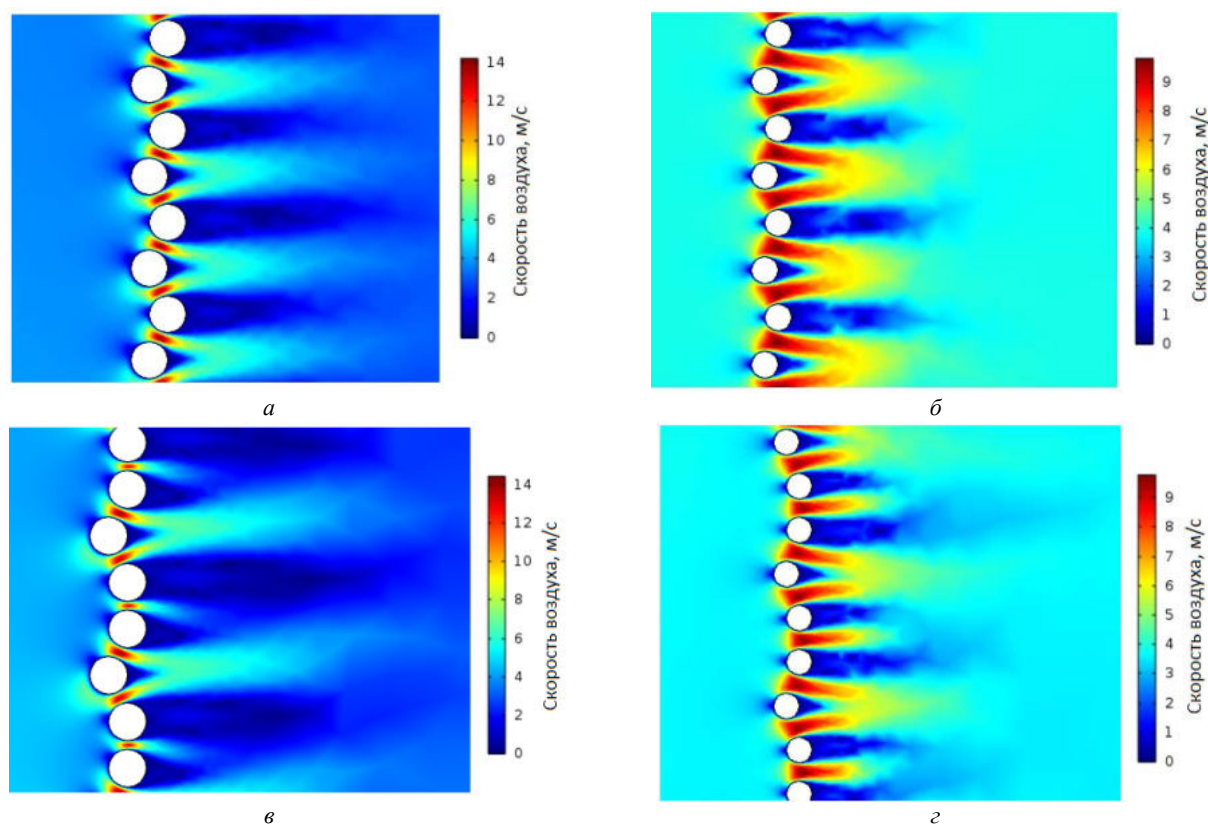


Рис. 3. Результаты решения модели для тканей:
а, б – по образцу № 1; в, г – по образцу № 5

Как видно, до контакта с материалом воздух движется достаточно равномерно со скоростями, более низкими, чем значение, заданное на входе потока в пространство модели. При прохождении через его структуру эти потоки существенно ускоряются. Скорость движения

воздуха в полях просвета ткани достигает значений от 8 до 14 м/с в зависимости от структуры материала.

В целом, эти результаты моделирования согласуются с существующими представлениями. В связи с тем, что воздух не может переме-

щаться в структуре текстильных нитей, а суммарная площадь полей просвета ткани существенно ниже площади сечения свободного потока воздуха, в зоне контакта с поверхностью материала его скорость несколько замедляется. Непосредственно в порах текстильного материала по закону сохранения расхода его скорость должна возрасти пропорционально уменьшению площади сечения потока. В пространстве поры скорость движения воздуха изменяется от значений, близких к нулевым на границе с нитями, до величины от 8 до 14 м/с в ее центре.

По этой причине для анализа скорости движения воздуха в каждой из трех произвольно выбранных проекций поля просвета ткани выделено по три точки – в центре (точка 2 на рис. 4) и на периферии потока (точки 1, 3 на рис. 4). В каждой из них проведена оценка скорости движения воздуха таким образом, чтобы получить по девять значений в каждой из моделей рассматриваемого материала (по основе и утку): v_{o-1-1} , v_{o-1-2} , v_{o-1-3} , v_{o-2-1} , ..., v_{o-3-3} ; v_{y-1-1} , v_{y-1-2} , v_{y-1-3} , v_{y-2-1} , ..., v_{y-3-3} . По этим значениям проведены расчеты среднего ($v_{обр-ср}$, м/с).

Поле просвета в ткани может быть представлено в виде прямоугольника со сторонами, равными расстоянию между нитями основы $l_{н-о}$, мм и утка $l_{н-у}$, мм. В этом случае ранее пред-

ложенная формула для расчета расхода воздуха (1) в одном поле просвета примет вид

$$\dot{m}_n = v_{обр-ср} l_{н-о} l_{н-у} \cdot \quad (5)$$

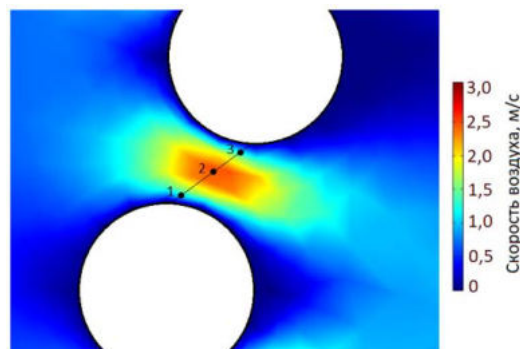


Рис. 4. Анализ поля скоростей воздуха в модели материала в одном из произвольно выбранных трех сечений

Полученные по формуле (5) результаты расчетов для каждого из пяти выбранных образцов приведены в таблице 2.

Для контроля правильности полученных значений воздухопроницаемость исследуемых образцов исследована экспериментально с помощью прибора ВПТМ-2 по стандартной методике. Результаты измерений приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

Величина воздухопроницаемости по результатам расчетов и экспериментальных исследований

Показатель	Номер образца				
	1	2	3	4	5
Воздухопроницаемость по результатам расчетов, $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	35	25	58	22	18,5
Воздухопроницаемость, измеренная на приборе ВПТМ-2, $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	36	23	56,5	24	17,4
Расхождение, %	2,9	8,0	2,6	9,1	5,9

Сопоставляя полученные данные с расчетными, можно видеть, что расхождения составляют от 2,6 до 9,1 % в зависимости от структуры материала. Эти расхождения отчасти можно объяснить погрешностью прибора и метода измерений.

ВЫВОДЫ

При сопоставлении расчетных и экспериментальных данных видно, что разработанная модель дает достаточные предсказания о величине воздухопроницаемости текстильных тканей с учетом их структурных характеристик. На основании этого можно считать, что она может

быть использована для оценки качества одежды и проектирования текстильных материалов с заданной величиной воздухопроницаемости. В частности, с ее помощью могут быть решены следующие задачи:

- расчет воздухопроницаемости материалов при других значениях разности давлений воздуха между лицевой и изнаночной сторонами, например при различных скоростях ветра;
- прогнозирование динамики воздухопроницаемости тканей при изменении их структурных характеристик;
- обоснование структуры тканей для обеспечения требуемой воздухопроницаемости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Куличенко А. В. Воздухопроницаемость текстильных полотен : монография. СПб. : Санкт-Петербургский гос. ун-т промышленных технологий и дизайна, 2023. 366 с.

2. Ogulata R. T. Air Permeability of Woven Fabrics // Journal of Textile and Apparel, Technology and Management. 2006. Vol. 5, is. 2. 10 p.
3. Theoretical Analysis, Calculation, and Prediction of the Air Permeability of Textiles // Fibre Chemistry. 2005. No 37(5). P. 371–380.
4. Kyosov M., Angelova R., Stankov P. Numerical modeling of the airpermeability of two-layer wovenstructure ensembles // Textile Research Journal. 2015. Vol. 86(19). P. 1–13.
5. Ghane M., Abdellahi S., Soultanzadeh M. Numerical modeling of the air permeability of knitted fabric using computational fluid dynamics (CFD) method // Fibers and Polymers. 2017. No 18(9). P. 1804–1809.
6. Сорокин Д. В., Никифоров А. Л. Математическое моделирование нестационарного теплообмена в многослойном композиционном материале // Технологии и качество. 2021. № 1(51). С. 9–14.
7. Bejan A. et al. Heat Transfer Handbook. N.-Y. : Wiley, 2003. 611 p.
8. Метод теплового расчета одежды в условиях пониженных температур и ветра / А. В. Абрамов, С. А. Смирнов, М. В. Родичева, Н. Н. Уткин // сб. трудов Всерос. науч.-практ. конф. им. проф. Я. В. Мильмана. М., 2024. С. 24–28.
9. ГОСТ 12088–77. Материалы текстильные и изделия из них. Метод определения воздухопроницаемости. М. : Изд-во стандартов, 2021. 11 с.
10. Испытания трикотажных полотен с целью подтверждения соответствия / М. А. Стасева, Т. Н. Новосад, Н. В. Евсеева, Б. Н. Гусев // Технологии и качество. 2020. № 1(47). С. 22–25.

REFERENCES

1. Kulichenko A. V. Air permeability of textile fabrics. St. Petersburg St. Univ. of Industrial Technologies and Design Publ., 2023. 366 p. (In Russ.).
2. Ogulata R. T. Air Permeability of Woven Fabrics. Journal of Textile and Apparel, Technology and Management. 2006;5(2):10.
3. Theoretical Analysis, Calculation, and Prediction of the Air Permeability of Textiles. Fibre Chemistry. 2005;37(5):371–380.
4. Kyosov M., Angelova R., Stankov P. Numerical modeling of the airpermeability of two-layer wovenstructure ensembles. Textile Research Journal. 2015;86(19):1–13.
5. Ghane M., Abdellahi S., Soultanzadeh M. Numerical modeling of the air permeability of knitted fabric using computational fluid dynamics (CFD) method. Fibers and Polymers. 2017;18(9):1804–1809.
6. Sorokin D. V., Nikiforov A. L. Mathematical modeling of non-stationary heat transfer in a multilayer composite material. *Teknologii i kachestvo* [Technologies & Quality]. 2021;1(51):9–14. (In Russ.)
7. Bejan A. et al. Heat Transfer Handbook. New York, Wiley, 2003. 611 p.
8. Abramov A. V., Smirnov S. A., Rodicheva M. V., Utkin N. N. Method of thermal calculation of clothing in conditions of low temperatures and wind. Collection of works of the all-Russian scientific and practical conference named after Ya. V. Milman. Moscow, 2024. P. 24–28. (In Russ.)
9. *GOST 12088–77. Materialy tekstilnye i izdelia iz nih. Metod opredelenia vozduhopronitsaemosti* [State standart 12088–77. Textile materials and products made from them. Method for determining air permeability]. Moscow, Izdatelstvo Standartov Publ., 2021. 7 p. (In Russ.).
10. Stasheva M. A., Novosad T. N., Evseeva N. V., Gusev B. N. Testing of knitted fabrics to confirm compliance. *Teknologii i kachestvo* [Technologies & Quality]. 2020;1(47):22–25. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 3.02.2025

Принята к публикации 17.02.2025