ISSN 2075-8545 (online)

Nanotechnologies in construction
Нанотехнологии в строительстве
2026; 18 (1):
32–41

Nanobuild.ru

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Научная статья / Original Article
УДК 677.529
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-32-41

CC BY 4.0

Нетканые иглопробивные полотна с наноразмерными усиливающими оболочками из полиуретана для применения в строительстве

Виктор Геннадьевич Назаров[1], **Александр Васильевич Дедов**[1*], **Елена Сергеевна Бокова**[2], **Леонид Алексеевич Иванов**[3]

[1] Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация
[2] Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Российская Федерация
[3] Российская инженерная академия, Москва, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: dedovs55@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью работы является исследование влияния степени пропитки нетканого иглопробивного полотна водными дисперсиями полиуретана различного состава на формирование пористой структуры композиционных материалов строительного назначения. **Материалы и методы исследования.** В качестве объекта исследования использовали нетканое иглопробивное полотно, изготовленное из полиэтилентерефталатных волокон (ТУ 6-13-0204077-95-91) линейной плотности 0,33 текс (диаметром 20–25 мкм), пропитанные водными дисперсиями полиуретанов различного состава. Волокнистый холст получали механическим способом формирования и упрочняли при плотности основного прокалывания 180 см$^{-2}$. Для пропитки использовали водные дисперсии анионно стабилизированного полиуретана марки IMPRANIL DL 1380 (КНР) на основе алифатического диизоцианата с концентрацией полимера 38±5% и анионно стабилизированных полиуретанов марок Аквапол-11 и Аквапол-21 на основе ароматических дииизоцианатов производства ООО «НПП «Макромер» им. В.С. Лебедева», г. Владимир, с концентрацией полиуретана 40±2%. **Результаты и их обсуждение.** Определено влияние водных дисперсий полиуретанов на характер их распределения на волокне в процессе пропитки. Получены материалы с оптимальной пористостой структурой, определяющей процессы тепло- и массопереноса при одновременном сохранении требуемых показателей физико-механических свойств. **Заключение.** При степени пропитки менее 0,1 или коэффициенте пористости 0,8 на поверхности волокон образуются фрагментарные структуры полиуретана марки IMPRANIL DL 1380, что приводит к получению прочных композиционных материалов, проницаемость которых по воздуху практически не отличается от проницаемости исходного нетканого полотна. Разработка таких материалов представляет интерес для теплоизоляции и звукоизоляции в строительных конструкциях. При использовании для пропитки дисперсий Аквапол-11 и Аквапол-21 полиуретановое связующее практически полностью заполняет пространство между волокнами, что приводит к снижению общей пористости композита и представляет интерес к его использованию в качестве гидроизоляции при дорожном строительстве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нетканое иглопробивное полотно, водная дисперсия полиуретанов, пропитка, композиционный материал, пористая структура, наноразмерная оболочка.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Назаров В.Г., Дедов А.В., Бокова Е.С., Иванов Л.А. Нетканые иглопробивные полотна с наноразмерными усиливающими оболочками из полиуретана для применения в строительстве. *Нанотехнологии в строительстве.* 2026;18(1):32–41. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-32-41. – EDN: WBWDXB.

© Назаров В.Г., Дедов А.В., Бокова Е.С., Иванов Л.А., 2026

ISSN 2075-8545 (online)

Nanotechnologies in construction
Нанотехнологии в строительстве

2026; 18 (1):
32–41

Nanobuild.ru

Nonwoven needle-punched fabrics with nano-sized polyurethane reinforcing sheaths for construction application

Viktor G. Nazarov[1], Alexander V. Dedov,[1]*, Elena S. Bokova[2], Leonid A. Ivanov[3]

[1] Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation
[2] Kosygin Russian State University, Moscow, Russian Federation
[3] Russian Academy of Engineering, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: dedovs55@rambler.ru

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the study is to investigate the influence of the impregnation degree of a non-woven needle-punched fabric with aqueous polyurethane dispersions of varying compositions on the formation of the porous structure of composite materials for construction applications. **Materials and methods.** The object of the study is a non-woven needle-punched fabric made of polyethylene terephthalate fibers (Technical Specifications TU 6-13-0204077-95-91) with a linear density of 0.33 tex (diameter 20-25 μm), impregnated with aqueous polyurethane dispersions of different compositions. The fibrous web was formed by mechanical means and strengthened with a primary needle-punching density of 180 cm^{-2}. The impregnation process employed aqueous dispersions of anionically stabilized polyurethane: the brand IMPRANIL DL 1380 (China), based on an aliphatic diisocyanate with a polymer concentration of 38±5%; and the brands Aquapol-11 and Aquapol-21, based on aromatic diisocyanates, produced by LLC "NPP 'Makromer' named after V.S. Lebedev", Vladimir, with a polyurethane concentration of 40±2%. **Results and discussion.** The influence of the aqueous polyurethane dispersions on their distribution pattern on the fibers during impregnation was determined. Materials with an optimal porous structure were obtained, which governs the heat and mass transfer processes while maintaining the required physic-mechanical properties. **Conclusion.** At an impregnation degree of less than 0.1 or a porosity coefficient of 0.8, fragmentary structures of the IMPRANIL DL 1380 polyurethane form on the fiber surfaces. This results in strong composite materials whose air permeability is practically the same as that of the original non-woven fabric. The development of such materials is of interest for thermal and sound insulation in building structures. When using Aquapol-11 and Aquapol-21 dispersions for impregnation, the polyurethane binder almost completely fills the space between the fibers. This leads to a decrease in the overall porosity of the composite, making it promising for use as a waterproofing material in road construction.

KEYWORDS: non-woven needle-punched fabric, aqueous polyurethane dispersion, impregnation, composite material, porous structure, nano-sized sheath

FOR CITATION:
Nazarov V.G., Dedov A.V., Bokova E.S., Ivanov L. A. Nonwoven needle-punched fabrics with nano-sized polyurethane reinforcing sheaths for construction application. *Nanotechnologies in Construction.* 2026;18(1):32–41. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-32-41. – EDN: WBWDXB.

ВВЕДЕНИЕ

Пористые нетканые иглопробивные полотна на основе синтетических волокон [1, 2] находят широкое применение в гражданском и промышленном строительстве в качестве тепло- [3–6], звукоизоляции [3, 7–10], а также в дорожном и гидротехническом строительстве в качестве геотекстиля [11–13]. Основным требованием к полотнам строительного назначения является сочетание высокой пористости для эффективного обеспечения тепло- и звукоизоляции и требуемых для практического применения показателей механических свойств, таких как сопротивление растяжению–сжатию.

Для решения такой компромиссной задачи используют технологию пропитки нетканых полотен полимерными связующими, в частности водными дисперсиями полиуретана [14, 15].

Нетканые иглопробивные полотна преимущественно производят механическим способом формирования волокнистых холстов, что приводит к выраженной анизотропии их механических характеристик [19, 20], для нивелирования которой используют полимерные связующие, обеспечиваю-

щие высокую степень пропитки [21], что приводит к получению композиционных материалов с низкой пористостью.

Авторами данной работы разработан способ термомеханической обработки нетканых полотен, использование которого позволяет получать волокнистые холсты с регулируемым соотношением между коэффициентом пористости и механическими характеристиками [22–24]. Полотна обрабатывают в зазоре между нагретым металлическим валом диаметром 1 м и транспортерной лентой, что, по сравнению с обработкой на валковых кландрах [25, 26], обеспечивает более мягкий нагрева полотен, регулируемое и послойное уплотнение волокон по толщине полотна. Все это в совокупности не приводит к снижению пористости, улучшает механические свойства, обеспечивает близкие механические характеристики в продольном и поперечном направлениях [25, 26], а также влияет на последующий процесс пропитки, позволяя снизить концентрацию и количество используемого полимерного связующего.

В целом, при использовании для пропитки полимерных дисперсий можно выделить несколько основных технологических факторов, определяющих формирование пористой структуры композиционных материалов.

Это, прежде все, количество полимера в готовых полотнах, которое отражает степень пропитки, зависимость характера структурообразования полимерного связующего в нетканом полотне от изменения его объема в процессе пропитки; а также характер его распределения на волокне и в межволоконном пространстве [16–18].

Степень пропитки полотен является технологической характеристикой производства композиционных материалов и рассчитывается известным способом по разнице массы материала после и до пропитки. Способ контроля изменения объема полотен в процессе пропитки подробно описан в работе [18]. Более сложным является анализ распределения полимерного связующего в структуре нетканого полотна, поскольку основывается на визуальной оценке фотографий, полученных различными методами микроскопии, либо на определении косвенных показателей, характеризующих характер пористости (воздухопроницаемость, паропроницаемости и др.).

Управление всеми вышеперечисленными факторами позволяет получать композиционные материалы с различными характеристиками тепло- и массопереноса, проницаемостью по жидкостям, тепло- и звукоизоляционными свойствами.

Целью работы является исследование процесса формирования пористой структуры композиционных материалов строительного и дорожного назначения в зависимости от степени пропитки полотна водными дисперсиями полиуретанов различного марочного состава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования использовали нетканое иглопробивное полотно, изготовленное из полиэтилентерефталатных волокон (ТУ 6-13-0204077-95-91) линейной плотности 0,33 текс (диаметром 20–25 мкм). Волокнистый холст получали механическим способом формирования и упрочняли при плотности основного прокалывания 180 см$^{-2}$. Термомеханическую обработку иглопробивного полотна с коэффициентом пористости 0,94 проводили на описанном выше устройстве при температуре 240 °С и скорости 1,5 м/мин, коэффициент пористости обработанного материала составил 0,88.

Для пропитки использовали водные дисперсии анионно стабилизированного полиуретана марки IMPRANIL DL 1380 (KHP) на основе алифатического диизоцианата с концентрацией полиуретана 50±2% и анионно стабилизированных водных полиуретановых дисперсий марки Аквапол-11 (АКВ-11) и Аквапол-21 (АКВ-21) на основе ароматических диизоцианатов производства ООО «НПП «Макромер» им. В.С. Лебедева», г. Владимир, с концентрацией полиуретана 40±2%. Основные свойства дисперсий АКВ-11 и АКВ-21 исследованы в работе [27].

Образцы термообработанного полотна размером 10×10 см погружали в емкость, заполненную водной дисперсией полиуретана комнатной температуры, и прокатывали валиком в течение 3–5 мин, что достаточно для полного заполнения дисперсией объема полотна. Степень пропитки полотна регулировали разбавлением исходных дисперсий дистиллированной водой. После извлечения из емкости образцы выдерживали на металлической сетке до полного стекания избыточной дисперсии и прокатывали между отжимными валами с зазором в 1/4 толщины полотна, равным 2,5 мм. Термообработку пропитанного полотна выполняли при температуре 160 °С до постоянной массы образцов.

Степень пропитки (C_M, отн. ед.), характеризующая содержание полиуретана в полотне, рассчитывали из уравнения:

$$C_M = \frac{m_1 - m}{m}, \quad (1)$$

где m_1 и m – масса образцов после и до пропитки соответственно, кг.

Массу образцов полотна и композиционных материалов определяли на электронных весах с точностью взвешивания ±0,002 г, толщину – по ГОСТ 12023-93 с применением толщиномера по ГОСТ

11358-70 с ценой деления 0,01 мм. Относительная ошибка определения массы не превышала ±8%. Определение длины и ширины образцов выполняли с точностью измерения ±0,5 мм. Толщину образцов, которая, в основном, влияла на точность определения плотности композиционных материалов, измеряли в шести равномерно удаленных друг от друга точках на поверхности образцов размером 10×10 см. Максимальная относительная ошибка определения толщины и соответственно плотности композиционных материалов составляла ±9%.

Коэффициент пористости (δ, отн. ед.) композиционных материалов, полученных при варьировании степени пропитки полотна, рассчитывали из уравнения:

$$\delta = 1 - \frac{m_f / p_f + m_{PY} / p_{PY}}{V}, \quad (2)$$

где m_f – масса образца полотна до пропитки водными дисперсиями полиуретанов, кг; p_f – плотность полиэтилентерефталатного волокна, кг/м³, равная 1370 кг/м³; m_{PY} – масса полиуретана в образце, кг; p_{PY} – плотность полиуретана, кг/м³, равная 920 кг/м³; V – объем образцов композиционных материалов, м³.

Определение воздухопроницаемости материалов выполняли в соответствии с требованиями ГОСТ 12.088–77. Испытания образцов проводили на приборе FF–12/A (Великобритания) при постоянном давлении воздуха, равном 49 Па. Для определения воздухопроницаемости термообработанного полотна и композиционных материалов использовали коэффициент проницаемости, который рассчитывали из линейного закона д'Арси [28, 29]:

$$w = K \frac{\Delta P}{\eta d}, \quad (3)$$

где w – скорость фильтрации воздуха, м/с; K – коэффициент проницаемости, м²; ΔP – перепад давления воздуха, Па; d – толщина композиционных материалов, м; η – вязкость воздуха, Па×с, равная $1{,}8\times10^{-5}$ Па×с.

Сорбционную емкость обработанного полотна и композиционных материалов определяли на образцах в виде дисков площадью 100 см². В сосуд с дистиллированной водой одновременно помещали 5 образцов, которые извлекали после 2 часов пребывания в жидкости. Каждый отдельный образец помещали на решетку до полного стекания из него жидкости. Сорбционную емкость (Q, кг/кг) образцов, выраженную как отношение массы поглощенной воды к массе образца термообработанного полотна и композиционных материалов как среднее из пяти измерений определяли из уравнения:

$$Q = \frac{m_2 - m}{m}, \quad (4)$$

где m_2 – масса образца после погружения и выдержки в дистиллированной воде в течение 2 ч, кг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки изменения объема полотна в процессе пропитки предложено [16–18] использовать безразмерное отношение коэффициентов уравнений, описывающих зависимости плотности композиционных материалов (p, кг/м³) от степени пропитки (C_M):

$$p = p_0 \left(1 + \frac{k_p}{p_0} C_M \right), \quad (5)$$

где p_0 – плотность полотна, использованного для пропитки, кг/м³; k_p – эмпирический коэффициент размерности, кг/м³.

Постоянный объем обработанного полотна в процессе пропитки водной дисперсией полиуретана характеризуется выполнением условия $k_p/p_0 = 1$, что указывает на прямо пропорциональное соотношение между плотностью композиционных материалов и изменением содержания полиуретана, которое определяется степенью пропитки. Уменьшение объема полотен в процессе пропитки соответствует условию $k_p/p_0>1$, что отражает резкое возрастание плотности композиционных материалов по сравнению с плотностью, которая достигается при пропитке с сохранением объема полотна. Возрастание объема полотна в процессе пропитки определяется условием $k_p/p_0<1$, что характеризует меньшее возрастание плотности композиционных материалов по сравнению с плотностью, которая достигается при пропитке с сохранением объема материала.

В правой части уравнения (5) содержатся две переменные равной размерности (кг/м³), такие как плотность полотна и эмпирический коэффициент размерности k_p. Следующее преобразование уравнения (5) приводит к получению уравнения (6) с одним безразмерным соотношением коэффициентов:

$$\frac{p}{p_0} - 1 = \frac{k_p}{p_0} C_M. \quad (6)$$

Для исходного полотна (полотна без пропитки) с $C_M = 0$ и соответственно с $p_0 = p$ выполняется условие $[(p/p_0)-1] = 0$ и правая и левая части уравнения (6) становятся равными 0, что свидетельствует о том, что зависимости $[(p/p_0)-1]$ от C_M выходят из начала координат.

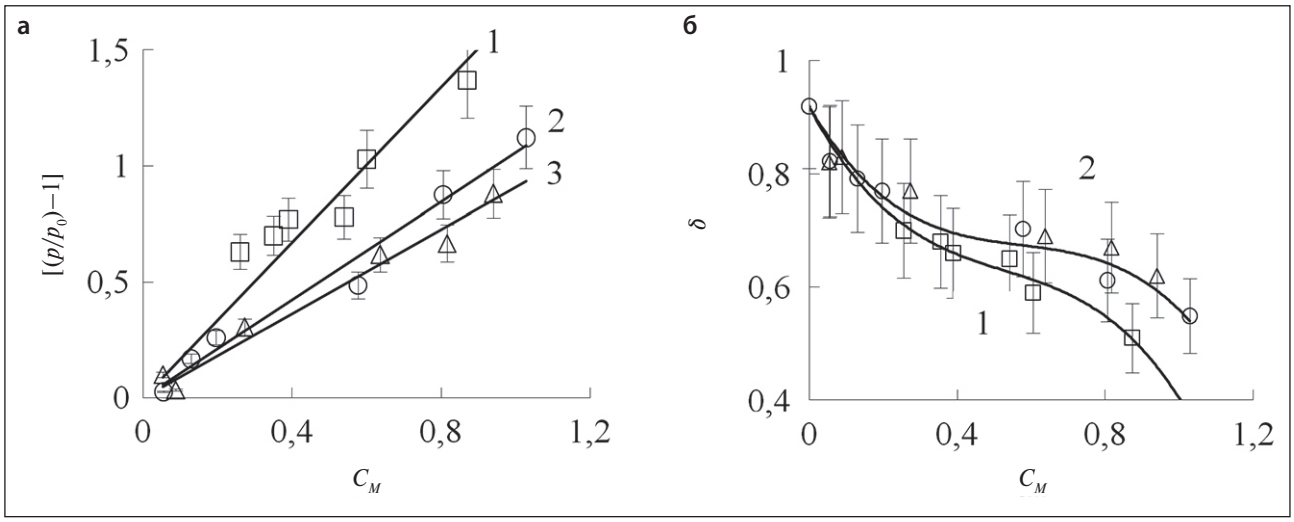

Рис. 1. Зависимости отношения плотности композиционных материалов к плотности полотна от степени пропитки водными дисперсиями (*a*) АКВ-11 (1), IMPRANIL (2) и АКВ-21 (3) и от коэффициента пористости (*b*) полотна, пропитанного водными дисперсиями АКВ-11 (1), IMPRANIL (○) и АКВ-21 (Δ) – общая зависимость 2

Зависимости $[(p/p_0)-1]$ от C_M для композиционных материалов, полученных при варьировании степени пропитки полотна водными дисперсиями полиуретана различного марочного состава, представлены на рис. 1a. Кроме того, на рис. 1b представлены зависимости δ от C_M.

При пропитке термообработанного полотна водными дисперсиями полиуретана марок АКВ-11, АКВ-21 и IMPRANIL значения отношения k_p/p_0 составляют 1,68, 0,91 и 1,06 соответственно. Согласно установленным величинам отношения k_p/p_0 можно заключить, что при использовании дисперсии полиуретана АКВ-11 объем полотна в процессе пропитки уменьшается, при применении для пропитки дисперсий АКВ-21 и IMPRANIL объем полотна не изменяется.

В процессе пропитки объем полотен может изменяться как при контакте полотна с водной дисперсией в пропиточной ванне, так и в процессе термообработки пропитанного полотна. В процессе контакта полотна с водными дисперсиями полимеров происходит увеличение объема, при термообработке пропитанного полотна возможно как уменьшение, так и возрастание объема.

Смачивание волокон водной дисперсией полиуретанов снижает трение между ними, что приводит к разрушению фрикционных связей между волокнами, которые формируются в процессе прокалывания. Особенностью прокалывания является переориентация волокон в направлении, перпендикулярном поверхности полотна. Переориентация сопровождается зацеплением волокон между собой и изменением конфигурации волокон в направлении движения игл. Следствием выхода деформированных волокон из зацепления друг с другом является увеличение толщины полотна при извлечении из пропиточной ванны и соответственно возрастание объема.

Изменение объема в процессе термообработки пропитанного полотна зависит от концентрации полиуретана в использованной дисперсии. Для получения композиционных материалов с относительно небольшой степенью пропитки используются разбавленные и низковязкие дисперсии, которые на поверхности волокон образуют наноразмерные оболочки (рис. 2).

Следствием увеличения жесткости волокон с оболочками из частиц полиуретана является изменение конфигурации волокон и выход из зацепления друг с другом с возрастанием толщины полотен и снижением плотности. Очевидно, что при накоплении частиц полиуретана в пространстве между волокнами, что не приводит к формированию на поверхности волокон оболочек, объем полотен в процессе пропитки не изменяется.

При увеличении концентрации полиуретанов в водных дисперсиях и повышении вязкости дисперсий из частиц полиуретана образуются «мостики», которые соединяют волокна между собой (рис. 2). В процессе термообработки пропитанного полотна происходит удаление воды, и длина мостиков уменьшается. При достаточной прочности адгезионной связи мостиков с поверхностью волокон происходит кооперативное движение волокон с уменьшением объема полотна.

Сохранение объема полотна в процессе термообработки является следствием недостаточной смачиваемости волокон водными дисперсиями полиурета-

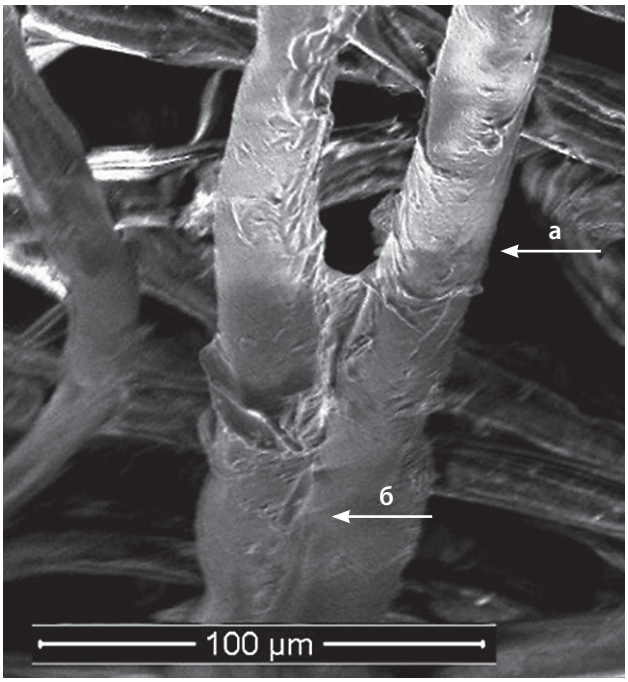

Рис. 2. Фотография участков волокон, на поверхности которых из частиц полиуретана формируются оболочки и мостики, соединяющие волокна между собой: *а* – участок волокна с оболочкой из частиц полиуретана; *б* – «мостик» в месте сплавления волокон

на, из-за чего имеет место относительно небольшая прочность адгезионных связей между «мостиками» и поверхностью волокон, что приводит к отрыву «мостиков» от поверхности волокон, которые остаются в положении, достигаемом в процессе операции иглопрокалывания. Реализация этих процессов приводит к сохранению объема полотна в процессе пропитки.

По сравнению с линейными зависимостями p от C_M зависимости δ от C_M имеют сложный вид, характеризующий неравномерное изменение коэффициента пористости по мере возрастания степени пропитки. При $0 < C_M < 0{,}3$ коэффициент пористости снижается с 0,88 до 0,70. При $0{,}3 < C_M < 0{,}7$ он уменьшается с 0,7 до 0,6 и при дальнейшем возрастании степени пропитки наблюдается значительное уменьшение коэффициента пористости.

Установленное соотношение между δ и C_M является общим для композиционных материалов, полученных при использовании водных дисперсий полиуретана различного марочного состава. При $C_M > 0{,}7$ по сравнению с материалами, полученными при использовании дисперсий АКВ-21 и IMPRANIL, коэффициент пористости материалов, полученных при использовании дисперсии АКВ-11, снижается в большей степени при равном увеличении степени пропитки (рис. 1б).

Снижение коэффициента пористости при $0 < C_M < 0{,}3$ является следствием формирования в процессе иглопрокалывания структуры полотна с неравномерной плотностью упаковки волокон и использования разбавленных дисперсий. В процессе прокалывания со стороны действия игл происходит уплотнение поверхностного слоя полотна и образование пучков с повышенной плотностью упаковки волокон (рис. 3).

При использовании для пропитки разбавленных дисперсий они удерживаются в поверхностном уплотненном слое полотна (рис. 3) с формированием из частиц полиуретана «мостиков» между волокнами. Следствием усадки мостиков при термообработке является снижение толщины поверхностного слоя полотна, что вызывает значительное уменьшение коэффициента пористости. При использовании относительно концентрированных дисперсий достигается равномерная пропитка по толщине полотна. Однако меньшая относительно поверхностного слоя плотность упаковки волокон в объеме ограничивает уменьшение расстояния между волокнами и определяет снижение объема полотна в процессе термообработки только за счет изменения объема поверхностного слоя, что при условии $0{,}3 < C_M < 0{,}7$ характеризуется практически постоянным коэффициентом пористости (рис. 1б).

Распределение частиц полиуретана на поверхности волокон и в пространстве между волокнами определяли по результатам испытаний образцов композиционных материалов на воздухопроницаемость. Зависимости коэффициента проницаемости композиционных материалов по воздуху от степени пропитки и коэффициента пористости представлены на рис. 4.

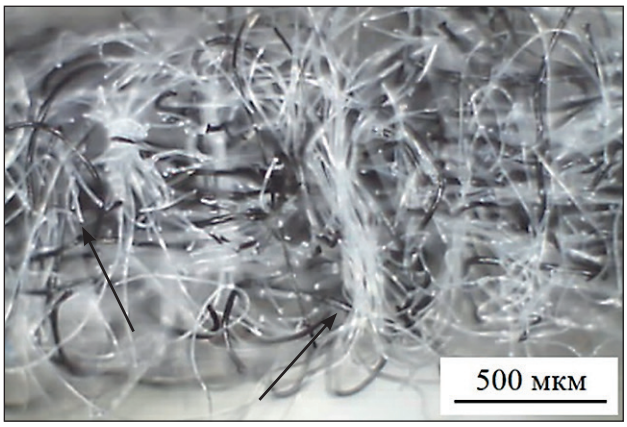

Рис. 3. Фотография поперечного среза иглопробивного полотна (стрелками показаны пучки из переориентированных волокон с повышенной плотностью упаковки, уплотненный слой полотна – в верхней части микрофотографии)

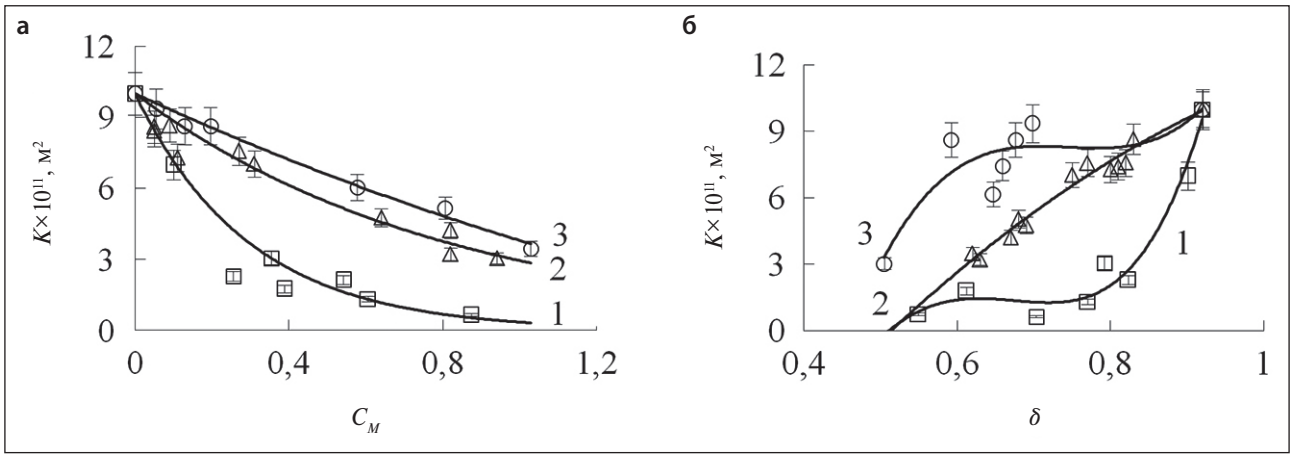

Рис. 4. Зависимости коэффициента проницаемости по воздуху композиционных материалов от степени пропитки (*а*) и коэффициента пористости (*б*) при использовании для пропитки обработанного полотна дисперсий полиуретана АКВ-11 (1), АКВ-21 (2) и IMPRANIL (3)

При равной степени пропитки минимальный коэффициент проницаемости имеет композиционный материал, полученный при использовании водной дисперсией полиуретана АКВ-11 (рис. 4а, зависимость 1). Отметим, что согласно приведенным выше значениям отношения k_p/p_0 по сравнению с другими дисперсиями при применении дисперсии АКВ-11 достигается повышенная усадка обработанного полотна (рис. 1а). Максимальную проницаемость по воздуху имеют композиционные материалы, полученные при использовании для пропитки дисперсии IMPRANIL, для которых соотношение между коэффициентом проницаемости и степенью пропитки отражается практически линейной зависимостью, что соответствует пропорциональной зависимости коэффициента проницаемости от изменения объема пор.

Из зависимостей K от C_M для композиционных материалов, полученных пропиткой полотна дисперсиями АКВ-11 и АКВ-21, следует, что при увеличении степени пропитки от 0 до 0,3 происходит относительно большое снижение коэффициента проницаемости. Дальнейшее возрастание степени пропитки практически незначительно влияет на изменение коэффициента проницаемости композиционных материалов различного состава (рис. 4а). Из полученных результатов следует, что объем сообщающихся пор, доступных для переноса воздуха, существенно снижается при относительно небольшой степени пропитки ($C_M < 0{,}3$), что связано с концентрированием дисперсии в поверхностном слое обработанного полотна (см. выше), и дальнейшее возрастание степени пропитки практически не влияет на объем пор, доступных для переноса воздуха.

По сравнению с зависимостями K от C_M зависимости K от δ отражают сложное соотношение между уменьшением объема пор и проницаемостью композиционных материалов. Влияние коэффициента пористости на коэффициент проницаемости определяется составом водной дисперсии полиуретана. При использовании для пропитки дисперсии IMPRANIL коэффициент проницаемости резко снижается при коэффициенте пористости менее 0,60 (рис. 4б, зависимость 3).

В то же время при использовании дисперсии АКВ-11 относительно небольшое снижение коэффициента пористости с 0,88 до 0,80 приводит к существенному уменьшению коэффициента проницаемости (рис. 4б, зависимость 1). При использовании дисперсии АКВ-21 соотношение между коэффициентом проницаемости и коэффициентом пористости описывается практически линейной зависимостью, из которой следует прямо пропорциональное снижение коэффициента проницаемости по мере уменьшения коэффициента пористости (рис. 4б, зависимость 2).

Относительно небольшое снижение коэффициента проницаемости при уменьшении коэффициента пористости с 0,88 до 0,60 композиционных материалов, полученных при использовании дисперсии IMPRANIL, свидетельствует о том, что при использовании разбавленных дисперсий частицы полиуретана осаждаются на поверхности волокон. При применении дисперсии АКВ-11 существенное снижение коэффициента проницаемости показывает, что частицы полиуретана преимущественно концентрируются в пространстве между волокнами. Для дисперсии АКВ-21 имеет место как осаждение частиц на поверхности волокон, так и заполнение частицами пространства между волокнами.

Зависимости сорбционной емкости композиционных материалов от степени пропитки и коэффициента пористости представлены на рис. 5.

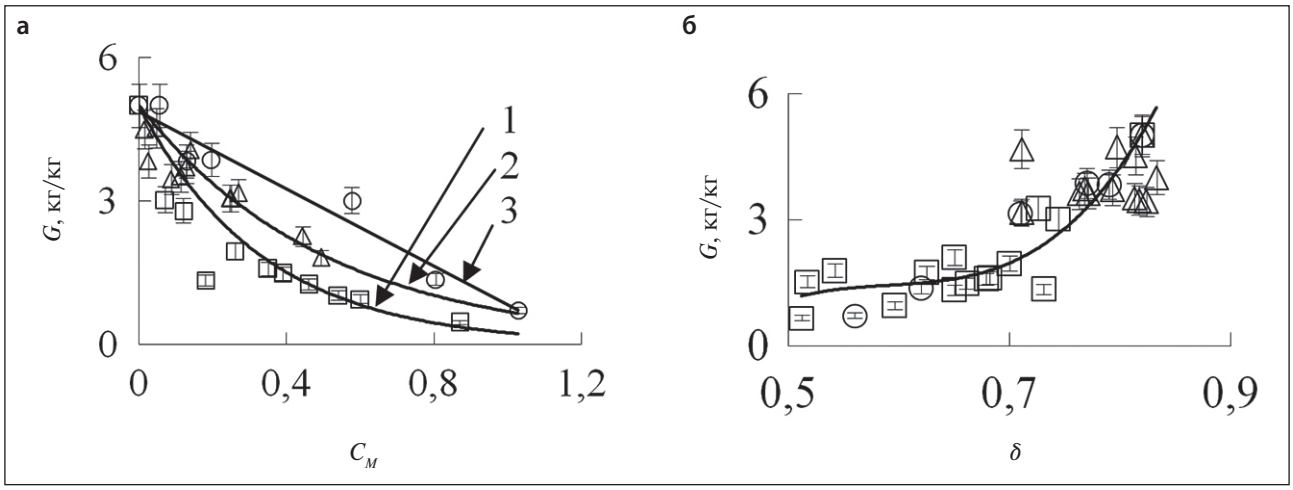

Рис. 5. Зависимости сорбционной емкости композиционных материалов по воде от степени пропитки (*а*) при использовании дисперсий АКВ-11 (1), АКВ-21 (2) и IMPRANIL (3) и от коэффициента пористости (*б*) при использовании для пропитки обработанного полотна дисперсий полиуретана АКВ-11 (□), АКВ-21 (Δ) и IMPRANIL (○)

Из зависимостей G от C_M следует, что сорбционная емкость композиционных материалов определяется марочным составом дисперсий полиуретана. При равной степени пропитки большую сорбционную емкость имеют композиционные материалы, полученные при использовании дисперсии IMPRANIL, для которых соотношение между сорбционной емкостью и степенью пропитки описывается линейной зависимостью, что свидетельствует о пропорциональном уменьшении сорбционной емкости при снижении коэффициента пористости (рис. 5а).

При использовании для пропитки дисперсий АКВ-11 и АКВ-21 при увеличении степени пропитки от 0 до 0,4 происходит относительно заметное снижение сорбционной емкости композиционных материалов. При $C_M > 0{,}4$ сорбционная емкость незначительно зависит от степени пропитки. Полученный результат свидетельствует о неравномерном изменении объема пор при различной степени пропитки обработанного полотна (рис. 5а).

Соотношение между G и δ для композиционных материалов, полученных при использовании дисперсий различных марок, описывается общей зависимостью (рис. 5b). Полученный результат свидетельствует о том, что сорбционная емкость определяется объемом пор, которые формируются при варьировании степени пропитки и изменении объема полотна.

ВЫВОДЫ

1. При использовании для пропитки обработанного полотна водной дисперсии IMPRANIL частицы полиуретана при степени пропитки менее 0,4 осаждаются на поверхности полотна, при использовании дисперсии АКВ-11 частицы полиуретана заполняют пространство между волокнами, при использовании дисперсии АКВ-21 одновременно происходит осаждение частиц полиуретана на поверхности волокон с образованием наноразмерных оболочек и заполнения частицами пространства между волокнами;

2. В процессе термообработки объем полотна, пропитанного дисперсией АКВ-11, уменьшается, при использовании других дисперсий объем полотна не изменяется;

3. Для определения влияния пропитки на воздухопроницаемость и сорбционную емкость композиционных материалов оптимальным является использование зависимости этих характеристик от коэффициента пористости, который при равной степени пропитки отражает влияние на формирование пористости распределения частиц полиуретана в полотне и изменение объема полотна в процессе пропитки.

4. Выявлено, что при строительстве зданий и сооружений с целью обеспечения их тепло- и звукоизоляции целесообразно применение композиционных материалов на основе нетканых полотен, пропитанных полиуретановой дисперсией марки IMPRANIL DL 1380, структура которых обеспечивает высокую проницаемость по воздуху с сохранением прочности на растяжение-сжатие. Композиционные материалы, полученные в результате пропитки нетканых полотен водными дисперсиями марок Аквапол-11 и Аквапол-21, представляет интерес для использования в качестве гидроизоляции при дорожном строительстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Maity S., Singha K. Structure-property relationships of needle-punched nonwoven fabrics. *Frontiers in Science*. 2012;2(6):226-234.

2. Maksudova U. Classification of Methods for Producing Nonwoven Laying Materials. *Inter. J. Recent Technol. Engineering*. 2020;9(1):1333-1335.

3. Tejyan S., Patnaik A., Singh T. Performance of Needle-Punching Lining Nonwoven Fabrics and their Thermal Insulation Properties. *J. Basic. Appl. Sci. Res.* 2011;1(12):3513-3524.

4. Debnath S. Thermal resistance and air permeability of jute-polypropylene blended needle-punched nonwoven. *Indian J. Fibre and Textile Res*. 2011;36(5):122-131.

5. Venkataraman M., Mishra R., Subramaniam, V. Gnanamani A., Kotresh T. M., Militky J. Dynamic heat flux measurement for advanced insulation materials. *Fibers Polym*. 2016;17(6):925-931.

6. Zimina E. L., Skobova N. V., Sokolov L. E., Grishanova S. S. Technologies for Processing Chemical Fiber Waste of Carpet Production. *Fibre Chem*. 2019;51(2):23-25.

7. Abdelfattah A.M., Ghalia E.I., Eman R.M. Using nonwoven hollow fibers to improve cars' interior acoustic properties. *Life Sci. J*. 2011;8(1):344-351

8. Gao B., Zoo L., Zuo B. Sound absorption properties of spiral vane electrospun PVA/nano particle nanofiber membrane and non-woven composite material. *Fibers Polym*. 2016;17(7):1090-1096.

9. Kalauni K., Pawar S. J. A review on the taxonomy, factors associated with sound absorption and theoretical modeling of porous sound absorbing materials. *J. Porous Materials*. 2019;26(3):1795-1819.

10. Thirumurugan V., Kumar M. Design of an Instrument to Determine the Acoustic Characteristics of Non Wovens Made from Recycled Polyester, Jute and Flax. *Fibers Polym*. 2020;21(12):3009-3015.

11. Rawala M., Shahb T., Anand S. Geotextiles: production, properties and performance. *Textile Progress*. 2010;42(3):181-226.

12. Das S.C., Paul D., Fahad M.M., Islam T., Nizam E.H. Geotextiles–A potential Technical Textile Product. *J. Sci. Engin. Res.* 2017;4(10):337-350.

13. Jagany K., Maru A., Prasad K., Goswami P. Natural Disaster Indicators Use of Sensors in Geotextiles. International. *J. Appl. Environmental Sci*. 2017;12(6):1083-1100.

14. Wang L., Xu F., Li H., Liu Y., Liu Y. Preparation and stability of aqueous acrylic polyol dispersions for two-component waterborne polyurethane. *J. Coatings Technol. Res.* 2017;14(1):215-223.

15. Arshad N., Zia K. M., Hussain M. T., Zuber M., Arshad M.M. Synthesis of novel curcumin-based aqueous polyurethane dispersions for medical textile diligences with potential of antibacterial activities. *Polym. Bulletin*. 2022;79(10):7711-7727.

16. Dedov A. V. Porosity of impregnated needle-punch material of varying composition. *Fibre Chem*. 2010;42(8):38-40.

17. Dedov A.V. Needle – punchead material structure of small impregnation with latex. *Polymer Sci. Series D*. 2012;5(3):231-233.

18. Асметков И. Д., Годин Н. И., Дедов А. В. Влияние режимов пропитки на пористую структуру композиционных материалов с волокнистым наполнителем из полипропиленовых волокон. *Пласт. массы*. 2024;(6):19-22. https://doi.org/10.35164/0554-2901-2024-06-19-22 EDN: GBFBTB

19. Rawal A., Kameswara V., Stephen R., Jeganathan R.A. Effect of Fiber Orientation on Pore Size Characteristics of Nonwoven Structures. *J. Appl. Polym. Sci.* 2010;118(5):2668-2673.

20. Senthil K.P., Punitha V. An Overview of Nonwoven Product Development and Modelling of Their Properties. *J. Textile Sci. Eng*. 2017;7(4):1-6.

21. Dedov A.V., Nazarov V. G. Mechanical Properties of Composite Materials Based on Latex-Impregnated Needle-Punched Nonwoven Fabrics from Fibers of Different Nature. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018;9(1):47-51.

22. 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;7(1):1-11.

23. 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;20(9):1969-1974.

24. Cucumazzo V., Demirci E., Pourdeyhimi B., Silber Schmidt V.V. Anisotropic mechanical behavior of calendered nonwoven fabrics: Strain-rate dependency. *J. Composite Mater*. 2021;55(13):1783-1798.

25. Dedov A.V., Roev B.A., Bobrov V.I., Kulikov G.B., Nazarov V.G. Mechanism of Stretching and Breaking of Needle-Punched Nonwovens. *Fibre Chem*. 2018;49(5):334-337.

26. Nazarov V.G., Dedov A.V., Evdokimov A.G. Nonwoven needle-punched materials with high tensile strength. *Fibre Chem*. 2022;54(4):248-251.

27. Евсюкова Н. В., Коваленко Г. М., Бокова Е. С. Исследование полиуретановых водных дисперсий марки Аквапол® для производства искусственных кож. *Пласт. массы.* 2021;(5-6):36-39. https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-5-6-36-39 EDN: FOCEZQ

28. Nazarov V.G., Dedov A.V. Influence of the processing of nonwoven needle-punched materials on the air flow mode. *Fibre Chem*. 2022;53(5):317-320.

29. Nazarov V.G., Dedov A.V. Application of the linear filtration law for predicting air permeability of non-woven needle-punched fabrics. *Fibre Chem*. 2022;53(5):321-325.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Назаров Виктор Геннадьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные материалы принтмедиаиндустрии», Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация, 110505n@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7243-9739

Дедов Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные материалы принтмедиаиндустрии», Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация, dedovs55@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-9636-9467.

Бокова Елена Сергеевна – доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии полимерных материалов и нанокомпозитов, Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Российская Федерация, esbokova@ya.ru, https://orcid.org/0000-0001-7769-9639

Иванов Леонид Алексеевич – кандидат технических наук, вице-президент Российской инженерной академии, член Международной федерации журналистов; Москва, Российская Федерация, L.a.ivanov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9513-8712

ВКЛАД АВТОРОВ

Назаров В. Г. – научное руководство, концепция исследований, составление плана экспериментальных работ, выводы статьи.

Бокова Е.С. – участие в разработке научной программы исследований, доработка текста статьи.

Дедов А. В. – проведение экспериментальных работ, обработка результатов эксперимента, написание исходного текста.

Иванов Л.А. – участие в разработке научной концепции работы, корректировка текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 08.12.2025; одобрена после рецензирования 05.02.2026; принята к публикации 10.02.2026.