

**КРИТЕРИИ И КРИТЕРИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СВОЙСТВ И
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ***

**CRITERIONS AND CRITERIA EQUATIONS FOR ANALYSIS OF PROPERTIES AND
PREDICT CHARACTERISTICS OF NONWOVENS MATERIALS***

Ю.М. Трещалин
Yu.M. Treschalin

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

В статье рассматривается возможность использования критериальных зависимостей для анализа свойств нетканых полотен. В результате получены критерии, позволяющие прогнозировать характеристики исследуемых материалов.

Ключевые слова: пористость, нетканое полотно, плотность, толщина, критерий, критериальные уравнения.

The article discusses the possibility of using criterion dependences for analysis of properties of nonwovens. The resulting criteria enable us to predict characteristics of the investigated materials.

Keywords: porosity, non-woven fabric, density, thickness, criterion, criteria equations.

Выявление наиболее значимых параметров и системообразующих связей, а также используя представление материала как сплошной среды, способствует разработке критериев подобия и построению критериальных зависимостей.

Теория подобия – как один из методов обобщения в науке или способ обобщенных переменных [1], широко используются для всестороннего изучения различных сред, т.к. системные исследования предполагают проведение эксперимента, что связано с измерением и обработкой статистических данных, а также повышением точности и достоверности оценок вычисляемых параметров волокнистых материалов.

Численная оценка подобных процессов или явлений устанавливается посредством критериев подобия, представляющих собой безразмерные функционалы от параметров объекта. Причем, критерии подобия одинаковы у подобных явлений. Тогда результаты исследования конкретного материала могут быть распространены на изделия, имеющие аналогичные особенности технологии производства, волокнистый состав, структуру и свойства. Объединение физических параметров в безразмерные критерии, является специфической особенностью рассматриваемого метода исследования сплошных сред.

А.А. Гухман [2] различает в теории подобия четыре категории безразмерных величин: константы подобия, параметрические критерии подобия, безразмерные комплексные переменные и критерии подобия. Физический смысл критериев подобия отражается в виде математической формулы и предшествующих ей вычислениях.

В теоретических исследованиях и расчетах сложных процессов соображения о физическом подобии играют большую роль. На первом этапе изучения задачи эти соображения помогают лучше разобраться в существе явлений и выбрать основные безразмерные аргументы, от которых зависит изучаемое явление. Далее наиболее простым образом обосновывается вид неизвестной функциональной зависимости [3].

Смысл разработки критериев заключается в том, что величины, характеризующие рассматриваемые объекты и процессы, являются взаимосвязанными и взаимозависимыми, вследствие чего можно воспользоваться математическим аппаратом, представляя

совокупность различных показателей в виде уравнений. Кроме того, анализ преобразования размерностей позволяет сделать вывод о том, что всякое соотношение между размерными величинами можно сформулировать в виде безразмерного показателя.

Изучение строения и свойств различных видов нетканых полотен дает возможность предположить, что протекание физико-механических, теплофизических и гидродинамических процессов в их структуре имеет принципиально одинаковый характер. В связи с этим целесообразно оценить численные значения основных характеристик полотен, разработав систему критериев, отражающих разнообразие их структуры и свойств.

В общем случае, волокнистый материал можно рассматривать с двух позиций: технологической и структурной, которые обусловлены способом производства.

Текстильное изделие, в большинстве случаев, характеризуется поверхностной плотностью $\Pi_{\text{п}}$ и видом волокнистого состава. Учитывая, что все волокна (мононити) различны по своей природе, наиболее значимым показателем разнообразия структурных элементов следует считать их плотность $\rho_{\text{в}}$. Однако перечисленные показатели не полностью отражают представление о материале, как с позиции целевого использования, так и с точки зрения строения и свойств. Поэтому для полноты оценки готового продукта следует учитывать и толщину δ , что позволяет вычислить объемную плотность и пористость материала, а также иметь опосредованное представление о проницаемости, тепло и звукоизоляционных свойствах и т.д.

Структура материала, в основном определяется: характерным размером волокон (мононитей), который может быть выражен через диаметр d , и их взаимным расположением, что дает представление о свойствах (анизотропия или изотропность). Относительно течения жидкости в поровом пространстве, структуру материала определяют его пористость ξ и, зависящий от диаметра волокна и проницаемости материала, радиус условного капилляра $r_{\text{эф}}$, которые дают возможность численно оценить основные параметры процессов самопроизвольного впитывания или фильтрации. Кроме того, взаимное расположение структурных элементов и их размеры оказывают существенное влияние на проницаемость волокнистой среды, что особенно важно при изучении теплообменных и гидродинамических процессов.

Учитывая выше приведенные доводы, в качестве наиболее информативных характеристик текстильного, и, в частности, нетканого материала, включающих основные технологические, структурные и физические показатели, предлагаются следующие безразмерные критерии:

- технологический: $K_{\text{т}} = \frac{\Pi_{\text{п}} \cdot 10^{-3}}{\rho_{\text{в}} \cdot \delta \cdot 10^{-3}} = \frac{\Pi_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}} \cdot \delta} = (1 - \xi);$

- структурный: $K_{\text{с}} = \frac{\xi \cdot d}{r_{\text{эф}}};$

- проницаемости: $K_{\text{п}} = \frac{k}{h \cdot d},$

где: $\Pi_{\text{п}}$ – поверхностная плотность, г/м²;

$\rho_{\text{в}}$, d – плотность (кг/м³) и диаметр (м) волокна (мононити) соответственно;

δ , ξ – толщина (мм) и пористость материала соответственно;

h – высота самопроизвольного подъема жидкости, м;

k – показатель проницаемости структуры материала, м².

Для характеристики течения жидкости, как правило, используется критерий Рейнольдса Re , который применительно к процессам фильтрации и самопроизвольного впитывания можно представить как: $Re = \frac{v_{\text{ср}}(h) \cdot r_{\text{эф}}}{\nu},$

где: $v_{\text{ср}}(h)$ - средняя скорость впитывания жидкости, м/с;

$r_{\text{эф}}$ - радиус условного капилляра волокнистого материала, м;

ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Численный анализ, проведенный на основе имеющихся результатов экспериментальных и теоретических исследований нетканых полотен [4, 5] с использованием программного комплекса Mathcad 15, позволил выявить системную

взаимосвязь между Re , K_T , K_C , K_{Π} в виде критериальных уравнений. В табл. 1 приведены полученные математические зависимости, графики, коэффициенты корреляции и относительная погрешность расчета соответствующих значений.

Таблица 1.

Результаты расчетов по определению взаимосвязи между критериями.

Математическая зависимость	График зависимости	Значение коэффициента корреляции K_k^2	Величина относительной погрешности, %	
			min	max
Зависимость критерия $Re = \frac{v_{cp} \cdot \Gamma_{\text{эф}}}{\nu}$ от структурного критерия $K_C = \frac{\xi \cdot d}{r_{\text{эф}}}$ волокнистого материала				
$Re = [196,5504927 \cdot (K_C)^{-1,115} - 2,018145 \cdot 10^{-13} \cdot (K_C)^{2,5} + 3,6390757 \cdot 10^{-3}] \cdot 10^{-17}$		1,00	- 2,341	3,516
Зависимость критерия $Re = \frac{v_{cp} \cdot \Gamma_{\text{эф}}}{\nu}$ от критерия проницаемости $K_{\Pi} = \frac{k}{h \cdot d}$ волокнистого материала				
$Re = \left[\frac{87,8404033}{(K_{\Pi} \cdot 10^{-7})^{2,4}} + 3,5678135 \cdot 10^{-3} \cdot (K_{\Pi} \cdot 10^{-7}) - 0,1318564 \right] \cdot 10^{-17}$		0,999	- 3,027	4,906
Зависимость технологического критерия $K_T = \frac{\Pi_{\Pi}}{\rho_B \cdot \delta}$ от структурного критерия $K_C = \frac{\xi \cdot d}{r_{\text{эф}}}$ волокнистого материала				
$K_T = 1,5368819 \cdot K_C^{-0,5} + 3,5294938 \cdot 10^{-9} \cdot K_C^{1,5} - 7,2155446 \cdot 10^{-3}$		0,996	- 9,759	8,263

Зависимость критерия проницаемости $K_{\Pi} = \frac{k}{h \cdot d}$ от структурного критерия $K_c = \frac{\xi \cdot d}{r_{\text{эф}}}$ волокнистого материала				
$K_{\Pi} = (15,3716709 \cdot K_c^{0,1} - 7,0963161 \cdot 10^5 \cdot K_c^{-3,5} - 18,2588699) \cdot 10^{-7}$		1,00	- 2,291	2,944

Результаты исследований дают возможность сделать выводы о том, что:

- предложенные критерии: технологический $K_T = \frac{\Pi_{\Pi}}{\rho_B \cdot \delta}$, структурный $K_c = \frac{\xi \cdot d}{r_{\text{эф}}}$,

проницаемости $K_{\Pi} = \frac{k}{h \cdot d}$, и Рейнольдса $Re = \frac{v_{\text{ср}}(h) \cdot r_{\text{эф}}}{\nu}$ всесторонне характеризуют нетканые полотна (за исключением клееных) с позиции взаимосвязи структурных, физических и технологических показателей. В частности, условный модуль упругости и, как следствие, разрывная нагрузка, могут быть вычислены с использованием технологического критерия по формулам:

$$E_{\text{НМ}} = E_B \cdot [1 - (1 - K_T)^{0,01065367}] \text{ и } R_{\text{НМ}} = 0,005 \cdot \delta \cdot E_B \cdot [1 - (1 - K_T)^{0,01065367}];$$

- численный анализ взаимосвязи критериев $Re(K_c)$, $Re(K_{\Pi})$, $K_T(K_c)$ и $K_{\Pi}(K_c)$ позволил установить наличие математических зависимостей в виде следующих критериальных уравнений:

$$Re = [196,5504927 \cdot (K_c)^{-1,115} - 2,018145 \cdot 10^{-13} \cdot (K_c)^{2,5} + 3,6390757 \cdot 10^{-3}] \cdot 10^{-17};$$

$$Re = \left[\frac{87,8404033}{(K_{\Pi} \cdot 10^{-7})^{2,4}} + 3,5678135 \cdot 10^{-3} \cdot (K_{\Pi} \cdot 10^{-7}) - 0,1318564 \right] \cdot 10^{-17};$$

$$K_T = 1,5368819 \cdot K_c^{-0,5} + 3,5294938 \cdot 10^{-9} \cdot K_c^{1,5} - 7,2155446 \cdot 10^{-3};$$

$$K_{\Pi} = (15,3716709 \cdot K_c^{0,1} - 7,0963161 \cdot 10^5 \cdot K_c^{-3,5} - 18,2588699) \cdot 10^{-7};$$

Представление нетканого материала как сплошной среды в совокупности с теорией подобия позволяет применять разработанные критерии для прогнозирования характеристик полотен на стадии их изготовления.

Например, используя феноменологический подход в [4] проводится аналитическое исследование изменения эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ от пористости ξ материала. В соответствии с физической сущностью процесса теплообмена в пористых средах зависимость $\lambda_{\text{эф}}(\xi)$ можно представить в виде:

$$\lambda_{\text{эф}}(\xi) = M \cdot \xi^N + Z \quad (1)$$

где: $\lambda_{\text{эф}}(\xi)$ – эффективного коэффициента теплопроводности, Вт / (м·К);

ξ – пористость нетканого полотна;

M, Z – постоянные коэффициенты;

N – показатель нелинейности функции.

Предельные значения $\lambda_{\text{эф}}(\xi)$ определяются из граничных условий:

$$\lambda_{\text{эф}}(\xi) = \lambda_B \text{ при } \xi = 0; \lambda_{\text{эф}}(\xi) = \lambda_{\text{воз}} \text{ при } \xi = 1,$$

где: λ_B – коэффициент теплопроводности полимера, из которого изготовлено волокно (мононить), Вт / (м·К);

$\lambda_{\text{воз}} = 0,02442$ – коэффициент теплопроводности воздуха при температуре $0 \div 10$ °С, давлении $1,01 \cdot 10^5$ Па и относительной влажности $60 \div 65$ %, Вт / (м·К);

С учетом принятых граничных условий, постоянные коэффициенты в уравнении (1) будут равны: $Z + M = \lambda_{\text{воз}}$ при $\xi = 1$; $Z = \lambda_B$ при $\xi = 0$.

Тогда: $\lambda_{эф}(\xi) = (\lambda_{воз} - \lambda_B) \cdot \xi^N + \lambda_B$ или $\xi^N = \frac{\lambda_{эф}(\xi) - \lambda_B}{\lambda_{воз} - \lambda_B}$. Отсюда: $N = \frac{\ln(\frac{\lambda_{эф}(\xi) - \lambda_B}{\lambda_{воз} - \lambda_B})}{\ln(\xi)}$

Для вычисления показателя нелинейности N использовались экспериментальные данные и технические характеристики нетканых материалов, выпускаемых на предприятиях: ООО «Термопол», ООО «Весь мир», ООО «Пинема», ООО «Сибур-Геотекстиль», ООО «Веротекс», изложенных в [6-9].

Анализ результатов расчета позволил установить наличие явно выраженных зависимостей $\lambda_{эф}(\xi)$, $N(\xi)$ и $\lambda_{эф}(\rho)$. Причем, если эффективный коэффициент теплопроводности с увеличением пористости снижается, то величины $\lambda_{эф}(\rho)$ и $N(\xi)$ существенно возрастают.

С целью определения математических выражений $\lambda_{эф}(\xi)$, $N(\xi)$ и $\lambda_{эф}(\rho)$, проведена аппроксимация расчетных значений при помощи программного комплекса Mathcad 15. В качестве граничных условий приняты следующие величины $\lambda_{эф}(\xi)$, $N(\xi)$ и $\lambda_{эф}(\rho)$:

- для полиэфирных волокон:

$\lambda_{эф}(\xi) = 0,149$ и $N(\xi) = 0,62824$ при $\xi = 0$; $\lambda_{эф}(\xi) = 0,02442$ и $N(\xi) = 8,02725$ при $\xi = 1$.

- для полипропиленовых волокон:

$\lambda_{эф}(\xi) = 0,169$ и $N(\xi) = 0,830812$ при $\xi = 0$; $\lambda_{эф}(\xi) = 0,02442$ и $N(\xi) = 10,013817$ при $\xi = 1$.

- независимо от вида волокон: $\lambda_{эф}(\rho) = 0$ при $\rho = 0$.

В результате получены уравнения, отражающие зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от вида волокон, пористости и объемной плотности нетканых полотен. Причем, для материалов, изготовленных из полиэфирного сырья, вычисление $\lambda_{эф}$ производится по формулам: $\lambda_{эф}(\xi) = -0,120295 \cdot \xi^{2,5} - 2,66946 \cdot 10^{-3} \cdot \xi^{0,5} + 0,149$ и $\lambda_{эф}(\rho) = 0,014033 \cdot \rho^{0,35} - 8,287732 \cdot 10^{-4} \cdot \rho^{0,75}$, а при использовании полипропиленовых волокон: $\lambda_{эф}(\xi) = -0,139048 \cdot \xi^{10} - 3,600934 \cdot 10^{-3} \cdot \xi^3 + 0,167$ и $\lambda_{эф}(\rho) = -0,010495 \cdot \rho^{1,05} + 0,014425 \cdot \rho$.

Можно, также отметить наличие функциональной взаимосвязи показателя степени N в уравнении $\lambda_{эф}(\xi) = M \cdot \xi^N + Z$ и пористости, которая для нетканых полотен, выработанных из полиэфирных волокон, имеет вид: $N(\xi) = 7,268794 \cdot \xi^{28,5} + 0,601726$ и полипропиленовых волокон: $N(\xi) = 11,159271 \cdot \xi^2 + 0,420431$.

Относительная погрешность расчетных значений по отношению к экспериментальным данным не превышает 6%.

Полученные формулы позволяют перейти к определению исследуемых характеристик, используя разработанные критерии подобия.

Выражая пористость через технологический критерий $\xi = (1 - K_T)$, полученные расчетные формулы для определения эффективного коэффициента теплопроводности запишутся:

- для полотен, изготовленных из полиэфирных волокон:

$$\lambda_{эф}(K_T) = -0,120295 \cdot (1 - K_T)^{2,5} - 2,66946 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - K_T)^{0,5} + 0,149$$

$$N(K_T) = 7,268794 \cdot (1 - K_T)^{28,5} + 0,601726$$

$$\lambda_{эф}(K_T) = 0,014033 \cdot (K_T \cdot \rho_B)^{0,35} - 8,287732 \cdot 10^{-4} \cdot (K_T \cdot \rho_B)^{0,75}$$

- для полотен, изготовленных из полипропиленовых волокон:

$$\lambda_{эф}(K_T) = -0,139048 \cdot (1 - K_T)^{10} - 3,600934 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - K_T)^3 + 0,167$$

$$N(K_T) = 11,159271 \cdot (1 - K_T)^2 + 0,420431$$

$$\lambda_{эф}(K_T) = -0,010495 \cdot (K_T \cdot \rho_B)^{1,05} + 0,014425 \cdot (K_T \cdot \rho_B)$$

Таким образом, применение разработанных критериев $K_T = \frac{\Pi_n \cdot 10^{-3}}{\rho_B \cdot \delta \cdot 10^{-3}} = \frac{\Pi_n}{\rho_B \cdot \delta} = (1 - \xi)$,

$K_c = \frac{\xi \cdot d}{r_{эф}}$ и $K_n = \frac{k}{h \cdot d}$ позволяет с достаточной для практических расчетов точностью

прогнозировать теплоизоляционные свойства нетканых материалов на стадии их изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В. А. Теория подобия и моделирования. — М.: Высшая школа, 1976. - 479 с.
2. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. 2-е изд. — М.: Высшая школа, 1973. — 296 с.
3. Электронный ресурс. – Режим доступа: [physicalsystems.org>index07.09.1.html](http://physicalsystems.org/index07.09.1.html)
4. Трещалин Ю.М. Анализ структуры и свойств нетканых материалов. М.: Издательство «БОС», 2016, 192 с.
5. Трещалин Ю.М. Композиционные материалы на основе нетканых полотен: монография. - М.: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2015.- 220 с.
6. Трещалина А. В. Совершенствование методов расчета и оценки свойств нетканых текстильных материалов теплоизоляционного назначения. Дисс. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Костром.гос. технол. ун-т].- Кострома, 2009.- 197 с.
7. Трещалин М.Ю., Киселев М.В., Мухамеджанов Г.К., Трещалина А.В. Проектирование, производство и методы оценки качества нетканых материалов (монография). - Кострома: Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2013. - 273 с.
8. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.wesmir.com/specifications>.
9. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://stroymat2000.ru/kategorii-tovarov/utepliteli-rulony-209/ uteplitel-shes-akustik-1200h600h 50mm-shelter-ekostroi-2828.html>

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