

ФИЗИЧЕСКИЙ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ К АНАЛИТИЧЕСКОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

PHYSICAL AND METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ANALYTICAL STUDY OF NONWOVEN MATERIALS*

Ю.М. Трещалин
Yu.M. Treschalin

Научно-исследовательский технологический центр, (Москва)
R&D Scientific Center, (Moscow)

В статье дается обоснование представления нетканого материала как сплошной среды, имеющей волокнистое строение и пористую структуру. С позиции методологической рассмотрена целесообразность применения типологического анализа, предполагающего использование различных логико-математических методов и моделей, находящегося в порах и долю тепловой энергии, передаваемой излучением. Базируясь на эмпирических данных, типология опирается на понимание объекта исследования как системы.

Применительно к аналитическому изучению волокнистых материалов предложен ряд определений.

В связи с тем, что величины, характеризующие нетканые материалы, являются взаимосвязанными и взаимозависимыми, эффективно использовать теорию подобия, представляя совокупность различных показателей в виде критериев и критериальных уравнений.

Ключевые слова: нетканый материал, волокно, пористость, сплошная среда, элементарный объем, типология, теория подобия, критерий.

The article explains the rationale for the submission of non-woven material as a continuous medium having a fibrous structure and porous structure. From the position of methodological expediency of application of the typological analysis assuming use of various logical and mathematical methods and models is considered. located in the pores and the proportion of thermal energy transmitted by radiation. Based on empirical data, the typology is based on the understanding of the object of study as a system.

A number of definitions are proposed for analytical study of fibrous materials.

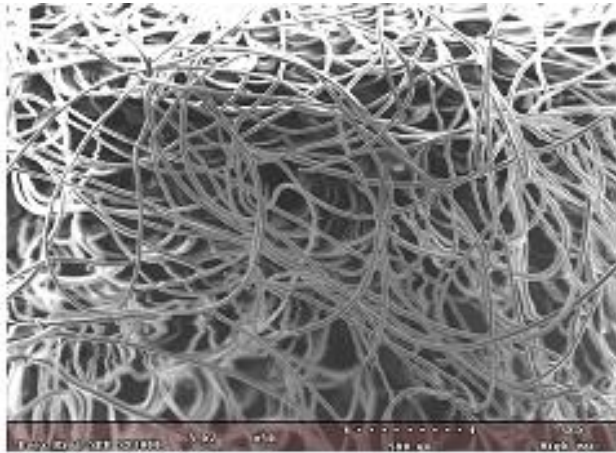
Due to the fact that the values characterizing nonwoven materials are interrelated and interdependent, it is effective to use the similarity theory, representing a set of different indicators in the form of criteria and criteria equations.

Keywords: nonwoven fabric, fiber, porosity, continuous medium, elementary volume, typology, similarity theory, criterion.

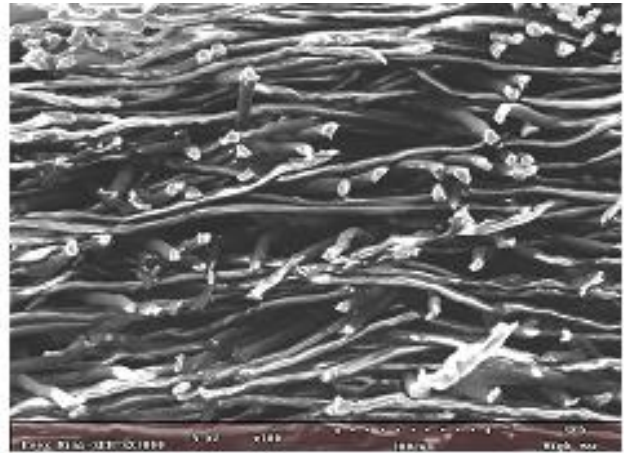
Постоянно возрастающая конкуренция на отечественном рынке выдвигает все более высокие требования к качеству изделий, что в свою очередь, заставляет разработчиков и производителей на стадии проектирования научнообоснованно подходить к прогнозированию характеристик и оценке свойств текстильных материалов. При этом определяющими параметрами являются их целевое назначение и эксплуатационные показатели.

Многообразие существующих теоретических методов определения характеристик волокнистых материалов, достаточно подробное описание которых дается в [1, 2], объясняется большими сложностями системно подходить к анализу всевозможных типов структуры, которые зависят от способов изготовления (ткань, трикотаж, нетканый материал, плетеные изделия). Немаловажное значение имеют форма, размеры, физико-механические свойства и взаимодействие (сцепление) структурных элементов (волокна, нити), а также плотность их расположения в произвольно взятом макрообъеме.

Математическое и геометрическое моделирование нетканых полотен представляет известные трудности, что связано в основном с извитостью волокон и неупорядоченным расположением их в материале (рис. 1).



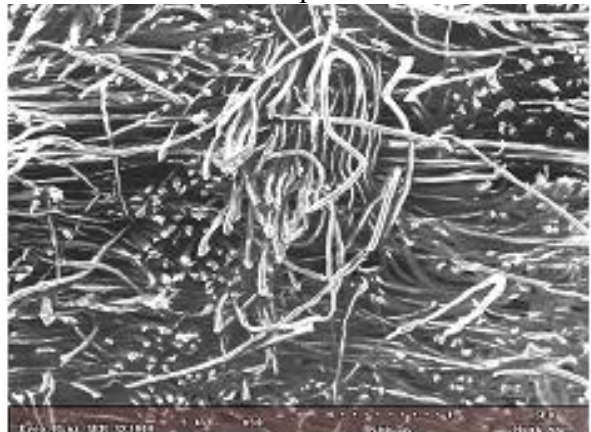
«Холлофайбер Волюметрик», 600 г/м².
Полиэфирные мононити – 100 %. ООО
«Термопол»



«Канвалан», формирование холста
фильрное (спанбонд), аэродинамическое,
иглопробивной, термостабилизированный
каландрированием, 469,7 г/м².
Полипропиленовые мононити – 100 %. ОАО
«Ортон».



«Геоком Д», иглопробивное,
каландрированное с одной стороны, 393 г/м².
Штапельное волокно: полиэфирные - 20 %;
полипропиленовые - 80 %. ООО «Комитекс».



«Геотекс М 600», формирование холста
фильрное (спанбонд), аэродинамическое,
иглопробивной, 632 г/м². Полипропиленовые
мононити – 100 %. ООО «Сибур-
Геотекстиль».

Рис. 1. Структура нетканых полотен различных производителей.

Поэтому для анализа процессов тепло и звукопроводности, фильтрации, самопроизвольного впитывания, упругопластических деформаций, широко применяются идеализированные модели, посредством которых осуществляется взаимосвязь между физическими особенностями рассматриваемых явлений и геометрическими размерами и формой структурных элементов.

В общем случае, представление твердой фазы текстильных материалов в виде многогранников, сферических или цилиндрических тел значительно сокращает область применения таких моделей и имеет ряд недостатков, к которым следует отнести:

- одинаковый размер структурных элементов;
- постоянство степени заполнения порового пространства при заданном расположении волокон независимо от их размера.

Кроме того, подобные модели не являются достаточно эффективными в связи с наличием грубых допущений, которые заключаются в возможности либо изначально заданного контакта, либо полного его отсутствия между волокнами (нитями). Таким

образом, теоретические методы, основанные на микроуровневом моделировании, не приемлемы при исследовании физико-механических, гидродинамических и теплофизических процессов, происходящих в волокнистых структурах.

В связи с этим, в частности, нетканые материалы представляется целесообразным рассматривать как сплошные среды, имеющие волокнистое строение и пористую структуру. Причем, под пористостью следует понимать не совокупность отдельных пустот, замкнутых или соединенных между собой, а макрообъем вещества (например, воздуха), в котором находится большее или меньшее количество волокон (мононитей), расположенных регулярно или хаотически. Необходимо отметить, что отдельных явно выраженных пор и капилляров, в общепринятом понимании этого термина, в нетканых материалах не наблюдается (рис. 1).

Применение гипотезы сплошности связано с понятием материального континуума, что дает возможность считать непрерывным распределение в материале основных физических величин (плотность, коэффициент теплопроводности, пористость и т.д.), пренебрегая взаимодействием отдельными волокнами. Поскольку сплошная среда (материальный континуум) есть некоторая виртуальная субстанция, непрерывно заполняющая часть пространства, описание ее состояния связано с заданием величин в каждой точке какой-либо рассматриваемого пространства. При этом предполагается, что пространство, в котором рассматриваются процессы, происходящие в сплошных средах, является евклидовым.

Кроме того, подобный подход позволяет использовать аппарат непрерывных функций, дифференциальное и интегральное исчисление, что особенно актуально для изучения напряженно-деформированного состояния нетканых полотен, имеющих неориентированное расположение структурных элементов.

Понятие сплошной среды неразрывно связано с однородностью свойств на всем ее протяжении. Экспериментальные исследования показали, что различные по сырьевому составу и способу производства нетканые полотна имеют практически равные значения коэффициента изотропности по прочности и деформации, что позволяет констатировать наличие изотропных свойств у исследуемых материалов.

В процессе эксплуатации текстильных изделий нет необходимости знать, как изменяются характеристики каждого волокна или мононити. Поэтому предполагается, что все элементы идентичны по своим характеристикам, равномерно распределены по всему объему и свойства выделенных в ней макрообъемов одинаковы. Таким образом, при исследовании волокнистого материала достаточно изучить его элементарный объем – часть среды, ничтожно малую по сравнению с размерами материала и вместе с тем достаточно значительную по сравнению с характерным (поперечным) размером единичного волокна и содержащую настолько большое число волокон, что можно применять статистическое осреднение. Это положение определяет два основных подхода к изучению сплошных сред: статистический и феноменологический.

Статистический подход основывается на методах статистической механики, вероятностных методах, применению средних характеристик по макрообъему структурных элементов, введению дополнительных гипотез о свойствах и расположении микрочастиц с целью упрощения модели, что, применительно к нетканым материалам, затруднительно в связи с недостатком информации о расположении и взаимодействии волокон.

Для решения большинства задач механики сплошных сред применяются строгие математические приемы интегрирования основных дифференциальных уравнений при установленной системе граничных и начальных условий [3, 4]. Однако, большая сложность и недостаточная изученность многих явлений вынуждают не довольствоваться применением только методов теоретической механики и математической физики, но и широко пользоваться всевозможными эмпирическими приемами и так называемыми «полуэмпирическими» зависимостями, в построении которых большую роль играют результаты экспериментов. Поэтому для изучения волокнистых материалов наиболее

целесообразно использовать феноменологический подход (от греческого слова *phainomenon* - явление), базирующийся на общих, полученных из опыта закономерностях и гипотезах, которые принимаются за истинные и используются для:

- построения систем характеристических функций, адекватно описывающих процессы, происходящие в сплошных средах;
- выявления параметров состояния и уравнений, устанавливающих взаимосвязи, основанные на экспериментальных данных и использующихся для математического моделирования исследуемых сред;
- определения начальных и граничных условий, при которых искомые характеристики могут быть найдены математическими методами.

Основываясь на вышеизложенных рассуждениях и доводах, в соответствии с феноменологическим подходом к изучению волокнистых материалов, можно предложить ряд понятий и определений:

Нетканый материал - сплошная среда, имеющая волокнистое строение и пористую структуру.

Элементарный объем нетканого материала – часть сплошной среды, ничтожно малая по сравнению с размерами материала, но достаточно значительная по сравнению с характерным (поперечным) размером единичного волокна (мононити) и содержащая настолько большое число волокон (мононитей), что можно применять статистическое осреднение.

Нетканое полотно – пористая сплошная среда, структурными элементами которой являются скрепленные между собой механическим, физико-химическим, термическим или комбинированным способами волокна или мононити.

Волокнистый теплоизолятор - высокопористый нетканый материал, предназначенный для теплоизоляции одежды, промышленных, строительных и жилищно-бытовых объектов.

Пористость – совокупность промежутков между структурными элементами сплошной среды, заполненных веществом, в котором находится исследуемый материал, и определяемая соотношением объемных плотностей материала и составляющих его волокон (нитей).

Единичная пора представляет собой микрообъем среды, либо ограниченный (замкнутая пора), либо соединяющийся несколькими аналогичными, близко расположенными микрообъемами.

Капилляр (от лат. *capillaris* - волосной) –полая трубка произвольного поперечного сечения с очень узким внутренним каналом.

Радиус условного капилляра – геометрическая характеристика сплошной среды, зависящая от пористости и определяющих линейных размеров структурных элементов (для текстильных материалов – диаметр волокна или мононити). Понятие условного капилляра позволяет применить существующие формулы, справедливые для капиллярных и капиллярно-пористых тел, для приближенного расчета высоты самопроизвольного подъема жидкости в пористых средах.

Показатель (коэффициент) гидравлической проницаемости – параметр сплошной среды, характеризующий ее способность пропускать жидкость при перепаде давления и зависящий от пористости (капилляров для капиллярно-пористых тел) и геометрических размеров структурных элементов.

Эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}$ – параметр, характеризующий интенсивность прохождения тепла в сплошных средах, имеющих капиллярно-пористое или пористое строение, учитывающий молекулярный теплоперенос в структурных элементах (волокнах, мононитях), молекулярный и конвективный теплообмен между частицами вещества, находящегося в порах и долю тепловой энергии, передаваемой излучением.

С позиции методологической, представляется целесообразным применять типологический анализ, предполагающий использование различных логико-математических

методов и моделей. Такой подход открывает путь к построению абстрактных типологий, в которых тип понимается как сложная конструкция, размещенная в многомерном пространстве. Необходимо отметить, что типология, как метод научного познания, используется в целях сравнительного изучения существенных признаков, связей, функций, отношений и уровней организации объектов [5-7].

Базируясь на эмпирических данных, типология опирается на понимание объекта исследования как системы. Это позволяет определить математические зависимости и, как следствие, закономерности, присущие многообразию нетканых материалов, что в свою очередь дает возможность прогнозировать характеристики и свойства рассматриваемых текстильных изделий.

Конкретное применение феноменологического и типологического подходов можно показать на примере анализа процесса самопроизвольного впитывания жидкости неткаными материалами.

Отсутствие капилляров, как таковых, в строении нетканого полотна, требует принципиально иного, по отношению к существующим, подхода для изучения процесса самопроизвольного впитывания жидкости волокнистыми материалами. Особенность поставленной задачи с позиции механики сплошных сред заключается в использовании в качестве определяющего параметра не линейного размера капилляра (радиуса), а макрообъемной характеристики, например, пористости или плотности, что особенно актуально для нетканых полотен, имеющих неориентированное расположение волокон или мононитей.

Общепринято пористостью среды ξ называть отношение объема пустот к общему объему среды [8, 9]. Для волокнистых материалов и, в частности, нетканых полотен, пористость может быть выражена как отношение плотностей материала и составляющих его волокон:

$$0 \leq \xi = 1 - \frac{\rho_M}{\rho_B} \leq 1$$

где: ξ - пористость материала;

ρ_M - плотность материала, кг/м³;

ρ_B - плотность волокон (мононитей), кг/м³;

Помимо пористости при изучении рассматриваемого процесса, необходимо принимать во внимание структуру и строение пористой среды, а также физические свойства жидкости. Таким образом, дополнительными параметрами, характеризующими среду с точки зрения движения жидкости в поровом пространстве, будут:

- проницаемость - показатель интенсивности течения жидкости в пористой среде;
- линейный размер структурных элементов, в качестве которого принимается диаметр или длина, в зависимости от принятой модели среды.

С учетом указанных параметров формируются условия динамического равновесия при распределении скоростей в каждом сечении волокнистого материала между силами инерции и внутреннего трения, а также внешней нагрузкой и распределением давления внутри жидкости.

Процессы самопроизвольного впитывания пористыми средами обусловлены влиянием сил межмолекулярного взаимодействия на равновесие и движение свободной поверхности жидкости, поверхности раздела несмешивающихся жидкостей и границ жидкостей с твердыми телами. При соприкосновении жидкости со структурными элементами силы притяжения, действующие между молекулами волокон и жидкости, заставляют ее подниматься по поверхности волокна, вследствие чего примыкающий к стенке участок поверхности жидкости принимает выпуклую или вогнутую форму [10-12].

Интенсивность самопроизвольного впитывания жидкости нетканым материалом изменяется во времени. Подъем осуществляется до тех пор, пока силу поверхностного натяжения не уравновесит сила давления столба поднятой жидкости. Причем, скорость впитывания первоначально резко возрастает, а затем постепенно замедляется и через

некоторый промежуток времени становится равной нулю, т.е. высота подъема жидкости (или количество удерживаемой материалом жидкости) достигает своего максимального значения, которое остается постоянным во времени при неизменных параметрах среды, в которой находится материал (например, атмосфера).

Принимая во внимание, что кинетика впитывания одинакова для нетканых полотен, выработанных различными способами и состоящих из различных видов волокон (мононитей), для аналитического описания процесса подъема жидкости, в соответствии с феноменологическим подходом, может быть использована функция вида:

$$G(x) = f \cdot \frac{\alpha+x}{\alpha+x^2} - f,$$

где: $x = \xi$ – пористость материала;

$G(x) = h(\xi)$ – высота подъема жидкости;

α, f – коэффициенты пропорциональности.

В зависимости от соотношения численных значений α и f характер расположения кривой $G(x)$ на плоскости может быть различным (рис. 2).

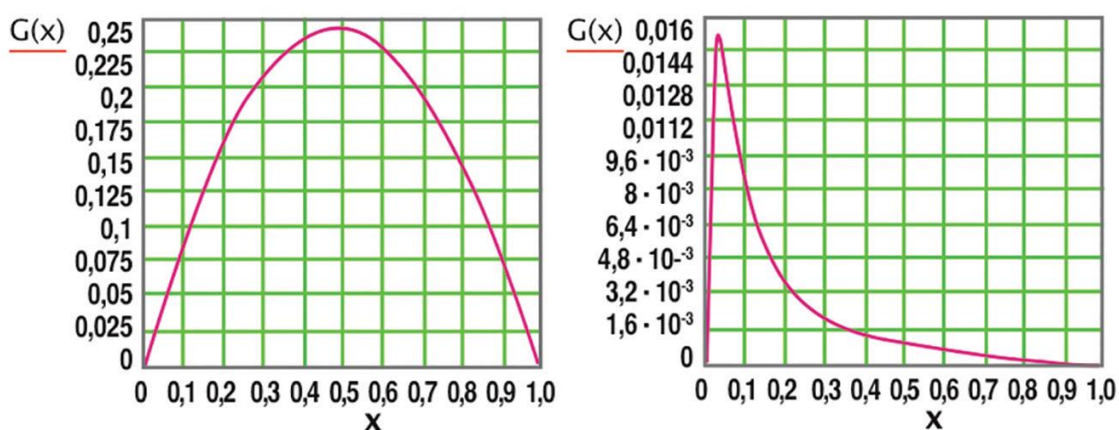


Рис. 2. Характер расположения кривой функции $G(x)$ в зависимости от численных значений α и f .

Обоснованием целесообразности выбора приведенного уравнения для аналитического исследования процесса впитывания жидкости волокнистым материалом, является:

- наличие единственного экстремума $0 \leq x^* \leq 1$, позволяющего выявить максимальное значение $G(x^*)$;

- $G(x) > 0$; ;

- $G(x=0) = G(x=1) = 0$;

- $\frac{dG(x^*)}{dx^*} = 0$;

- наличие и непрерывность второй производной $\frac{d^2G(x)}{dx^2}$ на интервале $0 \leq x \leq 1$.

Из необходимого условия существования экстремума функции определяется точка x^* :

$$x_{1,2}^* = -\alpha \pm \alpha \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\alpha}},$$

Учитывая физические особенности процесса впитывания, рассматриваются только положительные значения x^* . Значение функции в точке экстремума равно:

$$G(x^*) = \frac{f \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\alpha}} - 1}{2},$$

С целью определения коэффициентов пропорциональности α и f сделано допущение о наличии некоторой функции $Y(x)$, идеально описывающей процесс впитывания вязкой жидкости волокнистым материалом. При этом предполагается, что в точке x^* достигается минимум функционала:

$$\int_0^1 [G(x) - Y(x)]^2 dx = V + W$$

где: $V = \int_0^{x^*} [f^2 \cdot \frac{\alpha+x}{(\alpha+x)^2} - f - \beta \cdot x]^2 dx$; $W = \int_{x^*}^1 [f^2 \cdot \frac{\alpha+x}{(\alpha+x)^2} - f - \gamma \cdot (1-x)]^2 dx$.

Изображение $G(x)$ и $Y(x)$ в диапазоне $0 \leq x \leq 1$ представлено на рис. 3. Заштрихованная площадь между графиками соответствующих функций соответствует условию $\int_0^1 [G(x) - Y(x)]^2 dx \rightarrow \min$.

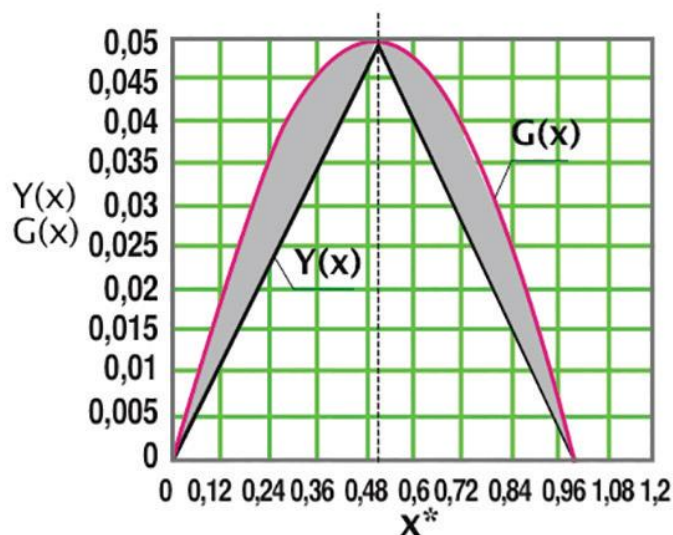


Рис. 3. График функций $G(x)$ и $Y(x)$

Последующие, достаточно сложные математические выкладки, связанные с интегрированием и дифференцированием приведенных выше уравнений, достаточно подробно изложены в [2].

В результате проведенных вычислений установлено, что функция $G(x)$ имеет экстремум в точке $x^* = 0,01719425$ в которой: $G(x^*) = 1,58810317$; $\alpha = 0,00030617$; $f = 0,0565574$ (рис. 4).

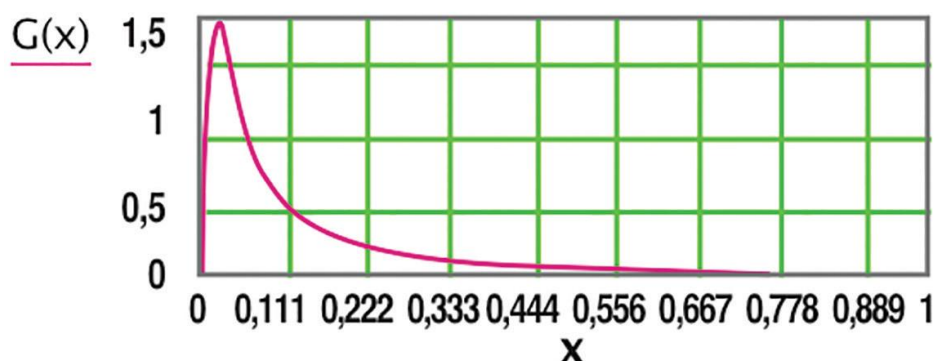


Рис. 4. График функции $G(x)$

Таким образом, дальнейший анализ кинетики впитывания проводится для $x^* = 0,01719425$ и $G(x^*) = 1,58810317$, полагая, что значение x^* соответствует пористости материала ξ^* , выраженной в относительных единицах, а величина $G(x^*)$ равна максимальной высоте подъема жидкости $h(\xi^*)$, выраженной в метрах. При этом высота подъема в зависимости от пористости определяется из уравнения:

$$h(\xi) = (0,0565574 \cdot \frac{0,00030617 + \xi}{0,00030617 + \xi^2} - 0,0565574) \cdot \frac{g \cdot \eta_{ж}}{\eta_{в}}$$

В основу аналитического исследования самопроизвольного впитывания жидкости волокнистым материалом в зависимости от времени также положены феноменологический и типологический подходы.

Основываясь на экспериментальных данных, для адекватного описания рассматриваемого процесса может быть использована функция вида:

$$F(x) = (x - D) \cdot e^{-a \cdot (x - D)} + C,$$

где: $x = \tau$ – время насыщения материала;

$F(x) = h(\tau)$ – высота подъема жидкости в момент времени τ ;

D, a, C – константы, учитывающие способ производства и пористость материала, вид и степень гладкости волокнистого состава.

Характер расположения кривой $F(x)$ на плоскости определяется соотношением численных значений констант D, a, C (рис. 5).

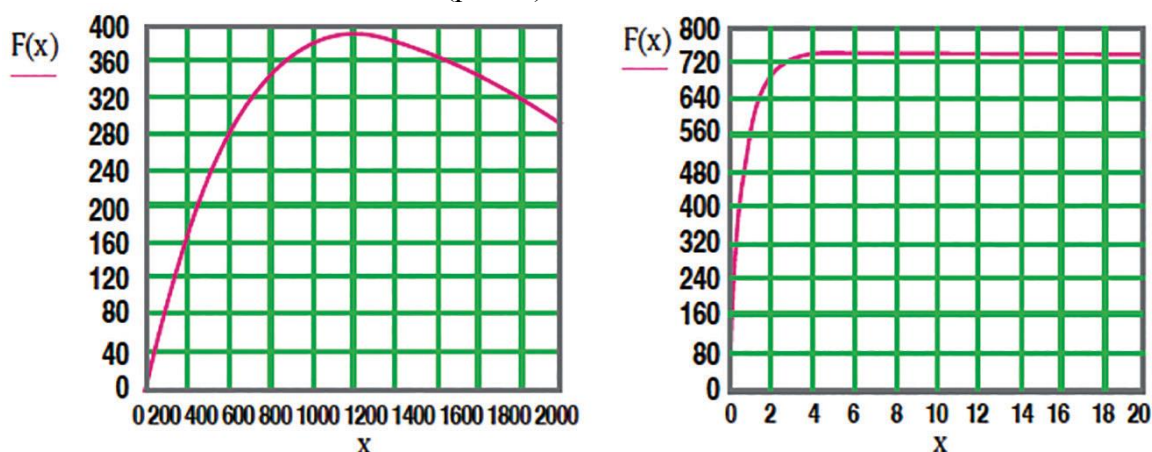


Рис. 5. Характер расположения кривой функции $F(x)$ в зависимости от численных значений D, a, C

Функция $F(x)$ является унимодальной, т.е. существует единственный экстремум $x^* > 0$, при котором $F(x)$ достигает максимума, который определяется из необходимого условия существования экстремума:

$$\frac{dF}{dx} = e^{-a \cdot (x - D)} - a \cdot (x - D) \cdot e^{-a \cdot (x - D)} = 0$$

Из этого уравнения точка экстремума x^* и значение функции в этой точке $F(x^*)$:

$$x^* = \frac{1}{a} + D = \frac{1 + a \cdot D}{a};$$

$$F(x^*) = \frac{1}{a} \cdot e^{-1} + y.$$

В диапазоне x от 0 до ∞ , $F(x)$ имеет следующие значения:

$$F(x = 0) = 0 \text{ и } F(x \rightarrow \infty) = y. \quad (1)$$

При проведении математического анализа предполагается, что в точке x^* достигается минимум функционала:

$$\int_0^{\infty} [F(x) - f(x)]^2 dx \rightarrow \min \quad (2)$$

где: $f(x)$ – некоторая функция, выбранная из физических соображений, идеально описывающая процесс впитывания вязкой жидкости волокнистым материалом и удовлетворяющая следующим условиям:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{y}{x^*}, & 0 \leq x < x^* \\ y, & x^* \leq x < \infty \end{cases}$$

Совместное расположение функций $F(x)$ и $f(x)$ представлено на рис. 6. Заштрихованная площадь между графиками функций $F(x)$ и $f(x)$ соответствует предположению (2).

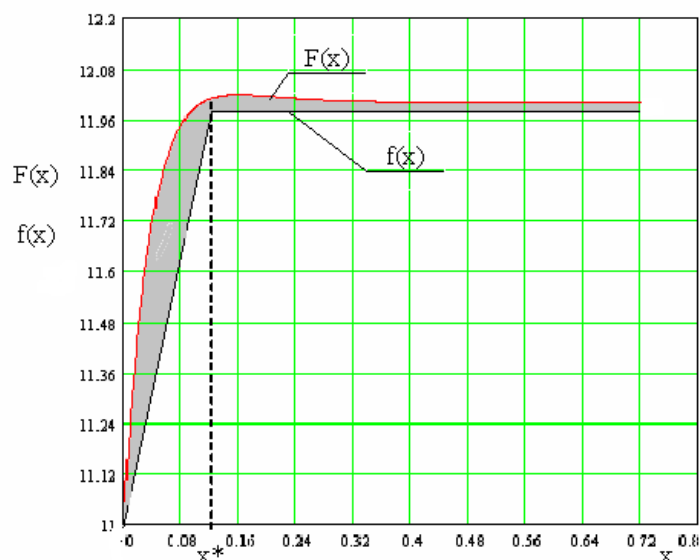


Рис. 6. Графическое изображение функций $F(x)$ и $f(x)$

Функционал (2) можно записать в виде:

$$\int_0^{\infty} [F(x) - f(x)]^2 dx = A + B = \Psi$$

где: $A = \int_0^{x^*} [F(x) - f(x)]^2 dx$; $B = \int_{x^*}^{\infty} [F(x) - y]^2 dx$.

Из (1) выражается система:

$$\begin{cases} 0 = -D \cdot e^{a \cdot D} + C \\ y = C \end{cases},$$

которая дает возможность определить уравнение связи параметров: $y = D \cdot e^{a \cdot D}$

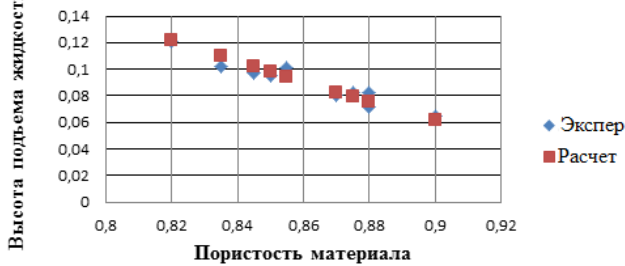
С целью оценки адекватности выбранной функции $F(x)$ исследуемому физическому процессу, в [2] проведен подробный математический анализ влияния коэффициентов D , a , C на поведение функции $F(x)$, а также определение значений x^* и $F(x^*)$.

В результате теоретических исследований кинетики впитывания жидкости материалом были установлены зависимости между основными характеристиками процесса: высотой, временем и скоростью вертикального подъема жидкости от пористости волокнистой среды.

Экспериментальная проверка показала наличие равномерности впитывания жидкости по всему объему порового пространства испытуемых нетканых полотен [2]. Очевидно, что хаотическое расположение мононитей в структуре материала (изотропность структуры) отражается на движении жидкости по длине и ширине образцов.

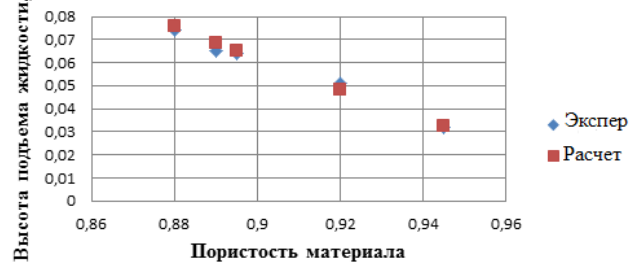
Сопоставление опытных и расчетных значений максимальной высоты подъема жидкости в нетканых материалах различных производителей (рис. 7) указывает на правомерность использования предложенных зависимостей для анализа процесса самопроизвольного впитывания с достаточностью, для выполнения технических расчетов.

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений высоты подъема жидкости в зависимости от пористости нетканых материалов "Геотекс"



а

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений высоты подъема жидкости в зависимости от пористости нетканых материалов "Геоком Д"



б

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений высоты подъема жидкости в зависимости от пористости нетканых материалов "Холлофайбер"



в

Рис. 7. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений высоты подъема жидкости в зависимости от пористости нетканых полотен: а.- «Геотекс»; б. - «Геоком Д»; в – «Холлофайбер».

Проведенные комплексные исследования дают возможность судить о том, что полученные результаты не противоречат физическому смыслу протекающего процесса, и в большинстве своем, имеет место достаточно близкое совпадение экспериментальных и расчетных значений высоты подъема воды в зависимости от пористости нетканых полотен.

Такой вывод позволяет осуществить численный анализ кинетики процесса впитывания неткаными полотнами с учетом физических и геометрических характеристик жидкости (воды) и волокнистого материала. Для математической обработки экспериментальных данных [2, 13] использовался программный комплекс Mathcad 15.0. Оценка точности аппроксимации производилась по значениям:

- относительной погрешности, %: $U = (f_{\text{Э}} - f_{\text{Т}}) \cdot 100 / f_{\text{Э}}$,

- коэффициента корреляции: $K_k^2 = 1 - \frac{S1}{S2}$,

$$S1 = \sum_n (f_{\text{Э}} - f_{\text{Т}})^2$$

$$S2 = \sum_n (f_{\text{Э}})^2 - \frac{\sum_n (f_{\text{Э}})}{p}$$

где: $f_{\text{Э}}$ - экспериментальные данные;

$f_{\text{Т}}$ - результаты вычислений с использованием формул, полученных в результате аппроксимации;

$n = 1 \dots N$ - номер, соответствующий значениям, полученным в результате измерений;

p - общее количество экспериментальных данных (образцов в соответствующей группе).

Полученные математические зависимости, графическая интерпретация результатов, величина коэффициентов корреляции и оценка погрешности вычисленных значений по отношению к опытным данным, приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты аппроксимации расчетных величин.

Математическая зависимость	График зависимости	Значение коэффициента корреляции K_k^2	Величина относительной погрешности, %	
			min	max
Зависимость времени впитывания жидкости τ^* (мин) от пористости ξ волокнистого материала при $0 \leq \xi \leq 0,01719$				
$\tau^*(\xi) = 8,7115053 \cdot 10^4 \cdot \xi^{1,1} \cdot (0,3153768 \cdot \xi^{-0,4} - 1)$		1,00	- 0,246	0,235
Зависимость времени впитывания жидкости τ^* (мин) от пористости ξ волокнистого материала при $0,01719 \leq \xi \leq 1$				
$\tau^*(\xi) = 150,7487755 \cdot \xi^{-0,35} \cdot (1 - 0,963805 \cdot \xi^{0,79})$		1,00	- 1,04	1,201
Зависимость времени впитывания τ^* (мин) от максимальной высоты подъема жидкости h (м) при заданной пористости материала ξ				
$\tau^*(h) = 19,9133151 \cdot h^{0,13} \cdot (6,973494522 \cdot \xi^{0,42} - 1)$		1,00	- 0,197	0,128
Зависимость средней скорости впитывания v_{cp} (м/с) от максимальной высоты подъема жидкости h (м)				
$v_{cp}(h) = 7,37439805 \cdot 10^{-5} \cdot h^{0,21} \cdot (0,90294655 \cdot h^{0,34} + 1)$		1,00	- 0,31	0,295

Изложенные результаты исследований позволяют разработать методику расчета основных характеристик процесса самопроизвольного впитывания жидкости волокнистыми материалами. Исходные данные, формулы и последовательность вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Методика расчета характеристик процесса самопроизвольного впитывания жидкости волокнистым материалом.

№ шага	Описание этапа	Расчетные формулы
I	Исходные данные	
I.1	Характеристики волокнистого материала: - диаметр волокна (монопнити), м; - пористость.	d ξ
I.2	Параметры жидкости: - краевой угол смачивания, град; - кинематический коэффициент вязкости жидкости, Па·с; - кинематический коэффициент вязкости воды, Па·с - поверхностное натяжение жидкости, Н/м.	$\theta (\cos \theta = 1)$ $\eta_{ж}$ $\eta_{в} = 8,94 \cdot 10^{-4}$ σ
II	Вычисляются	
II.1	- высота впитывания в зависимости от пористости материала и вязкости жидкости, м:	$h(\xi) = (0,0565574 \cdot \frac{0,00030617 + \xi}{0,00030617 + \xi^2} - 0,0565574) \cdot \frac{g \cdot \eta_{в}}{\eta_{ж}}$ $= \frac{k}{v^2} \cdot \frac{g \cdot \eta_{в}}{\eta_{ж}}$
II.2	- время достижения максимальной высоты подъема жидкости, с:	$\tau^*(\xi) = 8,7115053 \cdot 10^4 \cdot \xi^{1,1} \cdot (0,3153768 \cdot \xi^{-0,4} - 1)$ при $0 \leq \xi \leq 0,01719$
		$\tau^*(\xi) = 150,7487755 \cdot \xi^{-0,35} \cdot (1 - 0,963805 \cdot \xi^{0,79})$ при $0,01719 \leq \xi \leq 1$
II.3	- показатель проницаемости структуры материала:	$k = \frac{\eta_{ж} \cdot \xi^2}{8 \cdot \tau \cdot \sigma \cdot \cos \theta \cdot 4 \cdot (1 - \xi) \cdot \frac{1}{d}} \cdot [h(\xi)]^2$
II.4	- средняя скорость впитывания жидкости в зависимости от пористости материала, м:	$v_{cp}(h) = 7,37439805 \cdot 10^{-5} \cdot h^{0,21} \cdot (0,90294655 \cdot h^{0,34} + 1)$
II.5	- радиус условного капилляра волокнистого материала, м:	$r_{эф} = \frac{16 \cdot k \cdot (1 - \xi) \cdot \frac{1}{d}}{\xi^2}$

Изложенный комплексный подход к изучению нетканых материалов позволяет прогнозировать их параметры и свойства посредством математического моделирования с учетом разнообразия волокнистого состава, способа изготовления и условий перспективной эксплуатации. И, несмотря на то, что теоретические исследования проводятся с определенными приближениями, дальнейшее развитие аналитических методов расчета

характеристик волокнистых материалов позволит сократить затраты на проведение длительных, трудоемких и дорогостоящих экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трещалин М.Ю., Трещалин Ю.М., Киселев М.В., Мухамеджанов Г.К., Трещалина А.В. Проектирование, производство и методы оценки качества нетканых материалов. Издание 3-е, перераб. и доп. М.: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2017, 288 с.
2. Трещалин Ю.М. Анализ структуры и свойств нетканых материалов. М.: Издательство «БОС», 2016, 192 с.
3. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1 М.: Наука, 1970 г., 492 с.
4. [Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа](#). М.: 1960, 676 с.
5. Электронный ресурс. – Режим доступа: vocabulary.ru/Термины/типология.html
6. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
7. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://ponjatija.ru/node/12893>
8. Кукин Г.Н. Текстильное материаловедение (исходные текстильные материалы): Учебник для вузов / Г.Н. Кукин, А.Н. Соловьев. 2 – е издание перераб. и доп. / Г.Н.Кукин, А.Н. Соловьев. – М.: Легпромбытиздат, 1985. – 216 с.
9. Жихарев А.П. Свойства волокнистых материалов при действии технологических и эксплуатационных факторов. Учебное пособие по дисциплине «Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности» / А.П.Жихарев, О.В.Фукина, В.С. Белгородский, Н.Г.Бессонова. – М, ИИЦ МГУДТ. – 2006. – 204 с.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 4-е изд., стер. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1988. – 736 с.
11. Лыков А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. - М.: Гостехиздат, 1954. 296 с.
12. [Милн-Томсон Л.М. Теоретическая гидродинамика](#). М.: Мир, 1964. – 660 с.
13. Трещалин Ю.М. Композиционные материалы на основе нетканых полотен: монография / Ю.М. Трещалин. - М.: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2015.- 220 с.

**участник Всероссийского конкурса молодежных исследовательских проектов «ЛЕГПРОМНАУКА»*