

УДК 677.529

DOI 10.47367/0021-3497_2025_4_250

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ НЕТКАНЫХ
ИГЛОПРОБИВНЫХ ПОЛОТЕН И ТЕРМООБРАБОТАННЫХ МАТЕРИАЛОВ
РАЗЛИЧНОГО ВОЛОКНИСТОГО СОСТАВА**

**MODELING THE AIR PERMEABILITY OF NON-WOVEN NEEDLE-PUNCHED
FABRICS AND HEAT-TREATED MATERIALS OF VARIOUS FIBER COMPOSITIONS**

О.В. КОЖЕВНИКОВА¹, И.Д. АСМЕТКОВ¹, Е.С. БОКОВА¹, Э.В. СИДОРОВА², А.В. ДЕДОВ²

O.V. KOZHEVNIKOVA¹, I.D. ASMETKOV¹, E.S. BOKOVA¹, E.V. SIDOROVA², A.V. DEDOV²

¹Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),
²Московский политехнический университет)

¹The Kosygin State University of Russia,
²Moscow Polytechnic University)

E-mail: dedovs55@rambler.ru

Произведена оценка эффективности применения моделей для прогнозирования воздухопроницаемости нетканых полотен различного волокнистого состава, как исходных, так и обработанных в зазоре между нагретым металлическим валом и транспортерной лентой. Представлены зависимости коэффициента проницаемости от различных комбинаций показателей плотности и коэффициента пористости исходных полотен и постобработанных материалов. Получены уравнения, описывающие данные зависимости, и выявлены оптимальные модели для прогнозирования воздухопроницаемости полотен и обработанных нетканых материалов.

The effectiveness of using models to predict the air permeability of nonwoven fabrics of various fibrous compositions, both initial and processed in the gap between the heated metal shaft and the conveyor belt, has been evaluated. The dependences of the permeability coefficient on various combinations of density indicators and the porosity coefficient of the initial canvases and post-processed materials are presented. Equations describing these dependencies are obtained and optimal models for predicting the air permeability of fabrics and processed nonwovens are identified.

Ключевые слова: нетканые иглопробивные полотна, волокна различной линейной плотности, воздухопроницаемость.

Keywords: nonwoven needle-punched fabrics, fibers of different linear density, air permeability.

Введение

Эффективность фильтрации газоздушных выбросов увеличивается при использовании нетканых иглопробивных полотен [1], изготовленных из синтетических волокон относительно небольшой линейной плотности [2...7]. При этом переработка волокон линейной плотности менее 0,33 текс требует специализированного оборудования. В качестве компромиссного решения данной проблемы представляется возможным применение для создания высокоэффективных фильтров нетканых полотен на основе смесей волокон различной линейной плотности.

Помимо основного функционального назначения – фильтрации газов, нетканые материалы должны обладать достаточно высокими прочностными характеристиками, для обеспечения которых применяют специальные приемы тепловой обработки волокнистых полотен в условиях термокамеры или на валковом оборудовании, например, каландре [8...10]. При этом, как правило, речь идет о материалах на основе смеси полиэтилентерефталатных и полипропиленовых волокон, где температурное воздействие оказывает влияние только на полипропиленовые волокна, вызывая их усадку. В данном случае такая постобработка эффективна для регулирования пористой структуры материала, но в малой степени влияет на его прочностные показатели. Каландрование, оказывая влияние на повышение физико-механических характеристик нетканых материалов, приводит к

монолитизации их поверхности, что отрицательно сказывается на их фильтрующей способности [11].

Авторы статьи разработали способ термомеханической обработки, при применении которого полотна на основе смесей полиэтилентерефталатных и безусадочных бикомпонентных волокон подвергаются действию тепла и давления в зазоре между металлическим нагретым валом диаметром 1 м и транспортной лентой [12, 13]. Следствием относительно длительного времени контакта полотен с нагретой поверхностью металлического вала является регулируемый прогрев по толщине полотен и получение обработанных материалов с необходимой пористой структурой и требуемым комплексом физико-механических свойств.

Предложенный способ может быть применен не только для нетканых полотен из смеси волокон различной химической природы, но и из волокон, отличающихся линейной плотностью [13...17], при этом второй фактор в контексте его возможного влияния на воздухопроницаемость изучен недостаточно.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали нетканые иглопробивные полотна трех видов. Полотна первого вида получали на основе смеси полиэтилентерефталатных волокон линейной плотности 0,33 и 0,22 текс (ТУ 6-13-0204077-95-91) в отношении 70/30 мас. % соответственно, полотна второго вида – на основе полиэтилентерефталатных волокон линейной плот-

ности 0,33 текс и полотна третьего вида – на основе полипропиленовых волокон линейной плотности 0,66 текс. Плотна каждого вида отличались поверхностной и объемной плотностью.

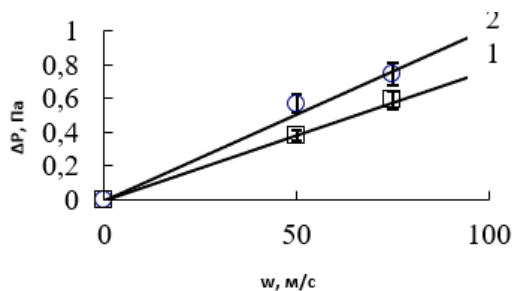
Нетканые материалы получали механическим способом формирования волокнистых холстов на промышленном чесальном агрегате «Шпинбау» (Германия) с последующим их упрочнением методом иглопрокалывания на агрегате «Дило» (Германия) при плотности прокалывания 180 см⁻². Термомеханическую обработку полотен вида 1 выполняли при температуре металлического вала 200 °С, полотен вида 2 и 3 – при T=175 °С. Скорость обработки всех образцов составляла 1,2 м/мин.

Массу образцов определяли при помощи электронных весов с точностью взвешивания ±0,002 г, толщину – по ГОСТ 12023-93 с применением толщиномера по ГОСТ 11358-70 с ценой деления 0,01 мм, измерения толщины осуществляли при давлении на образец 10 кПа. Максимальная относительная ошибка измерений массы полотен и материалов составляла ±12 %, толщины полотен и обработанных материалов не более ±8 %.

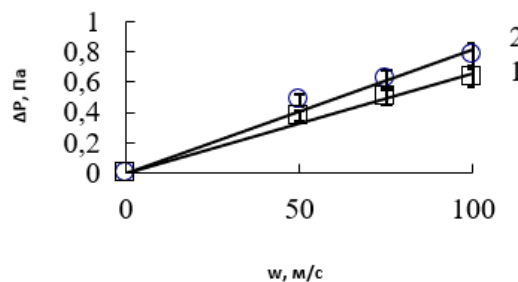
Коэффициент пористости полотен и обработанных материалов рассчитывали из уравнения:

$$\delta = 1 - \frac{p}{p_B}, \quad (1)$$

где p – плотность полотен и обработанных материалов, кг/м³; p_B – плотность волокна, равная для полиэтилентерефталатных волокон различной линейной плотности 1370 кг/м³, для полипропиленовых волокон 920 кг/м³.



а)



б)

Рис. 1

Воздухопроницаемость полотен и обработанных материалов определяли согласно требованиям ГОСТ 12.088–77 «Материалы текстильные и изделия из них. Методы определения воздухопроницаемости» с использованием прибора ВПТМ-2 при перепаде давления воздуха 49, 75 и 98 Па. Скорость фильтрации воздуха определяли как среднее из измерений в пяти точках, равномерно распределенных по поверхности образцов размером 250×250 мм. Максимальная относительная ошибка измерений составляла ±9 %.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для количественной оценки проницаемости полотен и обработанных материалов используют коэффициент воздухопроницаемости [18], который характеризует объем воздуха, прошедшего через образец площадью 1 м² за 1 с, определяют при постоянном перепаде давления воздуха, величина которого зависит от требований стандарта, как правило, используется перепад давления 49 и 98 Па. При расчете коэффициента воздухопроницаемости не учитывается изменение толщины в процессе прокалывания и термомеханической обработки полотен, что ограничивает практическое значение данного подхода к моделированию проницаемости.

Возможность расчета проницаемости полотен и обработанных материалов различной толщины при заданных значениях перепада давления воздуха появляется в случае использования коэффициента проницаемости, устанавливающего линейную зависимость между скоростью фильтрации (w , м/с) и перепадом давления воздуха (ΔP , Па).

В качестве примера на рис. 1 (зависимости между скоростью фильтрации и перепадом давления воздуха для полотен (а) и термообработанных материалов (б) поверхностной плотности 0,3 кг/м² на основе смеси полиэтилентерефталатных волокон линейной плотности 0,22 и 0,33 текс (1) и полипропиленовых волокон линейной плотности 0,66 текс (2)) представлены зависимости w от ΔP для исходных полотен различного состава и термообработанных материалов на их основе с равными показателями поверхностной плотности. Для полотен из полиэтилентерефталатных волокон линейной плотности 0,33 текс линейный вид зависимостей w от ΔP установлен в работе [19], поэтому эти зависимости не представлены.

Видно, что при перепаде давления воздуха от 0 до 100 Па зависимости w от ΔP для полотен вида 1 и 3 и обработанных материалов на их основе имеют линейный характер, что доказывает возможность использования коэффициента проницаемости, который рассчитывали из линейного закона Дарси [18, 19]:

$$K = \frac{wd\mu}{\Delta P}, \quad (2)$$

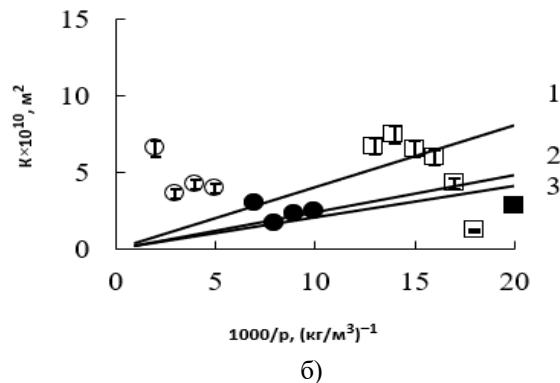
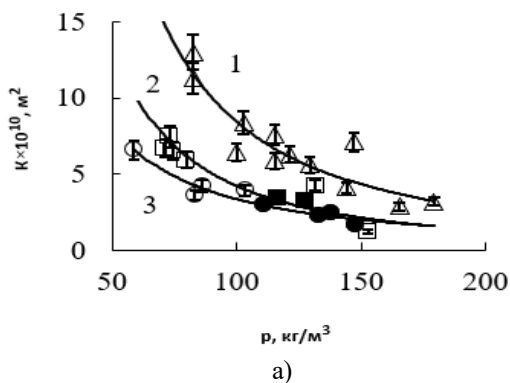


Рис. 2

Из рис. 2 (зависимости коэффициента проницаемости от плотности (а) и обратной величины плотности (б) полотен вида 2 (1), полотен (□) и обработанных материалов вида 3 (■) – общая зависимость 2; и полотен (○) и обработанных материалов вида 1 (●) – общая зависимость 3) следует, что соотношения между K и ρ и K и $1/\rho$ полотен и обра-

ботанных материалов, где d – толщина полотен и обработанных материалов, м; μ – вязкость воздуха, равная $1,8 \times 10^{-5}$ Па·с.

Физический смысл коэффициента проницаемости пористых тел во многом сводится к учету структурного параметра или комбинации структурных параметров, соотношение между которыми описывается линейной зависимостью, которая выходит из начала координат и подчиняется уравнению с одним эмпирическим коэффициентом размерности.

Стандартные модели, связывающие коэффициент проницаемости с плотностью полотен и обработанных материалов (ρ , кг/м³), получены из зависимости K от ρ и K от $1/\rho$ (в работе для удобства масштаба использовали $1000/\rho$). Зависимости K от $1/\rho$ отражают обратно пропорциональное соотношение между коэффициентом проницаемости и плотностью, при возрастании которой коэффициент проницаемости снижается. Кроме того, при $\rho \rightarrow \infty$ или $(1/\rho) \rightarrow 0$ выполняется условие $K \rightarrow 0$, из чего следует, что зависимости K от $1/\rho$ должны выходить из начала координат [20, 21].

ботанных материалов видов 1 и 3 описываются общими зависимостями (рис. 2, а и б, зависимости 2 и 3). Зависимости K от ρ полотен и обработанных материалов различного состава описываются уравнениями общего вида:

$$K \times 10^{10} = A\rho^{-B}, \quad (3)$$

где A – коэффициент размерности, $\text{м}^2/(\text{кг}/\text{м}^3)$;
 B – безразмерный коэффициент.

Значения коэффициентов A и B представлены табл. 1.

Таблица 1

Вид полотна	Значения коэффициентов			$N, \text{м}^2$	H	$G, \text{м}^2$	δ^3_K	δ_K	C	T
	$A \times 10^{-3}, \text{м}^2/(\text{кг}/\text{м}^3)$	B	$U10^{-2**}, \text{м}^2/(\text{кг}/\text{м}^3)$							
1	1,2	1,5	3,52	9,4	12,1	16,13	0,58	0,83	0,10	5,0
2	16,1	1,7	7,91	23,0	13,9	25,47	0,51	0,80	0,47	1,0
3	9,7	1,7	4,75	23,0	13,9	25,47	0,51	0,80	0,16	3,2

Коэффициент A зависит от состава полотен и обработанных материалов и соответствует коэффициенту проницаемости полотен и материалов с $p=1$ или $B=0$. Коэффициент B определяет степень изменения коэффициента проницаемости при варьировании плотности полотен и обработанных материалов и практически не зависит от состава полотен (табл. 1).

Зависимости K от $1000/p$ имеют линейный вид, выходят из начала координат и описываются уравнениями общего вида:

$$K \times 10^{10} = U/p, \quad (4)$$

где U – коэффициент размерности, $\text{м}^2/(\text{кг}/\text{м}^3)$, отражающий коэффициент проницаемости полотен и обработанных материалов при $p=1$.

Точность расчета коэффициента проницаемости при использовании уравнения (4) определяется значением плотности полотен и обработанных материалов. При $1000/p < 8$ или $p > 125 \text{ кг}/\text{м}^3$ экспериментальные показатели коэффициента воздухопроницаемости полотен различных видов и обработанных материалов на основе полотен вида 1 и 3 отклоняются от линейных зависимостей K от $1000/p$ (рис. 2, б).

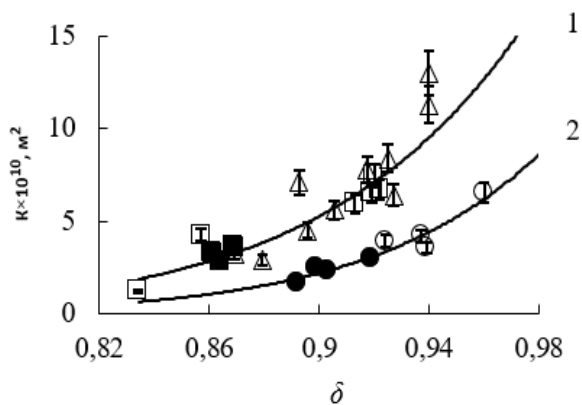


Рис. 3

В другом подходе к моделированию коэффициента проницаемости полотен и обработанных материалов по воздуху в качестве структурного параметра используется коэффициент пористости [22], влияние которого на коэффициент проницаемости полотен и обработанных материалов различного состава представлено на рис. 3.

Зависимости K от δ описываются уравнениями общего вида:

$$K \times 10^{10} = N\delta^H, \quad (5)$$

где N – коэффициент размерности, м^2 ; H – безразмерный коэффициент (табл. 1).

Соотношение между K и δ для полотен 2 и 3 и обработанных материалов на основе полотен вида 3 описывается общей зависимостью (рис. 3, зависимость 1), а отдельной зависимостью – соотношением между K и δ для полотен вида 1 и обработанных материалов на основе полотен вида 1 (рис. 3, зависимость 2). Кроме того, при $\delta < 0,85$ зависимости K от δ сближаются, что свидетельствует о том, что состав полотен видов 1, 2 и 3 и обработанных материалов на основе полотен вида 1 и 3 в незначительной степени зависит от коэффициента пористости (рис. 3).

Полученное в работе сложное соотношение между K и δ для полотен и обработанных материалов (рис. 3) подтверждает ранее установленное отсутствие однозначной зависимости проницаемости пористых тел от коэффициента пористости.

В моделях корреляция соотношений между K и δ достигается включением в уравнения различных структурных коэффициентов, физический смысл которых во многих случаях трактуется произвольно [22]. Одним из таких структурных коэффициентов является гидравлический диаметр пор, рассчитанный как отношение площади

поверхности пор к объему пористого тела, что отражает модель Козени, которая без включения в уравнение параметра извилистости пор, имеет вид [22]:

$$K = \frac{C\delta^3}{D^2}, \quad (6)$$

где D – гидравлический диаметр пор, m^{-1} ; C – постоянная Козени, которая зависит от формы поперечного сечения пор: для пор круглого сечения $C=0,50$, для квадратного – $0,56$, для равностороннего треугольника – $0,60$.

Сложность применения модели Козени для прогнозирования проницаемости пористых тел связана с экспериментальным определением площади поверхности пор. Можно предложить способ применения модели Козени без определения параметра D , что достигается получением зависимостей K от δ^3 (рис. 4 – зависимости коэффициента проницаемости от коэффициента пористости полотен (○) и обработанных материалов вида 1 (●): – общая зависимость (2); полотен вида 2 (Δ) и полотен (□) и обработанных материалов вида 3 (■): – общая зависимость (1)).

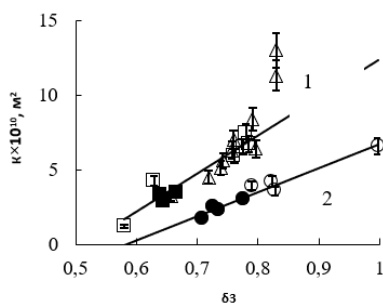


Рис. 4

Зависимости K от δ^3 для полотен и обработанных материалов различного состава не выходят из начала координат и при $K>0$ описываются уравнениями общего вида с двумя переменными:

$$K=G(\delta^3-\delta^3_K) \text{ при условии } \delta^3>\delta^3_K, \quad (7)$$

где G – коэффициент размерности, m^2 , соответствующий коэффициенту проницаемости полотен и обработанных материалов,

для которых $\delta^3-\delta^3_K=1$, что не выполняется на практике при условии $\delta^3<1$; δ^3_K – безразмерный коэффициент, соответствующий критическому коэффициенту пористости. Из уравнения (7) следует, что соотношение $K<0$ не имеет физического смысла или величина δ^3_K ограничивает применение уравнения (7).

Значения коэффициентов G и δ^3_K представлены в табл. 1.

Уравнение (7) является общим для расчета коэффициента проницаемости полотен вида 2 и 3, а также обработанных материалов на основе полотен вида 3. Однако из зависимости 2 на рис. 4 следует, что уравнение (7) используется для расчета коэффициента проницаемости полотен и обработанных материалов видов 2 и 3 с коэффициентами пористости от 0,8 до 0,94. При $\delta^3>0,94$ ($\delta^3>0,84$) расчетные значения, полученные при использовании уравнения (7), значительно меньше экспериментальных данных. В то же время уравнение (7) с высокой точностью определяет коэффициент проницаемости полотен и обработанных материалов вида 1 с коэффициентом пористости от 0,83 до 0,96 ($0,84<\delta^3<0,98$).

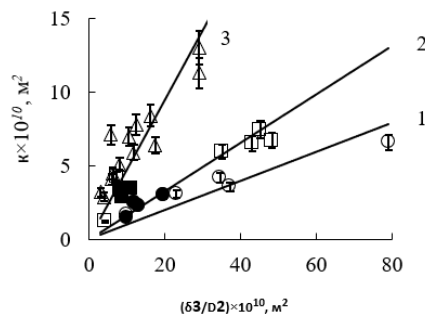


Рис. 5

Для полотен и обработанных материалов на основе волокон известной линейной плотности, которая соответствует массе в граммах волокна длиной 1000 м, существует возможность расчета поверхности волокон и соответственно параметра D . В случае линейных зависимостей K от δ^3/D (рис. 5 – зависимости коэффициента проницаемости от параметра δ^3/D полотен (○) и обработанных материалов вида 1 (●): – общая зависимость (1); полотен (□) и обработанных материалов вида 3 (■): – общая за-

висимость (2); полотен вида 2 (3)) коэффициент C соответствует тангенсу угла наклона кривых.

Для полотен вида 2 получено, что $C=0,47$, что соответствует капиллярам круглого сечения [22]. Для полотен и обработанных материалов видов 1 и 3 величины постоянной Козени меньше 0,5 (табл. 1), что согласно [22] требует введения в уравнение (6) дополнительного коэффициента. Условие, что для всех полотен и обработанных материалов $C=0,5$, выполняется в том случае, когда в процессах прокалывания и термомеханической обработки полотен различного состава форма поперечного сечения капилляров сохраняется.

Общепринятым является использование в уравнении Козени безразмерного параметра извилистости T , который показывает отношение длины капилляров к толщине пористых тел [5]. Рассчитанные значения параметра T представлены в табл. 1.

При этом уравнение (6) примет вид:

$$K = \frac{C\delta^3}{TD^2}. \quad (8)$$

Применение уравнения (6) для прогнозирования коэффициента проницаемости полотен вида 2 и уравнения (8) для расчета коэффициента проницаемости полотен видов 1 и 3 и обработанных материалов видов 1 и 3 связано с выполнением в процессах фильтрации воздуха допущений, принятых при разработке модели Козени. К допущениям относят аналогию между течением воздуха в пористых телах и в отдельном капилляре длиной, равной длине полотен, ламинарный режим течения воздуха в порах и полное заполнение пор воздухом [22], выполнение которых зависит от структуры полотен различного состава и отклонения от которых отражаются величиной коэффициента C .

При прокалывании полотен видов 1 и 2 существует высокая вероятность захвата волокон зазубринами игл с образованием пучков, в которых плотность упаковки волокон превышает плотность упаковки волокон между пучками, из-за чего формируются капилляры со сложной геометрией порового

пространства, длина которых превышает толщину полотен. Количество пучков и плотность упаковки волокон в пучках возрастают при прокалывании полотен вида 1, что связано с повышенной вероятностью захвата зазубринами игл волокон линейной плотности 0,22 текс. Для полотен вида 3 низкая вероятность захвата зазубринами игл волокон повышенной линейной плотности приводит к уплотнению полотен без образования пучков и сохранению ориентации волокон параллельно поверхности полотен, что характерно для механического способа формирования волокнистых холстов.

Следствием течения потока воздуха в уплотненных полотнах вида 1 по капиллярам со сложной формой порового пространства и значительной длины является уменьшение по сравнению с полотнами видов 2 и 3 коэффициента проницаемости (рис. 2...5) и максимальное значение коэффициента T (табл. 1). Кроме того, значительная разность между коэффициентами проницаемости полотен видов 1 и 2 свидетельствует о переносе воздуха в пространстве между пучками, которое для полотен вида 1 уменьшается.

Снижение коэффициента проницаемости полотен вида 3 по сравнению с полотнами вида 2 определяется обтеканием потоком воздуха волокон, ориентированных параллельно поверхности полотен. Увеличение линейной плотности или диаметра волокон приводит к возрастанию потерь потока на их обтекание и к более сложной траектории движения потока с многократным пересечением отдельных струй воздуха между собой. Результатом сложной траектории движения потока воздуха является отклонение от ламинарного режима течения в отдельном капилляре.

ВЫВОДЫ

В работе предложены модели, предназначенные для прогнозирования коэффициента проницаемости по воздуху нетканых иглопробивных полотен из волокон одинаковой линейной плотности и термообработанных материалов из смеси полиэтиленрефталатных волокон линейной плотности

0,33 и 0,22 текс в соотношении 70/30 мас. %.

Установлено, что по сравнению с полотнами из волокон линейной плотности 0,33 и 0,66 текс полотна из смеси волокон линейной плотности 0,33 и 0,22 текс имеют пониженную воздухопроницаемость.

Показано, что модель Козени может быть использована для прогнозирования коэффициента проницаемости полотен из полиэтилентерефталатных волокон линейной плотности 0,33 текс, для полотен другого состава требуется введение дополнительного параметра извилистости.

Предложено уравнение, включающее соотношение между коэффициентом проницаемости и кубическим коэффициентом пористости, являющееся общим для прогнозирования коэффициента проницаемости полотен из полиэтилентерефталатных волокон линейной плотности 0,33 текс, а также полотен и обработанных материалов из полипропиленовых волокон линейной плотности 0,66 текс.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Senthil K.P., Punitha V.* An Overview of Nonwoven Product Development and Modeling of Their Properties // *J. Textile Sci. Eng.* 2017. V. 7. № 4. P. 1...6.
2. *Chen X., Vroman P., Lewandowski M., Perwuelz A.* Study of the influence of fiber diameter and fiber blending on liquid absorption inside nonwoven structures // *Textile Res. J.* 2009. V. 79. № 15. P. 1364...1370.
3. *Thomas D.* Influence of fiber diameter, fiber combinations and solid volume fraction on air filtration properties in nonwovens // *Textile Res. J.* 2012. V. 82. № 19. P. 1948...1959.
4. *Saleh S.S.* Performance of Air Filter Fabric Produced from Scrim Woven and Nonwoven fabrics // *J. American Sci.* 2012. V. 8. № 6. P. 110...120.
5. *Tharewal P.G., Landage S.M., Wasif A.I.* Application of Nonwovens for Air Filtration // *Inter. J. Advanced Res. IT Engineering.* 2013. V. 2. № 2. P. 14...36.
6. *Kumar A., Das D.* A comparative study on filtration performance of mono-, bi-, and multi-constituent nonwoven air filter media // *Textiles. Institute.* 2018. V. 109. № 11. P. 1521...1527.
7. *Kim J.Y., Choi Y., Kim J.* Filtration Efficiency of Fiber Filter for Total Suspended Solid Removal and Backwash Effect // *Korean Society Hazard Mitigation.* 2019. V. 19. № 4. P. 247...256.
8. *Kopitar D., Skenderi Z., Rukavina T.* Impact of calendaring process on nonwoven geotextiles hydraulic properties // *Textile Res. J.* 2014. V. 84. № 1. P. 66...77.

9. *Dragana K., Skenderi Z., Mijović B.* Study on the Influence of Calendaring Process on Thermal Resistance of Polypropylene Nonwoven Fabric Structure // *J. Fiber Bioengineering Informatics.* 2014. V. 7. № 1. P. 1...11.

10. *Lee J.C., Park D.H., Choi J.R., Kim K.Y.* Tensile Properties and Poisson's Ratio of Thermocompression-bonded PET Nonwoven Fabrics Prepared by Needle-punching // *Fibers Polym.* 2019, V. 20. № 9. P. 1969...1974.

11. *Dedov A.V., Nazarov V.G.* Mechanical characteristics of needle punch material obtained from a mixture of polyester and polypropylene fibers treated on roll calendar // *Fibre Chem.* 2011. V. 43. № 3. P. 259...262.

12. *Dedov A.V.* Treatment of polyester fiber needle punch material // *Fibre Chem.* 2009, V. 41. № 2. P. 139...141.

13. *Chernousova N.V., Dedov A.V.* Method of producing needle punched nonwovens having increased tensile strength // *Fibre Chem.* 2019. V. 51. № 3. P. 204...208.

14. *Sakthivel S., Ezhil Anban J.J., Ramachandran T.* Development of Needle-Punched Nonwoven Fabrics from Reclaimed Fibers for Air Filtration Applications // *J. Engineered Fibers and Fabrics.* 2014, V. 9. № 1. P. 149...153.

15. *Makarov B.P., Sheboygan M.V., Matrokhin A.Yu., Mikhailova M.P.* A Method for Producing Nonwoven Fabric Based on Archelon Fiber for Filtration of Air Mixtures // *Fibre Chem.* 2020. V. 51. № 6. P. 437...439.

16. *Tang X., Yan X.* Airflow resistance of acoustical fibrous materials: Measurements, calculations and applications // *J. Indust. Textil.* 2020. V. 49. № 8. P. 981...1010.

17. *Gorjanc D.S.* Permeability properties of dry-laid mechanical bonded nonwovens for filter // *Industrial Textil.* 2023. V. 74. № 2. P. 133...142.

18. *Kucharczyková B., Misák P., Vymazal T.* Determination and evaluation of the air permeability coefficient using Torrent Permeability Tester // *Russian J. Nondestructive Testing.* 2010. V. 46. P. 226...233.

19. *Dedov A.V., Evdokimov A.G., Nazarov V.G.* Modeling Based on Kozeny Model of Air Permeability of Nonwoven-Punched Original and Treated Fabrics // *Fibre Chem.* 2019. V. 51. № 2. P. 121...125.

20. *Kothari V.K., Newton A.* The Air Permeability of Nonwovens Fabrics // *J. Textile Institute.* 1974. V. 65. № 8. P. 525...531.

21. *Dent R.W.* The Air Permeability of Nonwoven Fabrics // *J. Textile Institute.* 1976. V. 46. № 6. P. 220...224.

22. *Шейдеггер А.Э.* Физика течения жидкостей через пористые среды: моногр. Ижевск, 2008. 250 с.

REFERENCES

1. *Senthil K.P., Punitha V.* An Overview of Nonwoven Product Development and Modeling of Their Properties // *J. Textile Sci. Eng.* 2017. V. 7. № 4. P. 1...6.

2. *Chen X., Vroman P., Lewandowski M., Perwuelz, A.* Study of the influence of fiber diameter and fiber blending on liquid absorption inside nonwoven structures // *Textile Res. J.* 2009. V. 79. № 15. P. 1364...1370.
3. *Thomas D.* Influence of fiber diameter, fiber combinations and solid volume fraction on air filtration properties in nonwovens // *Textile Res. J.* 2012. V. 82. № 19. P. 1948...1959.
4. *Saleh S.S.* Performance of Air Filter Fabric Produced from Scrim Woven and Nonwoven fabrics // *J. American Sci.* 2012. V. 8. №. 6. P. 110...120.
5. *Tharewal P.G., Landage S.M., Wasif A.I.* Application of Nonwovens for Air Filtration // *Inter. J. Advanced Res. IT Engineering.* 2013. V. 2. № 2. P. 14...36.
6. *Kumar A., Das D.* A comparative study on filtration performance of mono-, bi-, and multi-constituent nonwoven air filter media // *Textiles. Institute.* 2018. V. 109. №. 11. P. 1521...1527.
7. *Kim J.Y., Choi Y., Kim J.* Filtration Efficiency of Fiber Filter for Total Suspended Solid Removal and Backwash Effect // *Korean Society Hazard Mitigation.* 2019. V. 19. №4. P. 247...256.
8. *Kopitar D., Skenderi Z., Rukavina T.* Impact of calendaring process on nonwoven geotextiles hydraulic properties // *Textile Res. J.* 2014. V. 84. № 1. P. 66...77.
9. *Dragana K., Skenderi Z., Mijović B.* Study on the Influence of Calendaring Process on Thermal Resistance of Polypropylene Nonwoven Fabric Structure // *J. Fiber Bioengineering Informatics.* 2014. V. 7. №. 1. P. 1...11.
10. *Lee J. C., Park D.H., Choi J. R., Kim K.Y.* Tensile Properties and Poisson's Ratio of Thermocompression-bonded PET Nonwoven Fabrics Prepared by Needle-punching // *Fibers Polym.* 2019. V. 20. № 9. P. 1969...1974.
11. *Dedov A.V., Nazarov V.G.* Mechanical characteristics of needle punch material obtained from a mixture of polyester and polypropylene fibers treated on roll calendar // *Fibre Chem.* 2011. V. 43. № 3. P. 259...262.
12. *Dedov A.V.* Treatment of polyester fiber needle punch material // *Fibre Chem.* 2009. V. 41. № 2. P. 139...141.
13. *Chernousova N.V., Dedov A.V.* Method of producing needle punched nonwovens having increased tensile strength // *Fibre Chem.* 2019. V. 51. №3. P. 204...208.
14. *Sakthivel S., Ezhil Anban J.J., Ramachandran T.* Development of Needle-Punched Nonwoven Fabrics from Reclaimed Fibers for Air Filtration Applications // *J Engineered Fibers and Fabrics.* 2014. V. 9. № 1. P. 149...153.
15. *Makarov B.P., Sheboygan M.V., Matrokhin A.Yu., Mikhailova M.P.* A Method for Producing Nonwoven Fabric Based on Archelon Fiber for Filtration of Air Mixtures // *Fibre Chem.* 2020. V. 51. № 6. P. 437...439.
16. *Tang X., Yan X.* Airflow resistance of acoustical fibrous materials: Measurements, calculations and applications // *J. Indust. Textil.* 2020. V. 49. № 8. P. 981...1010.
17. *Gorjanc D. S.* Permeability properties of dry-laid mechanical bonded nonwovens for filter // *Industrial Textil.* 2023. V. 74. №. 2. P. 133...142.
18. *Kucharczyková B., Misák P., Vymazal T.* Determination and evaluation of the air permeability coefficient using Torrent Permeability Tester // *Russian J. Nondestructive Testing.* 2010. V. 46. P. 226...233.
19. *Dedov A.V., Evdokimov A.G., Nazarov V.G.* Modeling Based on Kozeny Model of Air Permeability of Nonwoven-Punched Original and Treated Fabrics // *Fibre Chem.* 2019. V. 51. №2. P. 121...125.
20. *Kothari V.K., Newton A.* The Air Permeability of Nonwovens Fabrics // *J. Textile Institute.* 1974. V. 65. № 8. P. 525...531.
21. *Dent R.W.* The Air Permeability of Nonwoven Fabrics // *J. Textile Institute.* 1976. V. 46. № 6. P. 220...224.
22. *Sheidegger A.E.* Physics of fluid flow through porous media: monograph. Izhevsk, 2008. 250 p.

Рекомендована кафедрой химии и технологии полимерных материалов и нанокompозитов РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 19.05.25.