

УДК 685.34.017.84; 539.217

Ю. Д. Котюков, В. И. Левченко, О. В. Роганков, М. В. Швеи, В. Б. Роганков

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, 65039, Украина

КОНЦЕПЦИЯ И МОДЕЛЬ МЕЗОСКОПИЧЕСКОЙ ПОРИСТОСТИ ТОНКИХ ПРОНИЦАЕМЫХ СРЕД

Имеются два основных препятствия для объективного сравнения свойств и выбора предпочтительного варианта из ряда подходящих текстильных материалов (ТМ), относящихся к тонким проницаемым средам: 1) различие экспериментальных методологий и инструментов, используемых разными авторами при оценке проницаемости тканей для влажного водяного пара; 2) различие лабораторных условий, при которых проводятся подобные эксперименты и разнообразие методик, предложенных к настоящему времени для опытного определения пористости ТМ. Недавно мы изучили первый из указанных факторов [В.Б. Роганков и др., Холодильная Техника и Технология, 51(1), 2015, стр.47-54] и наметили возможные пути преодоления этого препятствия. В данной работе основное внимание уделено второму фактору. Сформулирована новая концепция мезоскопической внутринитевой пористости для любых тканых и нетканых ТМ. На её основе введена альтернативная базовая (АБ) модель для теоретической оценки эффективной пористости как гидрофильных, так и гидрофобных проницаемых сред. В качестве исходной информации в ней используются только стандартные (но зависящие от условий их измерения) данные по т.н. квадратной массе и толщине исследуемого ряда различных образцов ТМ. На основании разработанного нами метода анализа, применённого к массиву из 41 таких точек, взятых из пяти разных экспериментальных работ, предложены простые, физически-обоснованные и не содержащие подгоночных коэффициентов формулы АБ-модели. Они позволяют надёжно и без дополнительных измерений оценить такие фундаментальные для любого сопоставления различных ТМ параметры, как плотность матрицы (влажной и сухой), наблюдаемая эффективная пористость (при любом уровне влажности) и максимальная гигроскопичность ТМ.

Ключевые слова: стандартная пористость – гидрофильность и гидрофобность – эффективная пористость – альтернативная базовая модель проницаемых сред

Ю. Д. Котюков, В. И. Левченко, О. В. Роганков, М. В. Швеи, В. Б. Роганков

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

КОНЦЕПЦІЯ І МОДЕЛЬ МЕЗОСКОПІЧНОЇ ПОРИСТОСТІ ТОНКИХ ПРОНИКНИХ СЕРЕДОВИЩ

Є дві основних перешкоди для об'єктивного порівняння властивостей і вибору найкращого варіанту з ряду підходящих текстильних матеріалів (ТМ), які відносяться до тонких проникних середовищ: 1) відмінність експериментальних методологій і інструментів, використовуваних різними авторами при оцінюванні проникності тканин для вологої водяної пари; 2) відмінність лабораторних умов, при яких проводяться подібні експерименти, і різноманітність методик, запропонованих на цей час. Нещодавно ми детально вивчили перший з вказаних факторів [В.Б. Роганков та ін., Холодильна Техніка та Технологія, 51(1), 2015, стор.47-54] і накреслили можливі шляхи подолання цієї перешкоди. В цій роботі основну увагу приділено другому фактору. Сформульовано нову концепцію мезоскопічної внутринишньої пористості для будь-яких тканих і нетканых ТМ. На її основі введено альтернативну базову (АБ) модель для теоретичного оцінювання ефективної пористості як гідрофільних, так і гідрофобних проникних середовищ. Як початкова інформація в ній використовуються лише стандартні (але залежні від умов їх вимірювання) дані по т.зв. квадратній масі і товщині досліджуваного ряду різних зразків ТМ. На підставі розробленого нами методу аналізу, застосованого до масиву з 41 таких точок, взятих з п'яти різних експериментальних робіт, запропоновані прості, фізично-обґрунтовані і такі, що не містять підгінних коефіцієнтів, формули АБ-моделі. Вони дозволяють надійно і без додаткових вимірювань оцінити такі фундаментальні для будь-якого зіставлення різних ТМ параметри, як густина матриці (вологої і сухої), спостережувана ефективна пористість (при будь-якому рівні вологості) і максимальна гігроскопічність ТМ.

Ключові слова: стандартна пористість – гідрофільність і гідрофобність – ефективна пористість – альтернативна базова модель проникних середовищ

DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/0453-8307.5/2015.44797>

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальное и теоретическое исследование пористости различных *проницаемых сред* (ПС) (от текстильных полотен и электродов топливных элементов до подземных, насыщенных нефтью или природным газом пластов грунта) остаётся трудноразрешимой проблемой, несмотря на давнюю историю. Сама по себе пористость, обозначаемая, обычно, большой буквой *П* и измеряемая в процентах, определяется весьма просто [1]:

$$П = (1 - \rho_V / \rho_M) \cdot 100\% , \quad (1)$$

где ρ_V - объёмная плотность ПС, а ρ_M - объёмная плотность соответствующей *твёрдой* (кристаллической, аморфной, полимерной, зернистой, трубчатой или имеющей волокнистую структуру) *матрицы*. В этом определении допускается однородность распределения общей массы матрицы m_M , кг в полном объёме V , м³, что, конечно, далеко не соответствует действительным ПС, но ведёт к ещё более простому смыслу пористости *П*:

$$П = (1 - V_M / V) \cdot 100\% , \quad (2)$$

в котором объём *фрактальной губчатой структуры матрицы* $V_M = V - V_B$ равен разности измеряемого объёма V и объёма *сухого* воздуха V_B (точнее, вакуума), дополняющего объём матрицы V_M до полного объёма PCV .

Такая аддитивность объёмов не предполагает возможную проницаемость самой *внутренней* структуры матрицы, что может соответствовать наличию *нанопор* в этой структуре. Более того, при изучении флюидных транспортных процессов переноса массы, теплоты и электрического заряда, представляющих основное направление использования PC , нужно обладать информацией о реальной структуре каналов переноса тех или иных свойств. С этой точки зрения, исследователю важно знать, являются ли *внутренние нанопоры* матрицы (при их наличии, разумеется) *проницаемыми* для частиц флюида. Таким образом, нужно определить степень их дополнительного влияния на интенсивность основного транспорта свойств через *микropopы*, *внешние* по отношению к твёрдой матрице PC . В противном случае, когда *внутренние нанопоры* отделены от *внешних микropop* непроницаемыми для флюида стенками (например, трубчатой матрицы) влияние на процессы транспорта должна оказывать уже не полная, а *эффективная пористость* $\Pi_{\text{Э}}$, меньшая первой $\Pi_{\text{Э}} < \Pi$ за счёт суммарного паразитарного объёма таких внутренних нанопор, не участвующих в переносе свойств.

Заметим, что в данной ситуации ещё одно популярное определение пористости [1], предполагающее возможность идеального (без пустот и наличия влажного воздуха (BB)) заполнения объёма вакуума жидкостью ($Ж$), например, водой: $V_B = V_{Ж}$ с известной плотностью $\rho_{Ж}$ оказывается *априори неточным*:

$$\Pi = V_{Ж} / V = (m_{M+Ж} - m_M) / (\rho_{Ж} V) \quad (3)$$

Вода не заполняет, в силу указанной особенности PC , весь объём внутренних нанопор такой матрицы и измеряемая пористость Π на деле оказывается только эффективной пористостью $\Pi_{\text{Э}}$. Основным недостатком измерения величины массы матрицы, насыщенной водой: $m_{M+Ж}$ является её неизбежное для гидрофильных PC *набухание*. Оно, напротив, завышает объём $V_{Ж} > V_B$ и может настолько искусственно увеличивать значение $\Pi_{\text{Э}}$, что уже будет выполняться неравенство: $\Pi_{\text{Э}} > \Pi$. Если добавить к сказанному выше, что измерение массы *сухой* матрицы m_M из (3), а также её "чистого" объёма V_M в (2), зачастую, требует применения так называемых *разрушающих* (требующих тщательного измельчения матрицы до полного удаления из неё газовых включений) *методологий* [1] *определения* ρ_M из (1), то следует признать, что существующие способы оценки пористости Π (в лучшем случае, её эффективного значения $\Pi_{\text{Э}}$) далеки от совершенства.

Все перечисленные трудности в значительной мере усугубляются переходом к изучению тонких PC ($ТПС$), один из линейных размеров которых (толщина δ , м) на несколько порядков меньше других линейных размеров: $\delta \ll b, a$ (ширины b и длины a , определяющих поперечный перерез $ТПС$ с площадью нормального сечения $A_{\perp} = b \cdot a$, м²). Анизотропия таких структур существенно влияет на динамику транспортных процессов, вызванных наличием стационарных градиентов давления, температуры, электростатического потенциала в δ -направлении, приводящих к возникновению плотностей

потоков импульса, теплоты, заряда, соответственно, через нормальное сечение A_{\perp} . Хотя, формально, к типу $ТПС$ можно отнести, например, стену дома, возведённую из газобетона толщиной $\delta = 0.3$ м и площадью $A_{\perp} = 300$ м², в данной работе будут исследованы, преимущественно, специфические $ТПС$, характеризующиеся толщиной, измеряемой долями миллиметра: $\delta \in [0.1 \div 1] \cdot 10^{-3}$ м и типичной площадью поперечного сечения, порядка нескольких десятков квадратных сантиметров, например: $A_{\perp} = 0.1 \times 0.1 = 0.01$ м². Для них допущение *однородности* распределения массы матрицы m_M по объёму $ТПС$ в формулах для Π (1-3):

$$V = \delta b a \equiv \delta \cdot A_{\perp} \quad (4)$$

становится фактором, существенно искажающим оценку её реальной структуры и пористости, являющейся усреднённой характеристикой PC .

Выбор в данной работе довольно большого числа различных натуральных и искусственных текстильных материалов в качестве объекта исследования, относящегося к обескураживающему типу $ТПС$, обусловлен двумя основными причинами. Первая состоит в том, что, несмотря на большую актуальность, проблема оценки пористости подобных материалов решается в большинстве опубликованных работ [2-6] только косвенным образом. Авторы, как правило, ограничиваются информацией о двух характеристиках – *толщине* δ , мм и величине γ , г/м², часто называемой за рубежом *весом материала* (а также *поверхностной плотностью* или, даже, *квадратной массой*). Предполагая, по-прежнему, *однородность* распределения массы матрицы m_M , как в поверхностных, так и во внутренних A_{\perp} -сечениях, рассматриваемых в δ -направлении, можно прийти к тривиальной оценке *однородной объёмной плотности*:

$$\rho_V [кг / м^3] = \gamma [г / м^2] / \delta [мм], \quad (5)$$

где нами подчеркнута удобство используемой ниже комбинации стандартных единиц измерения. Эта важная характеристика текстильных материалов, лежащая, согласно формуле (1), в основе определения Π , должна оставаться примерно (в пределах погрешности измерений) *постоянной* при любом взаимосвязанном варьировании аргумента δ и его линейной, проходящей через начало координат функции $\gamma(\delta)$, *если предположение однородности распределения массы внутри объёма* V из (4) справедливо для *отдельного материала*.

Ниже будет показано, что одновременная обработка обширного массива опытных $\gamma(\delta)$ -данных по разным текстильным материалам, но *измеренным по единой методике и с сохранением условий проведения опыта* для различных образцов в рамках каждой конкретной работы, приводит к довольно интересным результатам (Раздел 2). Выясняется, что с погрешностью, ненамного превосходящей указанную авторами неопределённость эксперимента, такие $\gamma(\delta)$ -данные надёжно описываются *линейными* функциями. Эти функции не проходят через начало координат при $\delta \rightarrow 0$ (т.е. предсказывают всегда меньшее, чем $\gamma(\delta)$ по абсолютной величине асимптотическое значение поверхностной плотности γ^0 , г/м²). В целом, они выглядят как характеристики единой (случайно выбранной в каждой отдельной экспериментальной работе) псевдо- $ТПС$, имеющей *постоянную объёмную плотность* ρ_V^0 и соответствующей исследованному ряду материалов:

$$\gamma(\delta) = \rho_V^0 \delta \pm \gamma^0. \quad (6)$$

В некоторых случаях, бoльшим значениям наклона ρ_V^0 соответствует знак минус перед асимптотической поверхностной плотностью псевдо-ТПС γ^0 . Замечательной особенностью всех полученных нами оценок ρ_V^0 -величин является не только их количественная близость к рассчитанному с помощью (5) ρ_V -данным, но и устойчивое выполнение неравенства $\rho_V^0 < \rho_V(\delta)$ для всех изученных в каждой из работ [2-6] рядов образцов текстильных материалов.

Приведенные наблюдения и их предполагаемый нами физический смысл позволил сформулировать в данной работе (Раздел 3) концепцию мезоскопической пористости для ТПС. Чтобы пояснить использованный подход, напомним, что расширенное применение дифференциальных уравнений к описанию не только обычных сплошных сред (газовых, жидкостных и других микроскопически-дискретных структур), но и к описанию пористых сред, требует введения т.н. *характерного элементарного объема* V^0 [7]. Его геометрическая форма, как правило, допускается кубической: $V^0 = L^3$ и именно к этому *минимально-допустимому объёму*, позволяющему использовать стандартный аппарат теории сплошных сред, относится известное понятие *субстанциональной производной*. Не останавливаясь здесь на подробностях (Раздел 3), укажем важное следствие такой концепции. Все исследуемые линейные размеры *объёмных ПС* должны превышать значение длины ребра L . Это требование, с очевидностью, может нарушаться именно для δ -направления ТПС:

$$b, a \geq L \quad (a) \quad \delta < L \quad (b), \quad (7)$$

что и является признаком *мезоскопичности среды*.

С другой стороны, обычное для ряда стандартных моделей классической механики и электродинамики отнесение *непрерывной* (т.е. *распределённой*) массы или *непрерывного* заряда системы к геометрическим точкам, линиям или поверхностям при определении линейных или поверхностных плотностей приводит, как следствие, к физически-абсурдным бесконечностям или огромным значениям для их объёмной плотности ρ_V , если допустить ненулевой (т.е. реалистичный) объём $\sim \langle d \rangle^3$ любых частиц – носителей указанных свойств. Исследователь должен надёжно оценить *нижнюю и верхнюю границы мезоскопичности*, отделяющие её, соответственно, от области *микроскопического поведения дискретной системы*, где теория сплошных сред становится неприменимой, а также от области *макроскопичности*, где применима линейная неравновесная термодинамика и её законы. Экстраполяция последних (т.е. законов Фика для диффузии, Фурье для теплопроводности, Ньютона для внутреннего трения и, наконец, Дарси для ПС) в область мезомасштабов ТПС без учёта фактора анизотропии, неизбежно будет приводить к искажённым оценкам микроскопической однородной пористости P с помощью формул (1-4). Этот недостаток может существенно ограничивать возможность реалистичной оценки соответствующих коэффициентов переноса.

В данной работе предлагается новая концепция мезоскопичности, применимая к ТПС, и будут сформулированы основные положения теории с обсуждением развитой нами расчётной методологии определения пористости, позволяющей избежать многих недостатков стандартного подхода к её оценке. Опираясь только на экспериментальную информацию о $\gamma(\delta)$ -функции для ряда ТПС, измеренных в одинаковых внешних условиях влажности, температуры и давления, мы надеемся обосновать

возможность реалистичной оценки обычной пористости и мезо-пористости в любых ПС. Другим следствием развитой методологии является надёжный прогноз с её помощью практически-важных различий в эффективной *гидрофильности* (введённая нами базовая модель в состоянии предсказать даже предельную толщину $\delta_{ж}$ жидкой поверхностной плёнки) и *гидрофобности* исследованных ТПС. Все количественные предсказания пористости в данной работе хорошо согласуются с (довольно редкими, к сожалению) надёжными оценками этой характеристики для ПС [2] и ТПС [3], приводимыми отдельными авторами.

II. АНАЛИЗ ГРУПП ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ $\gamma(\delta)$ -ДАНЫХ И МОДЕЛЬ БАЗОВЫХ ПС ДЛЯ СТРУКТУРО-ПОДОБНЫХ ГРУПП ОБРАЗЦОВ.

Данные $\gamma(\delta)$ -образцов, приведенные в работе Трещалина и др. [2] по нетканым полотнам "Холлофайбер" (5тт), нетканым полотнам "Геотекс" (6тт) и нетканым полотнам "Геоком" (9тт) имеют довольно значительную толщину δ , принадлежащую, соответственно, интервалам $(4.5 \leq \delta \leq 26.33 \text{ мм})$, $(1.73 \leq \delta \leq 3.72 \text{ мм})$ и $(1.75 \leq \delta \leq 6.37 \text{ мм})$. Они, строго говоря, не относятся к типу ТПС, имеют большой разброс экспериментальных точек (особенно для полотен "Холлофайбер") и характеризуются сравнительно малой объёмной плотностью: $(6.7 \leq \rho_V \leq 50.4 \text{ кг/м}^3)$, $(90 \leq \rho_V \leq 160 \text{ кг/м}^3)$ и $(60 \leq \rho_V \leq 140 \text{ кг/м}^3)$, соответственно. Несмотря на перечисленные ограничения и недостатки экспериментальных оценок в [2] положения $\gamma(\delta)$ -точек, а также объективные отличия этих материалов от типа ТПС, являющегося главным объектом нашего анализа, мы использовали развиваемый в работе подход и для данного массива данных с целью установления интервала его применимости.

Основной задачей, здесь, была демонстрация *универсальности разрабатываемой методологии предсказания пористости* в любых ПС с использованием весьма ограниченного и, часто, довольно-неточного исходного материала по $\gamma(\delta)$ -точкам. Кроме того, несмотря на формальное подобие ряда свойств, наблюдаемое в группе перечисленных выше нетканых полотен, нами замечено принципиальное различие в знаке наклона $\rho_V(\delta)$ -зависимости между материалами "Холлофайбер" (где он отрицательный) с одной стороны, и "Геотекс и Геоком" (где он положительный), с другой. Это различие соответствует отмечаемому выше изменению знака перед величиной поверхностной плотности γ^0 в уравнении (6) (положительного, в первом ("Холлофайбер") из рядов $\gamma(\delta)$ -точек и отрицательного для двух других рядов ("Геотекс и Геоком").

Дальнейший анализ $\gamma(\delta)$ -данных, взятых из работы Boguslawska-Baczek & Nes [3] по натуральным волокнам шерсти (5тт), а также шерсти (45 %) с добавками вискозы (55 %) (2тт) или полиэстера (55 %) (2тт), подтвердил наличие именно двух типов описанного выше поведения. Соответствующий пересчёт линейных $\rho_V(\delta)$ -трендов снова продемонстрировал, что при знаке "минус" перед величиной γ^0 мы получаем *положительный* наклон $\rho_V(\delta)$ -прямой у чистой шерсти, тогда как у смешанных с искусственными волокнами вискозы и полиэстера шерстяных тканей знаку "плюс" перед γ^0 соответствует *отрицательный* наклон $\rho_V(\delta)$.

Гипотетически, последнее означает с физической точки зрения, что *уменьшение средней объёмной плотности ПС по мере увеличения толщины δ может быть вы-*

звано очень большой неоднородностью в распределении массы по толщине и, следовательно, по объёму: $V = \delta \cdot A_{\perp}$. Такое явление, вероятно, реализуемо в гидрофобных материалах, подвергнутых воздействию влаги (жидкости – Ж или/и очень влажного воздуха – ВВ). В этом случае гидрофобность препятствует дальнейшему продвижению капельной влаги внутрь ПС, которая остаётся, благодаря этому фактору, сравнительно более сухой и, соответственно, имеющей меньшее значение ρ_V при больших значениях δ . Если такое объяснение наблюдаемых фактов справедливо, то асимптотическое наибольшее значение $\rho^0(\delta \rightarrow 0)$ должно характеризовать "барьерный" слой влаги, скопившийся на поверхности гидрофобного ПС в виде отдельных капель. В то же время постоянное (в линейном $\gamma(\delta)$ -тренде) значение наклона ρ_V^0 определяет соответствующее состояние плотности незначи-

тельно-увлажнённой ПС, содержащей только небольшое количество водяного пара.

Предложенная выше концепция гидрофобности ПС допускает существование качественных различий в поведении гидрофильных ПС. Гораздо лучшее, по сравнению с гидрофобными ПС усвоение влаги ведёт к большему значению средней плотности увлажнённой ПС $\rho^0(\delta)$ (в линейном $\gamma(\delta)$ -тренде) для группы структуро-подобных ПС. Введённое ниже обозначение некоторой фиксированной толщины δ_0 для предлагаемой нами модели базовой гидрофильной ПС не следует смешивать с величиной $\delta_{Ж}$, получаемой при пересечении $\gamma(\delta)$ -прямой оси абсцисс. Такое пересечение наблюдается только для структуро-подобных гидрофильных групп образцов, показанных чёрными символами на Рис. 1а и б.

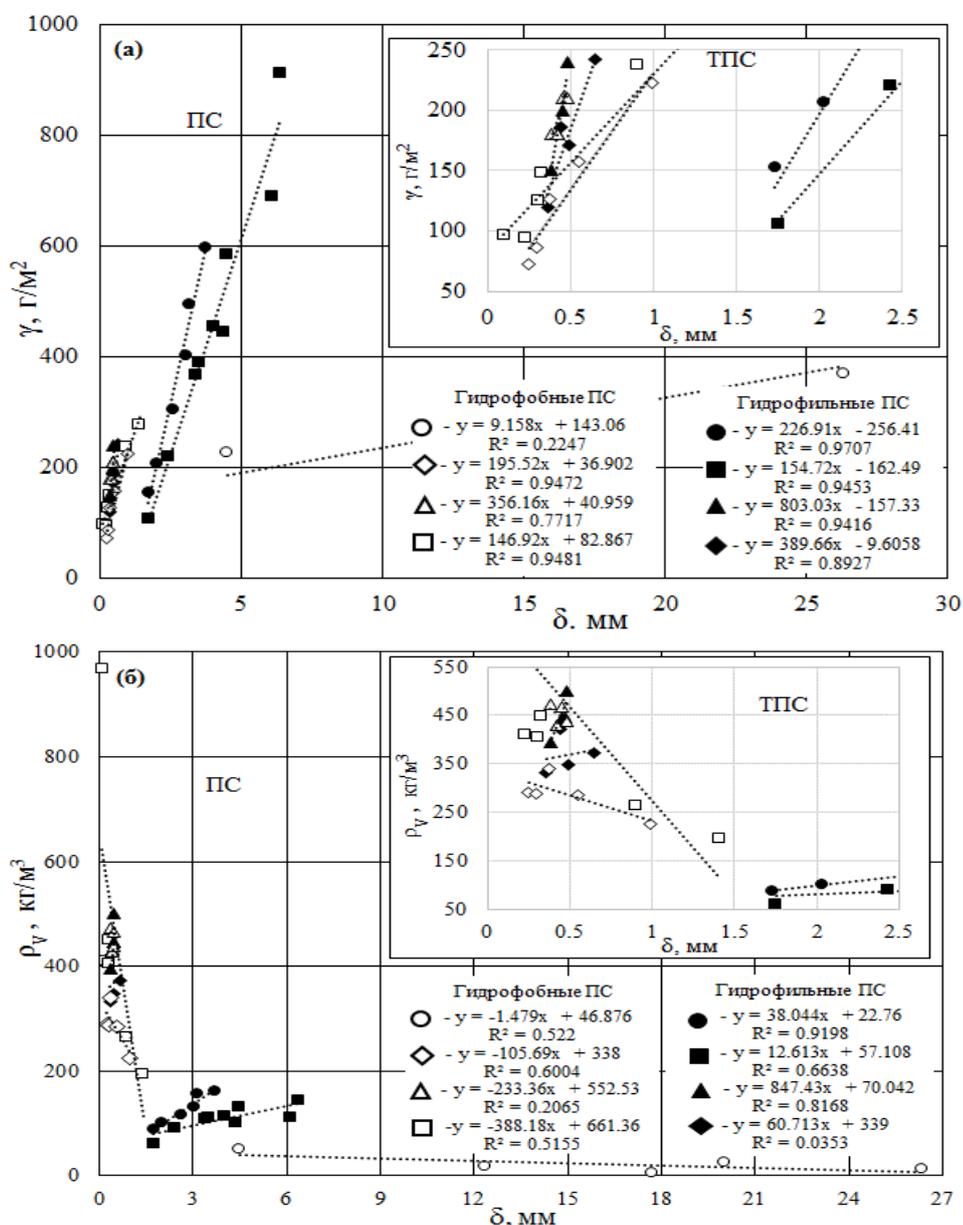


Рисунок 1 – Линейные тренды для групп гидрофильных (чёрные символы – см. текст) и гидрофобных (белые символы – см. текст) ПС и ТПС, полученные с использованием экспериментальных данных [2-6] в координатах $\gamma(\delta)$ (а) и $\rho_V(\delta)$ (б).

К ним в данной работе отнесены нетканые полотна "Геотекс" [2] (кружки) и "Геокон" [2] (прямоугольники), чистая шерсть [3] (треугольники), а также волокнистые составы чистого хлопка (Зтт) (ромбы) и хлопка (80 %) с относительно небольшим добавлением искусственного волокна вискозы (20%) (1т), взятые из работы Дрозда, Марцинкевича и Михалко [4]. Здесь интересно указать, что ещё один образец хлопка (82 %) с добавлением волокон полиэфира (полиэстера) (18 %) (1т) настолько смещает общий линейный $\gamma(\delta)$ -тренд для всех 5тт работы [4] в область гидрофобности исследованных ТПС, что мы были вынуждены исключить его из рассмотрения. То же самое относится к одному из образцов гидрофильного "Геоконма" (Геокон-ДТМ-300) из работы [2], также явно имеющего "гидрофобное" воздействие на количественные характеристики $\gamma(\delta)$ -тренда.

Для проверки выдвинутых выше гипотез о различиях в гидрофильном и гидрофобном поведении ПС нами были привлечены дополнительные $\gamma(\delta)$ -данные для групп, преимущественно, гидрофобного типа, показанные белыми символами на Рис. 1а и 1б, измеренные в работах Wang et al [5] (ромбы) и Huang & Qian [6] (прямоугольники). Они добавились к ранее изученным группам "Холлофайбер" [2] (кружки) и шерсти с искусственными волокнами [3] (треугольники). Авторы [5] исследовали образцы ТПС из тканного нейлона (Зтт) и сетчатого полиэфира (1т), а также смешанный волокнистый состав шерсти и хлопка (1т) и нетканого полиэстера (1т). Значительная толщина последнего (4.79 мм) и явно гидрофобная природа образца позволили нам отнести его к типу исследованных выше полотен "Холлофайбер" из [2]. Такое предположение полностью подтвердилось на практике и добавление ещё одной точки к пяти исследованным точкам "Холлофайбер" только несущественно изменило коэффициенты обоих линейных трендов $\gamma(\delta)$ и $\rho_V(\delta)$.

Нужно указать, что только две точки из всего проанализированного нами массива $\gamma(\delta)$ -данных [2-6], составляю-

щего 43 ПС-точек, не вписываются в изложенную выше концепцию. Обе они (смесь шерсти и хлопка: $\delta = 0.99$ мм; $\gamma = 223.1$

г/м²; $\rho_V = 225.4$ кг/м³ [5], а также чистый хлопок: $\delta = 0.44$ мм; $\gamma = 185.75$ г/м²; $\rho_V = 422.2$ кг/м³ [4]) предположительно относятся к типу гидрофильных ТПС, но плохо коррелируют (см. Рис. 1б) с другими гидрофильными $\rho_V(\delta)$ -данными из соответствующих групп. При этом, первая из указанных точек, хорошо коррелирует с точками гидрофобной группы из той же работы [5], а вторая – с точками гидрофобной группы шерсти, смешанной с вискозой и полиэстером, но измеренными в другой работе [3]. Эти расхождения составляют мене 5 % от общего массива проанализированных данных и могут быть результатом или случайных ошибок эксперимента (особенно, при определении толщины ТПС), или влияния таких неучитываемых нами факторов, как вид плетения, окраска, ламинирование и т.д.

Из предыдущего обсуждения следует возможность записать систему из двух линейных уравнений для каждой исследованной экспериментально группы ПС, принадлежащей к гидрофильному или гидрофобному типу ПС. Для гидрофильных ПС мы предлагаем использовать уравнения (см. также иллюстративную схему Рис. 2а и б):

$$\begin{aligned} \gamma_{зфл}(\delta) &= \rho_M^0 \delta - \gamma_{зфл}^0 & (a) \\ \rho_V(\delta) &= -(\gamma_{зфл}^0 / \delta_0^2) \delta + \rho_V^0 & (б) \end{aligned} \quad (8)$$

и, соответственно, для гидрофобных ПС:

$$\begin{aligned} \gamma_{зфб}(\delta) &= \rho_V^0 \delta + \gamma_{зфб}^0 & (a) \\ \rho_V(\delta) &= -(\gamma_{зфб}^0 / \delta_0^2) \delta + \rho_M^0 & (б) \end{aligned} \quad (9)$$

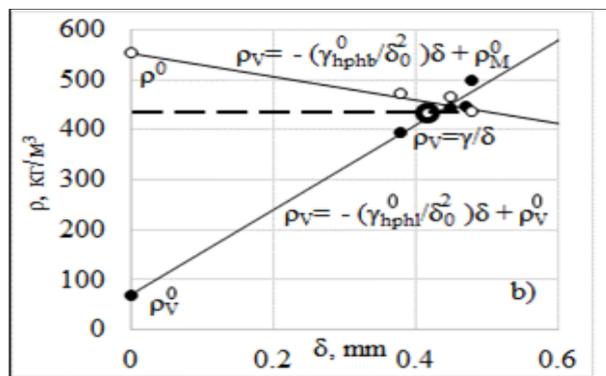
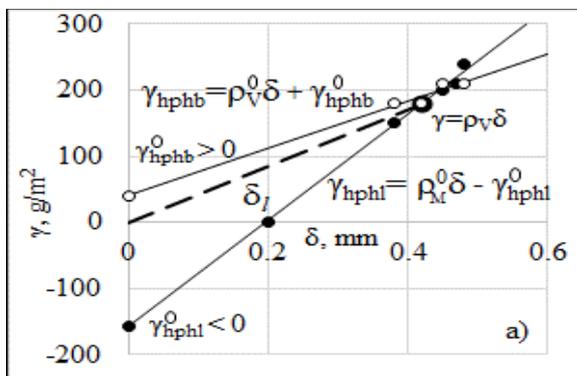


Рисунок 2 – Типичные различия в эффективном поведении гидрофобных (гфб) и гидрофильных (гфл) ПС, представленные в координатах γ, δ (а) и ρ_V, δ (б) с помощью линейной аппроксимации данных работы [3] по пяти вариантам чистой 100 % шерсти (чёрные кружки, включая исходный чёрно-белый) и четырёх вариантам 45 % шерсти с 55 % вискозы (два нижних белых кружка, включая исходный чёрно-белый) и 45 % шерсти с 55 % полиэстера (два верхних белых кружка).

Поскольку предельная поверхностная плотность ПС $\gamma_{зфл}^0(\delta \rightarrow 0)$, г/м² положительно определена, как и предельная объёмная плотность $\rho_V^0(\delta \rightarrow 0)$, то из уравнения (8а) следует, что существует предел на границе воздуха и ПС:

$$\delta_{ж}(\gamma_{зфл} \rightarrow 0) = \gamma_{зфл}^0 / \rho_M^0, \quad (10)$$

определяемый нами как минимально-возможная толщина жидкой плёнки, образующейся на поверхности гидрофильных ПС.

Нетрудно заметить из уравнения (5), что изменение объёмной плотности в тонком поверхностном слое, характеризуемом конечным значением $\gamma_{зфл}^0$, имеет физически-бессмысленную тенденцию стремиться к бесконечности при $\delta \rightarrow 0$:

$$\rho_V(\delta \rightarrow 0) \approx \gamma_{зфл}^0 / \delta \rightarrow \infty. \quad (11)$$

Чтобы избежать этого нежелательного тренда, мы использовали правило Лопиталья в уравнении (8б), предположив существование характерной предельной плотности $PC \rho_V^0(\delta \rightarrow 0)$:

$$\frac{d\rho_V}{d\delta} = -\frac{\gamma_{зфл}^0}{\delta^2} \rightarrow -\frac{\gamma_{зфл}^0}{\delta_0^2}, \quad (12)$$

где толщина δ_0 соответствует вводимой здесь модели базовой гидрофильной PC для исследуемой группы $\gamma(\delta)$ -данных.

Таблица 1 – Параметры базовых моделей гидрофильных (а) и гидрофобных (б) групп PC и $ТПС^{(*)}$.

Гидрофильные PC и $ТПС$ (а)					
Группа измерений	ρ_M^0 , кг/м ³	ρ_V^0 , кг/м ³	$\gamma_{зфл}^0$, г/м ²	δ_0 , мм	$\delta_{Ж}$, мм
[2] Геоком Б-360, Б450, D-100, D-200, D-350, D-450, D-600, D-700, D-900 (9тт)	154.72	57.108	162.49	3.59	1.05
[2] Геотекс-150, 200, 300, 400, 500, 600 (6тт)	226.91	22.76	256.41	2.60	1.13
[4] Хлопок (3тт)	435.56*	271.08*	28.743*	0.36*	0.066*
[3] Шерсть (5тт)	803.03*	70.042*	157.33*	0.43*	0.20*
Гидрофобные PC и $ТПС$ (б)					
Группа измерений	ρ_M^0 , кг/м ³	ρ_V^0 , кг/м ³	$\gamma_{зфл}^0$, г/м ²	δ_0 , мм	$\delta_{Ж}$, мм
[2] Холлофайбер м.Р15, с.Р5191, х.РР205, м.Р453, м.Р608 (5тт)	46.876	9.158	143.06	9.84	-
[5] Тканый нейлон (3тт), сетчатый полиэстер (1тт)	338.0*	195.52*	36.902*	0.59*	-
[3] Шерсть (45 %) с вискозой (55 %) (2тт) Шерсть (45 %) с полиэстером (55 %) (2тт)	552.53*	356.16*	40.959*	0.42*	-
[6] РТФЕ/нейлон, хлопок/полиэстер, РУ/полиэстер, плотный полиэстер, ТРУ полиэстер, нейлон ТРУ (6тт)	661.36*	146.92*	82.867*	0.46*	-

Её параметрами, представленными в Таблице 1, являются ρ_M^0 , кг/м³ – плотность сухой матрицы базовой PC ; ρ_V^0 , кг/м³ – плотность сухой базовой PC ($\rho^0 > \rho_V^0$); её пористость:

$$П^0 = 1 - \rho_V^0 / \rho_M^0; \quad (13)$$

объём PC : $V_0 = A_{\perp} \delta_0$ и две характерные толщины: $\delta_{Ж} < \delta_0$. Учёт отрицательного знака перед величиной $\gamma_{зфл}^0$ в (8а) позволяет получить при его подстановке в (8б) положительный наклон функции $\rho_V(\delta)$, свидетельствующий о росте объёмной плотности при увеличении толщины δ в гидрофильных PC . Эта тенденция модели базовой PC полностью подтверждается анализом различных групп реальных PC на основе экспериментальных данных. Такое наблюдение приводит к возможности независимой оценки фундаментального, но трудно определяемого в опытах параметра плотности увлажнённой матрицы ρ_M для каждого образца из ряда исследуемых в рамках группы PC на основе допущения $П = П^0$:

$$\rho_M = \rho_V \rho_M^0 / \rho_V^0. \quad (14)$$

Её пропорциональность измеряемой величине ρ_V не вызывает сомнений при любых вариантах заполнения пор – от вакуума (сухого воздуха) до влажного воздуха ($ВВ$), водяного пара ($ВП$) и, даже, жидкости ($Ж$). Заметим, что степень увлажнённости PC в реальных условиях опытов определялась выше величиной $\rho_V^0(\delta \rightarrow 0)$, найденной для базовой модели PC . Это обстоятельство позволяет нам ввести с помощью простых и физически обоснованных допущений новое определение эффектив-

ной пористости $П_{Э}$, получаемое в условиях эксперимента с группой гидрофильных PC :

$$\begin{aligned} П_{Э} &= П^0 / (1 - \rho_V^0 / \rho_M) = \\ &= П^0 / \left[1 - \rho_V^0 / (\rho_V \rho_M^0 / \rho_V^0) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

на основе только стандартных $\gamma(\delta)$ -данных.

Базовая модель гидрофобных PC должна учитывать, что образование жидкой плёнки с предельной толщиной $\delta_{Ж}$ в их поверхностном слое невозможно. Жидкость может только формировать капли на наружной поверхности PC при большой влажности среды. В то же время, масса увлажнённого воздуха $ВВ$ способна проникать в поры при наличии конвективных потоков, а также градиентов (фактически, перепадов) давления или относительной влажности по толщине гидрофобных PC . Заметим для сравнения, что в гидрофильных PC такие градиенты возникают естественным образом за счёт смачиваемости стенок пор и сил капиллярного поднятия влаги. Согласно (8б) и (12) их можно оценить в базовой модели величиной:

$$[\rho_V(\delta) - \rho_V^0] / \delta = -\gamma_{зфл}^0 / \delta_0^2 > 0, \quad (16)$$

положительно определённой в силу знака перед $\gamma_{зфл}^0$ в (8а). В гидрофобных PC подобный градиент может быть вызван только внешним принуждением.

На основании этих фактов система линейных уравнений базовой модели приобретает модифицированный по сравнению с (8а, 8б) вид в (9а, 9б) ($\delta_{Ж} = 0$). Таким образом, возможный градиент влажности, вызванный внешним по отношению к PC фактором, является в предлагаемой базовой модели отрицательным:

$$[\rho_V(\delta) - \rho_M^0] / \delta = -(\gamma_{\text{эфб}}^0 / \delta_0^2) < 0, \quad (17)$$

что должно ослаблять ("тормозить") любой транспортный ВВ-поток в гидрофобных ПС.

Ещё раз уместно отметить, что сопоставление ВВ-проницаемости гидрофильных и гидрофобных ПС по наличию этих внутренних градиентов (16) и (17), имеющих противоположные знаки, требует известной осторожности. Действительно, с формальной точки зрения, гидрофильная ПС должна интенсифицировать ("ускорять") любой транспортный поток, но образование плёнки жидкости с толщиной $\delta_{\text{Ж}}$ в её поверхностном слое может, в принципе, вызывать значительное торможение ВВ-транспорта при большой влажности среды. Это подтверждается PERMETEST-экспериментом в [3]. При тех же условиях, гидрофобная ПС, формально тормозящая поток, но формирующая на внешней поверхности только отдельные капли, а не сплошную плёнку, может оставаться более проницаемой для ВВ-потока.

В любом случае, учёт неоднородностей распределения флюидной среды внутри ПС, который обеспечивает предлагаемая в данной работе базовая модель гидрофильности и гидрофобности, является её преимуществом, по сравнению с допущением однородности плотностей γ и ρ_V , стандартно-используемым и в других моделях, и в теориях проницаемости. Это допущение наглядно отражено штриховыми линиями, проведенными в соответствующих системах координат γ, δ и ρ_V, δ на Рис.2а и 2б, соответственно, через произвольную экспериментальную ПС-точку исследуемой группы. Отсюда, уже простое построение всех подобных ПС-точек группы, одновременно, в обеих указанных системах координат позволяет экспериментатору оценить эффективную гидрофильность или/и гидрофобность измеренных им ПС. Наконец, немаловажным преимуществом развитой нами базовой модели представляется простота расчётов, приводящих к реали-

стической оценке таких важных характеристик ПС, как $\rho_V^0, \rho_M^0, \gamma^0, \delta_0$ (и, дополнительно, $\delta_{\text{Ж}}$ для гидрофильных образцов) на основании только двух стандартных измерений γ и δ для каждого образца. Уточнение с помощью формулы (15) параметра *эффективной пористости* $\Pi_{\text{Э}}$ с учётом условий её измерения, рассматривается нами как объективный признак реалистичности базовой модели, выгодно отличающей её от многих других теорий ПС, использующих понятие стандартной пористости $\Pi = \Pi^0$.

III. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ И СТАНДАРТНОЙ ПОРИСТОСТЕЙ С МОДЕЛЬЮ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ НАЛИЧИЕ НАНОПОР, ПОРИСТОСТИ ПС И ТПС.

Модель *стандартной* пористости Π в уравнениях (1-3), предполагающая наличие вакуума (или полностью сухого воздуха) в порах, *общепринята, но, явно, нереалистична*. Отклонения в большую и меньшую стороны от *линейной* зависимости $\rho_V(\Pi)$, следующей из неё, указывают на необходимость дальнейших исследований. Экспериментальная основа и адекватность введённой нами с помощью уравнения (15) модели *эффективной* пористости $\Pi_{\text{Э}}$ позволяют, в частности, исправить случайные промахи в $\gamma(\delta)$ -данных, допущенные авторами некоторых работ. В сущности, такие промахи были обнаружены нами только в данных, приводимых Трещалиным [2], как это следует из приводимых ниже Таблицы 4 для *гидрофобных* нетканых полотен "Холлофайбер" (выброс - 1 точка "софт Р-5191"), а также Таблицы 9 для *гидрофильных* нетканых полотен "Геокот" (выброс - 1 точка - ДТМ-300), соответственно.

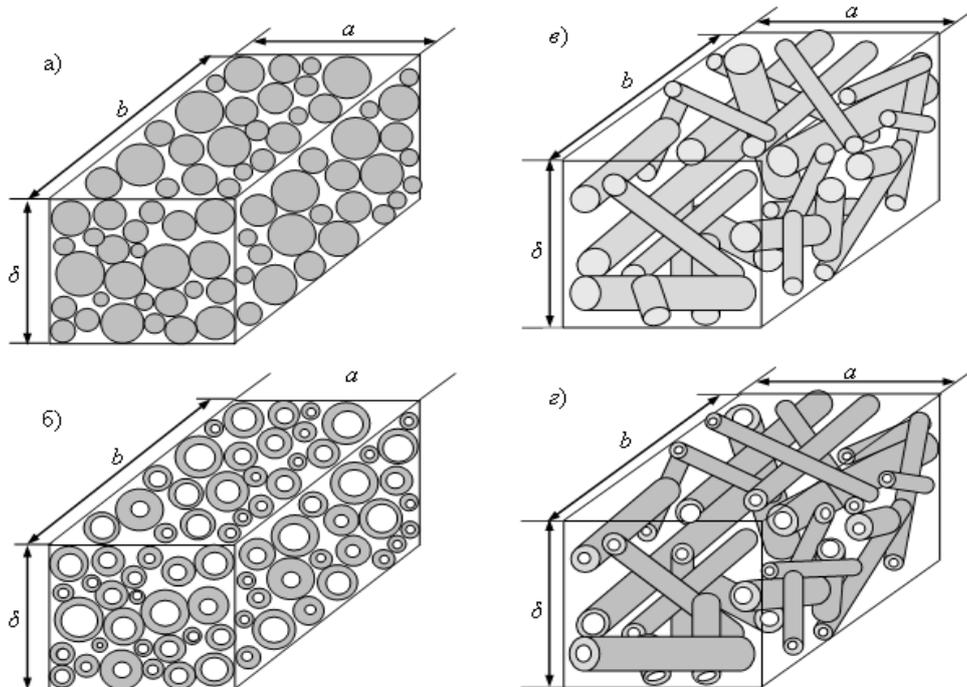


Рисунок 3 – Модели обычной (не тонкой) пористой среды ($b \sim a \sim \delta$) в виде а) сплошных и б) полых сфер различного диаметра; в) сплошных и г) полых цилиндров (капилляров) различного диаметра и длины. Суммарный свободный объём между сферами и цилиндрами определяет *микropористость* ($0.1 \text{ мкм} \leq d_{\text{мп}} \leq 0.1 \text{ мм}$); суммарный ограниченный объём внутри сфер и цилиндров определяет *нано- и мезопористость* ($1 \text{ нм} \leq d_{\text{мп}} \leq 100 \text{ нм}$). Толщина проницаемых (б) или непроницаемых (г) сфер и/или цилиндров предполагается сопоставимой с эффективным диаметром частиц флюидов ($d_{\text{ч}} \leq 1 \text{ нм}$).

В Таблицах 4-7 нами приведены предсказания $\Pi_{\mathcal{E}}$, на основе разработанных в Разделе 2 гидрофобных базовых моделей, а в Таблицах 8-11 – гидрофильных базовых моделей. В последней колонке всех таблиц приведены предсказания действительной пористости ε , учитывающей все возможные типы пор, имеющих как снаружи, так и внутри любой совокупности нитей, заполняющих объём V (4). Выведенная ниже формула оценки ε очень проста и включает только базовое, близкое к измеряемому, значение $\Pi_{\mathcal{E}}$ из уравнения (15):

$$\varepsilon = \Pi_{\mathcal{E}}(2 - \Pi_{\mathcal{E}}). \quad (18)$$

Она применима к любым типам как ПС, так и ТПС с нерегулярным (хаотическим) или регулярным (зависящим от типа плетения тканей) видом матрицы (М). Первый из видов матрицы показан на Рис. (3а, 3б) для двух наиболее популярных теоретических моделей различных ПС (плотно-уложенных сфер и разно-направленных капилляров). Второй вид матрицы схематически представлен на Рис.(4а) без учёта внутренней пористости нитей (Н) (называемой в данной работе нано- или мезопористостью) и на Рис.(4б) – с таким учётом.

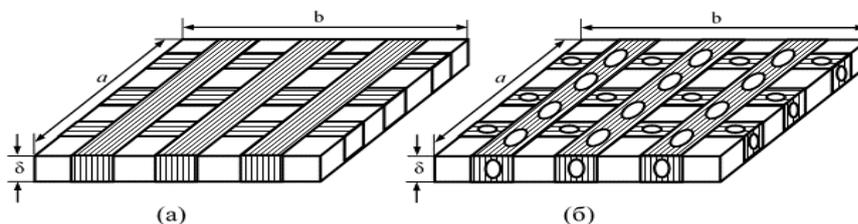


Рисунок 4 – Схематическое изображение внутренней структуры ТПС, образованной проницаемыми (б) для флюидных потоков или непроницаемыми (а) нитями (мезопоры в нитях показаны, условно, в виде эллипсоидов вращения).

Указанная симметрия, как можно предположить, является следствием двух факторов: 1) уже отмеченной выше нереалистичности Π и 2) объективным отсутствием информации о пространственном внутрипоровом распределении потоков влажного воздуха (ВВ) и жидкости (Ж) при их транспорте через ПС. В предыдущем разделе 2 взаимозависимость этих факторов была учтена путём введения эффективной пористости $\Pi_{\mathcal{E}}$, но простая замена в уравнениях (21,22) значения Π на значение $\Pi_{\mathcal{E}}$ не является оправданной именно в силу такой взаимозависимости. Влияние мезопористости H на реальные процессы транспорта различных видов влаги через ПС и ТПС представляется более тонким, с физической точки зрения, и очень существенным, с практической стороны, при измерении плотности потока влаги (часто, ошибочно, называемого проницаемостью среды).

Напомним, в этой связи, что традиционно [7] существуют две теории транспорта через ПС. Первая, обычно, называется теорией гидравлического радиуса и исследует механизм просачивания влаги, вызванного градиентом давления $\Delta P / \delta$ между внутренней и внешней $A_{\perp} = ab$ -поверхностями. По виду термодинамической силы данную составляющую транспорта можно рассматривать как конвективную, что было впервые сделано в знаменитом экспериментальном законе Дарси для ПС. Считается, что подходящей моделью ПС в теории гидравлического радиуса является система твёрдых плотно-уложенных сфер (Рис. 3а), а сама теория применима только для сравнительно-малых пористостей $\Pi \leq 0.4$. Предполагая возможную проницаемость сфер (Рис. 3б) и наличие дополнительной мезопористости H , мы расширяем, формально, интервал действия теории для описания больших пористостей: $\Pi > 0.4$.

Для вывода экстремальной (наибольшей) характеристики пористости ε введём суммарный объём нитей V_H , предполагая, что он всегда больше, за счёт внутренних пустот – пор, изображённых на Рис.(4б), чем реальный объём матрицы: $V_M \leq V_H$. Определяя три типа пористости, рассматриваемые в данной работе:

$$\Pi = 1 - V_H / V \quad (а)$$

$$H = (V_H - V_M) / V_H \quad (б) \quad (19)$$

$$\varepsilon = 1 - V_M / V \quad (в)$$

нетрудно установить связь между ними:

$$(1 - \varepsilon) = (1 - \Pi)(1 - H). \quad (20)$$

Запишем два практически-важных соотношения между действительной пористостью ε а также её стандартным Π и мезоскопическим H типами:

$$\varepsilon = \Pi(1 - H) + H \equiv H(1 - \Pi) + \Pi, \quad (21)$$

$$\varepsilon / \Pi = [1 + H(1 / \Pi - 1)] > 1, \quad (22)$$

где тождество в (21) подчёркивает идеальную алгебраическую симметрию Π и H в таком рассмотрении.

Другой общепринятой методологией [7] является теория торможения потока, обычно ассоциируемая с системой капилляров, показанных на Рис.(3в). Её применимость для сравнительно больших значений пористости $\Pi \geq 0.7$ неоднократно отмечалась в литературе, наряду с очевидным ухудшением точности описания транспорта влаги в области меньших пористостей: $\Pi < 0.7$. Здесь, как и в предыдущей теории, введение мезопористости H является фактором, уточняющим модель транспорта. Действительно, при больших значениях Π (например, $\Pi = 0.8$) и малой внутринитевой мезопористости, характерных, например, для шерсти $H \leq 0.2$ (Рис. 3г), вклад данного компонента в общую плотность остаётся довольно малым: $\varepsilon / \Pi \leq 1.05$. Можно сделать вывод, что адекватность теории торможения потока здесь связана с корректным учётом превалирующего механизма транспорта именно через микropоры, т.е. в межнитевом пространстве.

Вместе с тем, при увеличении внутринитевой мезопористости до $H \leq 0.4$, характерном, например, для волокон хлопка, может существенно возрастать гигроскопичность W при том же значении стандартной пористости $\Pi = 0.8$. Эту важную для сравнительного анализа тканых материалов характеристику, на наш взгляд, естественно определить на основании формулы (22):

$$W = \varepsilon / \Pi - 1 = H(1 / \Pi - 1), \quad (23)$$

что подчёркивает необходимость корректной оценки мезопористости H и соответствующей действительной пористости ε .

Чтобы тестировать данные предположения, нами были выбраны результаты опытов [4] по пяти материалам на основе волокнистого состава хлопка. Их особенностью является, как уже отмечалось, большая внутринитевая

мезопористість: $H_x \approx 0.4$, отличающаяся от меньшего значения данной характеристики для шерсти: $H_{ш} \approx 0.2$. Согласно уравнению (23), это различие должно делать хлопковые ткани, примерно, в два-три раза (см. Таблицы 10 и 11) более гигроскопичными, чем, также натуральные, шерстяные ткани. В данном контексте особенно интересно и важно для практики сравнить, как это сделано в работе, с натуральными тканями материалы, полученные добавлением к хлопку и шерсти искусственных волокон вискозы (ν) и полиэстера (n), у которых, как правило, $H \leq 0.1$.

В Таблице 2 мы изменили, по сравнению с [4], порядок хлопковых образцов, расположив их по мере возрастания стандартной пористости Π , линейно коррелирующей, как это и следует ожидать из уравнения (1), с объёмной плотностью ρ_V . Чтобы подчеркнуть усреднённый (интегрированный) смысл анализа, в котором мезопористость H принята одинаковой для всех тканей с разной пористостью Π , мы приводим Рис. 5. Из него видно, что "длинная" экстраполяция линейной зависимости (1) ведёт к, также усреднённой для всех образцов, плотности матрицы $\rho_M = 1521.3 \text{ кг/м}^3$, хотя добавление полиэстера (18 %) или вискозы (20 %) в образцах 5 и 3 должно существенно изменить её значение. Предполагаемое в работе [4] абсолютное значение ρ_M для волокон хлопка, оказавшееся в 1.5 раза больше плотности воды, не выглядит физически оправданным. Авторы указанной работы не обсуждали методику определения значений

ρ_M и, таким образом, стандартной пористости Π для пяти исследованных ими трикотажных бельевых полотен, но отметили, что принятые (в Белоруссии) в качестве оптимальных уровни гигроскопичности ($W = 8 \div 14\%$) и воздухопроницаемости (фактически, средней скорости потока воздуха через толщину ткани: $100 \div 150 \text{ дм}^3/(\text{м}^2\text{с}) = 0.1 \div 0.15 \text{ м/с}$) не отражает реального уровня интенсивности (т.е. плотности потока массы: \dot{j}_m , $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$) передачи влаги из пододёжного пространства ТМ в окружающую среду. Проведенный ниже анализ, использующий модель эффективной пористости $\Pi_{\text{Э}}$ (Раздел 2), заставляет критически оценить некоторые этапы стандартного экспериментального изучения ПС и ТПС.

Заметим вначале, что такой анализ позволяет нам, одновременно, указать и некоторые ограничения развиваемой в работе методологии оценки $\Pi_{\text{Э}}$. К ним, помимо не всегда удовлетворительной точности измерений δ и γ , а также малого числа образцов, не позволяющего получить надёжную статистику, нужно отнести, зачастую, неадекватные представления многих авторов о самой сути сравнительного анализа. В частности, сравнивая образцы чистого хлопка 1, 3, 4 с образцами, содержащими вискозу 2 и полиэстер 5 из Таблицы 2, исследователь, вряд ли, должен опираться на среднюю плотность матрицы ρ_M , как это показано на рисунке 5.

Таблица 2 - Предсказанные по уравнению (23) гигроскопичности $W\%$ для тканей с волокнистым составом хлопка [4] и мезопористостью. $H_x = 0.4$

N([4])	Вид плетения	Π , % [4]	γ [4], г/см ²	δ [4], мм	ρ_V [4], кг/м ³	W, %	Состав
1 (1)	гладь	72.24	185.75	0.44	422.2	15.3 (10.3)	хлопок
2 (3)	интерлок	75.53	241.88	0.65	372.1	13.0	х(80%)В(20%)
3 (4)	футерованное	77.09	170.62	0.49	348.2	11.9	хлопок
4 (2)	гладь	78.20	119.27	0.36	331.3	11.2	хлопок
5 (5)	плюшевое	86.52	245.86	1.2	204.9	6.2	х(82%)П(18%)

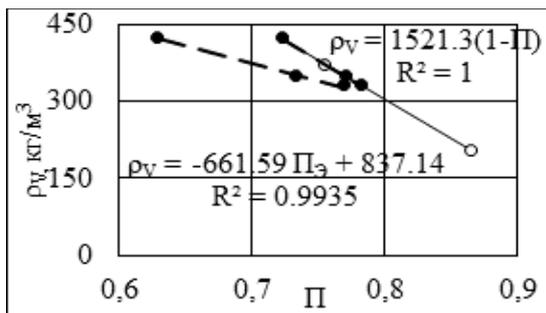


Рисунок 5 – Изменение наклона $\rho_V(\Pi)$ -зависимости, вызванные использованием эффективной пористости $\Pi_{\text{Э}}$ для чисто-хлопковых полотен (3т) и заменой фиктивного $\rho_M = 1521.3 \text{ кг/м}^3$ на более реальное $\rho_M = 837.1 \text{ кг/м}^3$.

Альтернативный подход, развиваемый нами, иллюстрируется Рис.6 и данными Таблицы 3, в которых три варианта (а, б, в) предсказанной эффективной пористости $\Pi_{\text{Э}}$ и действительной пористости использованы для расчёта и сравнения гигроскопичности W по уравнению (23). В первом варианте, подобно подходу [4], были учтены все пять образцов, что прямо привело к явно ошибочному наклону $\rho_V(\delta)$ -зависимости, соответствующему

гидрофобности (?) хлопковых тканей. Исключая, как было описано в Разделе 2, хлопок с добавлением полиэстера можно получить слабую (с очень малым, т.е. плохо определённым, наклоном $\rho_V(\delta)$ -зависимости гидрофильность. Здесь некоторые оценки $\Pi_{\text{Э}}$ и W становятся, достаточно, случайными. Наконец, дополнительно исключая хлопок с добавлением вискозы, можно получить приемлемые и согласованные оценки обеих характеристик $\Pi_{\text{Э}}$ и W .

В них, как и ожидалось авторами [4], величина гигроскопичности более реалистична и превышает, почти в два раза оценку W из Таблицы 2, основанную на стандартной пористости Π и "укладывающуюся" в интервал рекомендованных для детского белья значений гигроскопичности. Неутешительный вывод, следующий из наших предсказаний, состоит в том, что образцы чисто-хлопковых тканей недостаточно проницаемы для водяного пара. Это, на практике, способствует задержанию паров в пододёжном пространстве и более быстрому намоканию детского белья, чем то следует из соответствующей рекламы. Нужно также признать, что рекомендации авторов [4], предлагающих одновременно снижать и толщину ткани из хлопка, и его объёмную плотность (связанные обратно-пропорциональной зависимостью), вряд ли, могут привести к улучшению описанной ситуации.

Заметим, что асимптотическое, гораздо более реалистичное, чем $\rho_M = 1521.3 \text{ кг/м}^3$ из Рис. 5 значение плотности матрицы для хлопковых волокон: $\rho_M = 837.1 \text{ кг/м}^3$, следующее из того же Рис.5, было установлено с использованием ϵ из уравнения (18). Это значение действительной пористости следует считать *экстремальным* (максимально-возможным для любого образца ПС), поскольку оно допускает возможность равенства:

$$H = \Pi \tag{24}$$

и, т.о., полную проницаемость внутренних стенок матрицы для флюида любой плотности (от сухого воздуха до жидкости).

В заключение данного раздела в Таблицах 4-7 приводятся, рекомендуемые нами свойства гидрофобных ПС и ТПС, а в Таблицах 8-11 – гидрофильных, включая обсуждавшиеся здесь хлопковые ткани.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В текстильной, строительной и ряде других промышленности, использующих и сравнивающих различные ТПС, имеется некоторая неопределённость в выборе *независимой переменной*. Её значение должно влиять на сравнительный анализ с целью оптимизации довольно сложного комплекса характеристик в избранном ряде исследуемых материалов. К таким характеристикам относятся, прежде всего, *альтернативные* свойства ТПС отводить влагу или, наоборот, блокировать её проникновение для заданного пространства (подождёжного слоя воздуха, внутреннего объёма межстенной воздушной прослойки и т.п.), а также отводить теплоту или, наоборот, способствовать барьерной для её потока роли ТПС.

Примером, неудачного, на наш взгляд, выбора независимой переменной является использование в этом качестве т.н. *квадратной массы* γ [3], хотя идея такого выбора легко просматривается при записи плотности потока массы в виде линейной функции от γ :

$$j_m = \Delta m / (A_{\perp} \Delta t) = -B\gamma + A. \tag{25}$$

Очевидно, что произвольно выбирая одинаковый для всех материалов ряда временной интервал исследования: $B \approx 1/\Delta t$ и относя измеренную квадратную массу $\gamma_0 = m_0 / A_{\perp}$ к состоянию, например, наружной поверхности ТПС (т.е. принимая: $\Delta m = m - m_0$) можно преобразовать равенство (25) к тривиальному виду:

$$A = m / (A_{\perp} \Delta t) \approx \gamma B, \tag{26}$$

соответствующему фиксированному для всех материалов ряда условию транспорта массы флюида m через ТПС. Отметим, что именно линейная убывающая функция вида (25) была применена в работе [3] при аппроксимации *относительных RWVP* (проницаемости для паров воды) - значений, выраженных, однако, через измеряемые на установке PERMETEST *тепловые* транспортные потоки. Последнее не изменяет сути подхода и вывод о том, что большая толщина δ (пропорциональная величине γ при той же объёмной плотности ТПС ρ_V , согласно (5)) ведёт к меньшему потоку массы, представляется, как отмечалось выше, тривиальным.

Более интересной, по нашему мнению, является интерпретация авторами [3] различий в трендах *RWVP*-значений, полученных, с одной стороны, для *гидрофильного* шерстяного (100 %) ТПС, а, с другой стороны, для *гидрофобных* (см. Раздел 3) смесей шерсти (45 %) с вискозой (55 %) или полиэстером (55 %). Здесь, в качестве *независимой переменной* использовалось уже *относительное содержание влаги* в одном и том же образце ТПС. Его можно записать, игнорируя возможные незначительные изменения геометрических параметров ТПС δ, A_{\perp} , в виде пропорций:

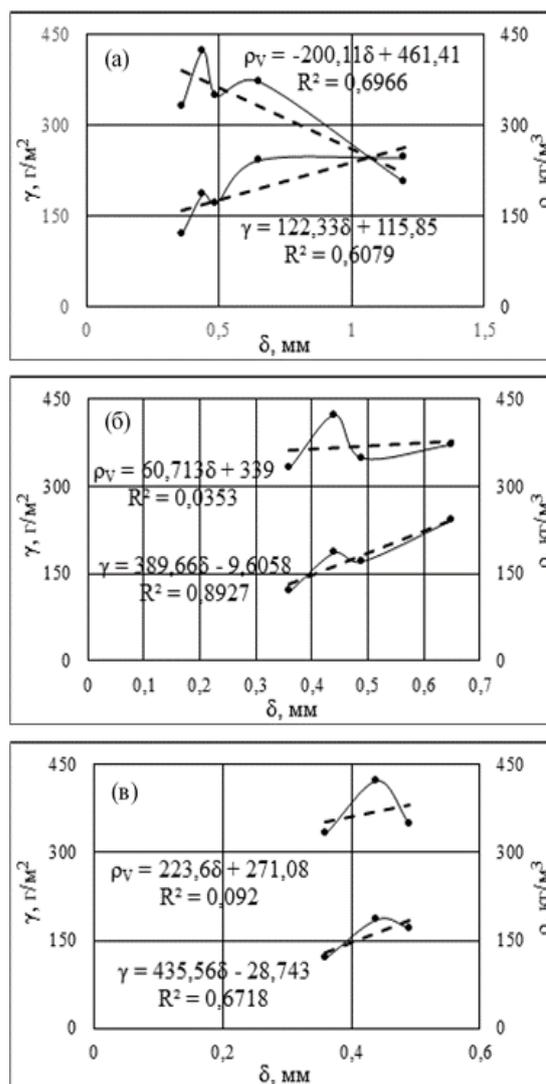


Рисунок 6 – Последовательное исключение материалов с добавлением искусственных волокон (полиэстера, вискозы) из ряда тканей на основе хлопка, приводящее к замене нереалистичной гидрофобности [4] (а), сначала, слабой гидрофильностью (б), а затем – реальной гидрофильностью (в) и высокой гигроскопичностью чисто-хлопковых тканей (Таблица 3).

$$m / m_0 = \gamma / \gamma^0 = \rho_V / \rho_V^0, \tag{27}$$

где используемые обозначения γ^0 и ρ_V^0 указывают на связь относительного влагосодержания [3] с параметрами, играющими ключевую роль в базовых моделях Раздела 3, предложенных нами для рядов различных ТПС.

Именно поэтому, полученные в работе [3] *RWVP*-тренды, качественно полностью соответствуют результатам нашего анализа. Так для чисто-шерстяных ТПС даже 3^x-кратное увеличение массы мокрой ТПС (на 200 %) не вносило качественных изменений в два тренда сопоставляемых тепловых потоков – от поверхности кожи человека и от поверхности ткани. С увеличением количества жидкости в *гидрофильном* чисто-шерстяном образце оба потока возрастали, скорее всего, за счёт большей теплопроводности жидкости по сравнению с теплопроводностью водяного пара. Напротив, в смешанных ТПС, содержащих вискозу или полиэстер, гидрофобность проявлялась (как было нами установлено в Разделе 3) в наличии

пятен жидкой плёнки (капель) на поверхности образца и отсутствии проникновения жидкости внутрь ТПС. Это вело к уменьшению $\rho_V(\delta)$ -значений, показанному на Рис. 1 как основной признак гидрофобности. Именно этот, согласующийся с нашим наблюдением, тренд уменьшения теплового потока от поверхности кожи человека, несмотря на его общий рост от ТПС, вызванный её 2^х-кратным намоканием (на 100 %) отмечен в работе [3].

Конечно, малое число образцов в каждом исследованном нами ряду приводит, иногда, (см. Таблицы, Рис.1),

к не слишком убедительной статистике наблюдений (т.е. очень малым коэффициентам вариаций R^2). Нельзя не учитывать и, зачастую, несопоставимость точности измерений входных данных δ, γ различными авторами для большого объёма, использованного в нашей работе очень разнообразного материала по ЛС и ТПС. Вместе с тем, мы надеемся на то, что предлагаемый нами подход окажет, в дальнейшем, существенное влияние на развитие объективного сравнительного материаловедения, в целом.

Таблица 3 - Предсказание гигроскопичности по уравнению (23) с учётом различных (см. текст) Π_3 и ϵ -значений.

N [4]	Состав	Π [4]	W, %	Π_3	W, %	Π_3	W, %	Π_3	W, %
1 (1)	хлопок	0.7224	15.3	0.7960	20.4	0.989	1.1	0.6289	37.1
2 (3)	х(80)/В(20)	0.7553	13.0	0.8051	19.5	0.627	37.3	-	-
3 (4)	хлопок	0.7709	11.9	0.8103	19.0	0.850	15.0	0.7325	26.7
4 (2)	хлопок	0.7820	11.2	0.8147	18.6	0.999	0.1	0.7694	23.1
5 (5)	х(82)/ПЭ(18)	0.8652	6.2	0.8731	12.7	-	-	-	-
Условия		H=0.4		гидрофобность		слабая гидрофильность		гидрофильность	

Таблица 4 - Предсказание пористости на основе базовой модели (БМ) в гидрофобных нетканых ПС-полотнах "Холлофайбер" [4] (1 – "Хард FP205; 2 – "медиум P453"; 3 – "софт P5191"; 4 - "медиум P15"; 5 - "медиум P608").

Входные данные				Предсказанные данные				
ХФ	δ , мм	γ , г/м ² [2]	ρ_V , кг/м ³ [2]	ρ_M (14)	Π_3 (15)	ϵ (18)	Π [2]	* $\Pi^{сир}$ [2]
1	4.50	226.575	50.35	257.72	0.834	0.972	0.9191	0.939
2	12.33	214.649	17.404	89.08	0.897	0.989	0.9720	0.979
3	17.7	118.563	6.698	34.28	1.098	0.990	0.9892	0.992
4	20.0	526.106	26.305	134.64	0.863	0.981	0.9577	0.968
5	26.33	369.591	14.035	71.84	0.922	0.994	0.9774	0.983
ПС	9.84	143.06	9.158	46.876	0.805	0.962	-	-
БМ	δ_0 , мм	$\gamma_{зфб}^0$, г/м ²	ρ_V^0 , кг/м ³	ρ^0 , кг/м ³	$\Pi^0=\Pi$	ϵ^0 (18)	-	-

(*)-Нами исправлена геометрическая ошибка авторов [2], допущенная ими при расчёте среднего значения $\rho_M = 622.08$ кг/м³ (явно завышенного) -отмечены спорные, на наш взгляд, $\gamma(\delta)$ -данные из [2].

Таблица 5 - Предсказание пористости на основе базовой модели (БМ) в гидрофобных тканых нейлонах [5] (1,2,3,4-сетчатом полиэфире, 5^{*)}-предположительно, гидрофильном смешанном полотне шерсть-хлопок), относящихся к ТПС.

Входные данные				Предсказанные данные			
ТН	δ , мм [5]	γ , г/м ² [5]	ρ_V , кг/м ³ [5]	ρ_M (14)	Π_3 (15)	ϵ (18)	W, %
1	0.25	72.6	290.4	502.02	0.6904	0.9041	31.0
2	0.30	86.2	287.3	496.66	0.6952	0.9071	30.5
3	0.37	126.2	341.1	589.67	0.6306	0.8635	36.9
4	0.55	157.2	285.8	494.07	0.6975	0.9085	30.3
5 ^(*)	0.99	223.1	225.4	389.65	0.8460	0.9762	15.4
ТПС	0.591	36.90	195.52	338.0	0.4215	0.6653	-
БМ	δ_0 , мм	$\gamma_{зфб}^0$, г/м ²	ρ_V^0 , кг/м ³	ρ^0 , кг/м ³	$\Pi^0=\Pi$	ϵ^0 (18)	-

Таблица 6 - Предсказание пористости на основе базовой модели (БМ) в гидрофобных смешанных тканях [3]: шерсть (45 %) с вискозой (55 %) (2тг) и шерсть (45 %) с полиэстером (55 %) (2тг).

Входные данные				Предсказанные данные			
Ш+В+ПЭ	δ , мм [3]	γ , г/м ² [3]	ρ_V , кг/м ³ [3]	ρ_M (14)	Π_3 (15)	ϵ (18)	W, %
1	0.38	180	473.7	734.9	0.6896	0.9037	31.0
2	0.45	210	466.7	724.0	0.6996	0.9098	30.0
3	0.42	180	428.6	664.9	0.7655	0.9450	23.5
4	0.48	210	437.5	678.7	0.7477	0.9363	25.52
ТПС	0.42	40.96	356.16	552.53	0.3554	0.5845	-
БМ	δ_0 , мм	$\gamma_{зфб}^0$, г/м ²	ρ_V^0 , кг/м ³	ρ^0 , кг/м ³	$\Pi^0=\Pi$	ϵ^0 (18)	-

Таблиця 7 - Предсказание пористости на основе базовой модели (БМ) в гидрофобных ламинированных (PTFE/нейлон – 1т, полиэстер/PU-плёнка – 1т, полиэстер/TPU-плёнка – 1т, нейлон/TPU-плёнка – 1т) и смешанных (хлопок/полиэстер – 1т, плотно тканый полиэстер – 1т) ТПС [6].

Входные данные					Предсказанные данные				
№	Состав	δ , мм	γ , г/м ²	ρ_V , кг/м ³	ρ_M (14)	P_3 (15)	ε (18)	W, %	
1	плотно тканый полиэстер	0.1	96.9	969.0	4362.0	0.8050	0.9620	19.5	
2	PTFE/нейлон	0.23	94.5	410.9	1849.7	0.8450	0.9760	15.5	
3	нейлон/TPU	0.31	125.8	405.8	1826.7	0.8459	0.9762	15.4	
4	полиэстер/PU	0.33	148.3	449.4	2023.0	0.8388	0.9740	16.1	
5	хлопок/полиэстер	0.90	237.8	264.2	1189.3	0.8875	0.9873	11.2	
6	полиэстер/TPU	1.41	275.8	195.6	880.5	0.9337	0.9956		
ТПС		параметры	0.46	82.87	146.92	661.36	0.7779	0.9507	-
БМ		обозначения	δ_0 , мм	$\gamma_{зфб}^0$, г/м ²	ρ_V^0 , кг/м ³	ρ^0 , кг/м ³	$P^0=П$	ε^0 (18)	-

Таблиця 8 - Предсказание пористости P_3 на основе базовой модели (БМ) гидрофильных нетканых полотен Геотекс [2] (6т) из нитей пролипропилена (ПП).

Входные данные					Предсказанные данные				
№	Тип	δ , мм [2]	γ , г/м ² [2]	ρ_V , кг/м ³ [2]	ρ_M (14)	P_3 (15)	ε (18)	W, %	$\delta_{ж}$, мм
1	ГТ-150	1.73	153	88.44	881.7	0.9235	0.994	7.6	0.17
2	ГТ-200	2.03	207	102.0	1016.9	0.9203	0.994	8.0	0.20
3	ГТ-300	2.62	304	116.0	1156.5	0.9178	0.993	8.2	0.26
4	ГТ-400	3.05	401	131.5	1311.0	0.9156	0.993	8.4	0.31
5	ГТ-500	3.14	495	157.6	1571.2	0.9129	0.992	8.7	0.32
6	ГТ-600	3.72	598	160.8	1603.1	0.9127	0.992	8.7	0.37
ТПС		2.60	256.41	22.76	226.91	0.8997	0.9899	10.0	1.13
БМ		δ_0 , мм	$\gamma_{зфл}^0$, г/м ²	ρ_V^0 , кг/м ³	ρ^0 , г/м ³	$P_0=П$	ε^0 (18)	W ⁰ ,%	$\delta_{ж}^0$

Таблиця 9 - Предсказание пористости P_3 на основе базовой модели (БМ) гидрофильных нетканых полотен Геоком [2] (9т) из нитей полиэстера (ПЭ 20 %).

Входные данные					Предсказанные данные				
№	Тип	δ , мм [2]	γ , г/м ² [2]	ρ_V , кг/м ³ [2]	ρ_M (14)	P_3 (15)	ε (18)	W, %	$\delta_{ж}$, мм
1	Д-100	1.75	106	60.57	164.1	0.9676	0.9899	3.2	0.65
2	Д-200	2.43	220	90.53	245.3	0.8223	0.9684	17.8	0.90
3	Д-350	3.38	367	108.58	294.2	0.7829	0.9529	21.7	1.25
4	Б-360	3.52	390	110.80	300.2	0.7792	0.9513	22.1	1.30
5	Б-450	4.00	455	113.75	308.2	0.7744	0.9491	22.6	1.48
6	Д-450	4.38	445	101.60	275.3	0.7960	0.9583	20.4	1.62
7	Д-600	4.46	585	131.17	355.4	0.7517	0.9383	24.8	1.65
8	Д-700	6.12	689	112.58	305.0	0.7762	0.9499	22.4	2.26
9	Д-900	6.37	914	143.49	388.7	0.7395	0.9321	26.0	2.35
ТПС		3.59	162.49	57.108	154.72	0.6309	0.8638	36.9	1.05
БМ		δ_0 , мм	$\gamma_{зфл}^0$, г/м ²	ρ_V^0 , кг/м ³	ρ^0 , кг/м ³	$P^0=П$	ε^0 (18)	W ⁰ ,%	$\delta_{ж}^0$

Таблиця 10 - Предсказание пористости P_3 на основе базовой модели (БМ) гидрофильных хлопковых полотен [4] (3т).

Входные данные					Предсказанные данные				
№	Тип	δ , мм [4]	γ , г/м ² [4]	ρ_V , кг/м ³ [4]	ρ_M , кг/м ³	P_3 (15)	ε (18)	П [4]	$\delta_{ж}$, мм
1	гладь	0.36	119.27	331.3	532.3	0.7694	0.9466	0.7820	0.22
2	гладь	0.44	185.75	422.2	678.4	0.6289	0.8623	0.7224	0.27
3	футер.гл.	0.49	170.62	348.2	559.5	0.7325	0.9284	0.7709	0.30
ТПС		0.36	28.743	271.08	435.56	0.3776	0.6126	-	0.07
БМ		δ_0 , мм	$\gamma_{зфл}^0$, г/м ²	ρ_V^0 , кг/м ³	ρ^0 , кг/м ³	$P^0=П$	ε^0 (18)	-	$\delta_{ж}^0$

Таблиця 11 - Предсказание пористости P_3 на основе базовой модели (БМ) гидрофильных шерстяных тканей [3] (5тт).

Входные данные					Предсказанные данные				
№	Тип	δ , мм [2]	γ , г/м ² [2]	ρ_V , кг/м ³ [2]	ρ_M кг/м ³	P_3 (15)	ε (18)	W, %	$\delta_{Ж}$, мм
1	шерсть	0.38	150	394.7	4525.6	0.9272	0.9947	7.3	0.03
2	шерсть	0.42	180	428.6	4913.6	0.9260	0.9945	7.4	0.04
3	шерсть	0.45	200	444.4	5095.5	0.9255	0.9945	7.5	0.04
4	шерсть	0.47	210	446.8	5122.6	0.9255	0.9945	7.5	0.04
5	шерсть	0.48	240	500.0	5732.5	0.9241	0.9943	7.6	0.04
	ТПС	0.43	157.33	70.042	803.03	0.9128	0.9924	8.7	0.20
	БМ	δ_0 , мм	$\gamma_{\text{эфл}}^0$, г/м ²	ρ_V^0 , кг/м ³	ρ^0 , кг/м ³	$P^0=PI$	$\varepsilon^0(18)$	W ⁰ ,%	$\delta_{Ж}^0$

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Медведева, Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов. Классификация методов контроля пористости материалов. ISSN 0136-5835. Вестник ТПУ. 2012. Том 18, №3, с.749-753.
2. М.Ю. Трещалин, В.С. Мандрон, Г.К. Мухамеджанов. Исследование процесса капиллярного подъема жидкости в нетканых материалах. Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2009, №4С, с.24-26.
3. M. Boguslawska-Baczek, L. Hes, Effective Water Vapor Permeability of Wet Wool Fabric and Blended Fabrics, Fibres & Textiles in Eastern Europe, 2013, 21, 1(97): 67-71.
4. М.И. Дрозд, Т.Ф. Марцинкевич, М.Н. Михалко.

Оценка паропроницаемости трикотажных бельевых полотен, Вестник Витебского государственного технологического университета, 2012, №23, С.34. vestnik-vstu@tut.by

5. S.X. Wang, Y. Li, H. Tokura, J.Y. Hu, Y.X. Han, Y.L. Kwok, R.W. Au. Effect of Moisture Management on Functional Performance of Cold Protective Clothing. Text.Res.J., 2007, 77(12). 968-980.
6. J. Huang, X. Qian. Comparison of Test Methods for Measuring Water Vapor Permeability of Fabrics, Text.Res.J., 2008, 78(4). 342-352.
7. A.S. Iberall, Permeability of Glass Wool and Other Highly Porous Media, Rep. Bur. Aeronautics, Navy Depart., Washington, DC, USA, 398-406.

Отримана в редакції 17.06.2015, прийнята до друку 03.09.2015

Y. D. Kotukov, V. I. Levchenko, O. V. Rogankov, M. V. Shvets, V. B. Rogankov
Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatnaya str., Odessa, 65039, Ukraine

CONCEPT AND MODEL OF MESOSCOPIC POROSITY FOR THIN PERMEABLE MEDIA

There are two main obstacles to perform the objective comparison and choice of preferable variant within the set of appropriate textile materials (TM), related to the thin permeable media: 1) the different experimental methodologies and tools usable by different authors for an estimate of water-vapor-transmission rate; 2) the different ambient conditions of such measurements and a variety of experimental means proposed, at present, for an estimate of TM-porosity. Recently we have studied, in detail, the former factor [V.B. Rogankov et al, Refrigeration Engineering and Technology, 51(1), 2015, pp.47-54] and pointed out the possible strategy to overcome this obstacle. In this work we will pay the main attention to the latter factor. The novel concept of mesoscopic (nano-) porosity of threads is formulated for any woven and non-woven TMS. The resulting alternate basic (AB-) model for theoretical estimate of effective (observable) porosity in hydrophilic and hydrophobic permeable media is developed. It is based, exclusively, on the standard (but the measuring-laboratory-condition's-dependent) measurements of so-called square mass and thickness for the wide set of 41 samples taken from 5 different experimental works. The proposed treatment of such data leads to the simple, well-founded relationships of AB-model without any adjustable coefficients. They provide a possibility to obtain the reliable estimates for the following fundamental TM-characteristics: density of moist and/or dry matrix; observable effective porosity at any level of ambient moisture; maximum hygroscopicity without the additional experiments.

Keywords: standard porosity; hydrophilic and hydrophobic media; effective porosity; alternate basic model of permeable media.

REFERENCES

1. Medvedeva, A.V., Mordasov, D.M., Mordasov, M.M. 2012. Classification of Methods of Control of Porous Materials. Transactions TSTU 2012, 18(3), 749-753.
2. Treschalin, M.Yu, Mandron, V.S., Mukhamedzhanov, G.K. 2009. Investigation of capillary lifting of liquid in non-woven materials.. Izvestiya Vuzov. Technology of the textile industry, No. 4C, 24-26.
3. Boguslawska-Baczek, M., Hes, L. 2013. Effective Water Vapor Permeability of Wet Wool Fabric and Blended Fabrics, Fibres & Textiles in Eastern Europe, 21, 1(97), 67-71.
4. Dрозd, M.I., Martsinkevich, T.F., Mikhalko, M.N. 2012. Estimation of steam permeability of knitted underwear fabrics. vestnik.vstu.by/eng/issues/vestnik-23-2012, No. 23, p. 34.
5. Wang, S.X., Li, Y., Tokura, H., Hu, J.Y., Han, Y.X., Kwok, Y.L., Au, R.W. 2007. Effect of Moisture Management on Functional Performance of Cold Protective Clothing. Text.Res.J., 77(12), 968-980.
Doi: <http://dx.doi.org/10.1177/0040517507083552>
6. Huang, J., Qian, X. 2008. Comparison of Test Methods for Measuring Water Vapor Permeability of Fabrics, Text.Res.J., 78(4), 342-352.
Doi: <http://dx.doi.org/10.1177/0040517508090494>
7. A.S.Iberall, Permeability of Glass Wool and Other Highly Porous Media, Rep. Bur. Aeronautics, Navy Depart., Washington, DC, USA, 398-406.
Doi: <http://dx.doi.org/10.6028/jres.045.043>

Received 17 June 2015
Approved 03 September 2015
Available in Internet 26.10.2015