

УДК 677.064

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕНЕСЕННЯ ТЕПЛА
КРІЗЬ ТЕКСТИЛЬНИЙ МАТЕРІАЛ**

Л.С. ГАЛАВСЬКА

Київський національний університет технологій та дизайну

Стаття присвячена розробці математичної моделі кондуктивної складової ефективного коефіцієнта теплопровідності крізь елемент структури кулірного трикотажу - петлю

На сьогоднішній день трикотажні вироби широко використовуються в одязі побутового й спеціального призначення, а також у спеціальних технічних виробках. Відповідно до їх функціонального призначення, для забезпечення комфортних теплових відчуттів при експлуатації зазначений асортимент одягу повинен мати певний рівень теплозахисних властивостей. Зацікавленість матеріалознавців-текстильників теплозахисними властивостями трикотажних полотен пояснюється не лише суто гігієнічними аспектами виготовлення комфортного одягу, а й необхідністю вирішення проблем економічного характеру. Вирішення проблеми оптимізації теплозахисних властивостей одягу дозволяє раціонально використовувати сировину й відповідно заощаджувати енергоресурси. Теплозахисні властивості одягу у значній мірі визначаються теплофізичними характеристиками текстильних матеріалів, з яких виготовляється цей одяг. Визначальною теплофізичною характеристикою є теплопровідність. Теплозахисні властивості текстильного матеріалу оцінюють наступними показниками: тепловим опором, коефіцієнтами теплопередачі та теплопровідності. Теплоізоляційні властивості текстильних полотен залежать від їх гігроскопічності. Тепловий опір води досить низький, тому зі збільшення вологості текстильних полотен погіршуються їх теплоізоляційні властивості.

Сучасне трикотажне виробництво дозволяє виробляти полотна різноманітних переплетень із використанням різних видів сировини. Досягнення необхідного показника теплозахисних властивостей полотен забезпечується шляхом підбору пряд і структурних характеристик, що є трудомістким і дорогим завданням, оскільки необхідно виробляти партію пробних зразків різноманітних як за видом переплетення, так і видом сировини та проводити експериментальні дослідження. З іншого боку, розвиток комп'ютерних технологій знижує вартість чисельних експериментів і робить доступним проведення їх у виробничих умовах. Це у свою чергу дозволяє забезпечити виробництво трикотажних полотен з прогнозованим значенням ефективною теплопровідності.

Об'єкти та методи дослідження

Об'єктом досліджень є процес перенесення тепла крізь елемент структури кулірного трикотажу – петлю. У роботі використано теоретичний метод аналізу та синтезу.

Постановка завдання

Перенесення тепла крізь текстильний матеріал, що має волокнисту (неткані матеріали на основі волокнистих полотен) і сітчасту (тканини, трикотаж, неткані матеріали) структури, здійснюється трьома видами теплопередачі: теплопровідністю (кондукцією) твердої речовини волокон і молекул газу (повітря); конвекцією повітря в порах матеріалу; тепловим випромінюванням у порах і між волокнами й нитками матеріалу [1].

Тоді тепловий потік q , що пройшов крізь матеріал, визначається наступним чином:

$$q = q_{\text{конд}} + q_v + q_{\text{конв}} \quad (1)$$

де $q_{\text{конд}}$ – тепловий потік, що переданий кондукцією; q_v – тепловий потік, що переданий тепловим ви-

промінюванням; $q_{\text{конв}}$ – тепловий потік, що переданий конвекцією.

З рівняння Фур'є одержуємо вираз для розрахунку ефективного коефіцієнта теплопровідності матеріалу:

$$\lambda = \frac{q}{\Delta T} = \frac{q_{\text{конд}} + q_{\text{вип}} + q_{\text{конв}}}{\Delta T} = \frac{q_{\text{конд}}}{\Delta T} + \frac{q_{\text{вип}}}{\Delta T} + \frac{q_{\text{конв}}}{\Delta T} = \lambda_{\text{конд}} + \lambda_{\text{вип}} + \lambda_{\text{конв}} \quad (2)$$

де $\lambda_{\text{конд}}$, $\lambda_{\text{вип}}$, $\lambda_{\text{конв}}$ – кондуктивна, промениста й конвективна складові ефективного коефіцієнта теплопровідності відповідно, ΔT – перепад температур.

Величина складової кожного виду перенесення тепла крізь матеріали волокнисто-сітчастих структур залежить від теплофізичних характеристик волокон і повітря, перепаду температур, тиску повітря, виду поверхні матеріалу, ступеню чорноти й діаметру волокна, об'ємної частки волокон в матеріалі, пористості, середньої щільності матеріалу й ін.

Результати та їх обговорення

Кондуктивна складова $\lambda_{\text{конд}}$ ефективного коефіцієнта теплопровідності текстильного матеріалу λ складається з молекулярної теплопровідності повітряного компонента, що заповнює пори матеріалу, і теплопровідності твердого каркасу матеріалу (волокон, ниток чи пряжі). Теплопровідність повітря визначається [1] його температурою й тиском. Тиск впливає на теплопровідність повітря лише у тих випадках, коли його значення або занадто мале, або дуже велике [2, 6], при атмосферному тиску коефіцієнт теплопровідності газу, в основному, залежить лише від температури:

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \quad (3)$$

де λ_0 – коефіцієнт теплопровідності газу при $T_0 = 273\text{K}$, Вт/м·К; T – температура газу, К; n – показник ступеня (для повітря $n = 0,82$).

Оскільки текстильні матеріали для одягу й взуття експлуатуються при атмосферному тиску, величина якого змінюється в невеликих межах, то теплопровідність повітря в текстильному матеріалі визначається температурою повітря у відповідності до представленої вище залежності.

Теплопровідність твердого тіла λ (Вт/м·К) можна визначити з рівняння Фур'є:

$$\lambda = \frac{q \cdot h}{\Delta T} \quad (4)$$

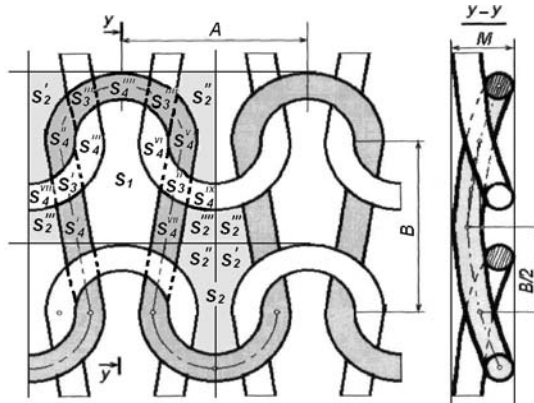
де q – питомий тепловий потік, Дж/м²·с; ΔT – перепад температури, К; h – товщина тіла, м.

Однак рівняння (4) описує перенесення тепла в однорідному плоскому тілі, у той час, коли текстильні матеріали мають більш складну будову. Із цієї причини кондуктивну складову $\lambda_{\text{конд}}$ ефективного коефіцієнта теплопровідності λ текстильних матеріалів необхідно розглядати, як результат взаємодії волокон і повітря у відповідності до структури матеріалу.

Трикотаж має чітко упорядковану структуру, елементом якої є петля. Доволі часто в теплотехнічних розрахунках приймаються найбільш прості моделі, що розглядають текстильний матеріал або як суцільну, однорідну пластину з постійними фізичними властивостями [3, 4], або у вигляді перфорованих екранів з різним ступенем перфорування, або у вигляді системи з упорядкованими елементами, де у якості нитки виступають брус-

ки прямокутного перетину [5, 6]. Але такі моделі не цілком адекватно описують будову реального текстильного матеріалу. Тим часом, структура трикотажу досить складна, вона характеризується певною сукупністю параметрів. До основних параметрів, що відбивають будову трикотажу, відносять: вид переплетення, петельний крок та висоту петельного ряду, товщину трикотажу, лінійну густину пряжі чи ниток, кількість петельних стовпчиків та рядів в 100 мм трикотажу, вид поверхні, показники заповнення волокнистою речовиною, пористість і т.і. [6]. Безсумнівно, теплопровідність трикотажу буде багато в чому визначатися взаємозв'язком її структурних характеристик. Однак урахувати вплив всіх параметрів будови відразу не представляється можливим у наслідок складності завдання. Тому обмежимося оцінкою впливу тільки основних параметрів будови трикотажу на його здатність проводити або втримувати тепло.

Розглянемо ділянку трикотажу головного кулірного переплетення гладь товщиною M . Вважаємо, що нитки у трикотажі мають поперечний переріз у вигляді кола. Діаметр нитки d . Виділимо на цій ділянці трикотажу елемент його структури – петлю загальною площею $S = A \cdot B$ (рис.). З метою визначення теплопровідності дану площу розіб'ємо на три зони: 1 – зона контакту ниток, площею S_k ; 2 – зона про-світів (наскрізних пор) площею S_n ; 3 – зона зв'язку ниток з повітрям, площею S_{3g} .



Структура кулірного трикотажу: A – пет. крок; B – висота пет. ряду; M – товщина

Розглянемо перенесення тепла кондукцією крізь елемент структури трикотажу – петлю. Кількість тепла Q , що пройшла крізь елемент структури, можна визначити наступним чином:

$$Q = \lambda_n \cdot S \cdot \tau \cdot \frac{\Delta T}{M} = \lambda_n \cdot S_k \cdot \tau \cdot \frac{\Delta T}{M} + \lambda_{нов} \cdot S_n \cdot \tau \cdot \frac{\Delta T}{M} + S_{3g} \cdot \tau \cdot \frac{\Delta T}{R_{3g}} \quad (5)$$

де λ_n – коефіцієнт теплопровідності елемента структури трикотажу – петлі; λ_n – коефіцієнт теплопровідності нитки чи пряжі; $\lambda_{нов}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря; S – площа петлі; S_k, S_n, S_{3g} – площі зони контакту, пор та зв'язку нитки з повітрям відповідно; τ – час; ΔT – перепад температури; M – товщина трикотажу; R_{3g} – тепловий опір зони зв'язку нитки з повітрям.

Тоді тепловий потік буде визначатися за наступною залежністю:

$$q = \frac{Q}{S \cdot \tau} = \lambda_n \cdot \frac{S_k}{S} \cdot \frac{\Delta T}{M} + \lambda_{нов} \cdot \frac{S_n}{S} \cdot \frac{\Delta T}{M} + \frac{S_{3g}}{S} \cdot \frac{\Delta T}{R_{3g}} = \lambda_n \cdot \frac{\Delta T}{M} \quad (6)$$

З даного співвідношення знаходимо вираз для визначення теплопровідності елемента структури трикотажу – петлі:

$$\lambda_n = \lambda_n \cdot \frac{S_k}{S} + \lambda_{нов} \cdot \frac{S_n}{S} + \frac{S_{36}}{S} \cdot \frac{M}{R_{36}} \quad (7)$$

Тепловий опір зон зв'язку нитки з повітрям можна виразити за допомогою рівняння складної стілки:

$$R_{36} = \frac{d_c}{\lambda_n} + \frac{M - d_c}{\lambda_{нов}} \quad (8)$$

де d_c – середній діаметр нитки.

Співвідношення $\frac{S_n}{S}$ є не що інше як пористість трикотажу R_S , яка визначається за наступною залежністю:

$$R_S = R_{S_1} + R_{S_2} = \frac{S_1}{A \cdot B} + \frac{S_2}{A \cdot B} = \frac{S_1 + S_2}{A \cdot B} \quad (9)$$

Площі виділених нами зон, а саме зони контакту ниток S_k , зони наскрізних пор S_n та зони зв'язку нитки з повітрям S_{36} , через які проходить тепловий потік, можуть бути визначені на підставі розгляду геометричної моделі структури трикотажу (рис.) наступним чином.

Загальна площа зони контакту ниток S_k у точках контакту петель на підставі геометричної моделі може бути визначена за наступною залежністю:

$$S_k = S_3' + S_3'' + S_3''' + S_3'''' \cong 4 \cdot d_c^2 \quad (10)$$

Загальна площа зони наскрізних пор S_n :

$$S_n = S_1 + S_2 \cong A \cdot B - (\ell \cdot d_c - 4 \cdot d_c^2) = A \cdot B - \ell \cdot d_c + 4 \cdot d_c^2 \quad (11)$$

де ℓ – довжина нитки в петлі; d_c – середній діаметр нитки

Загальна площа зон зв'язку нитки чи пляжі з повітрям S_{36} :

$$S_{36} = S_4^I + S_4^{II} + S_4^{III} + S_4^{IV} + S_4^V + S_4^{VI} + S_4^{VII} + S_4^{VIII} + S_4^{IX} \cong (\ell - 4 \cdot d_c) \cdot d_c = \ell \cdot d_c - 4 \cdot d_c^2 \quad (12)$$

Вище представлено формули для визначення наближених значень площ певних зон. Більш точні розрахунки даних площ дає використання тривимірного геометричного моделювання нитки в структурі трикотажу з урахуванням властивостей сировини.

Підставляючи вирази (8 – 12) в формулу (7), одержуємо вираз для визначення коефіцієнта теплопровідності трикотажу:

$$\lambda_n = \lambda_n \cdot \frac{4 \cdot d_c^2}{A \cdot B} + \lambda_{нов} \cdot R_S + \frac{\ell \cdot d_c - 4 \cdot d_c^2}{A \cdot B} \cdot \frac{M}{R_{36}} = \lambda_n \cdot \frac{4 \cdot d_c^2}{A \cdot B} + \lambda_{нов} \cdot \left(1 - \frac{\ell \cdot d_c - 4 \cdot d_c^2}{A \cdot B} \right) + \frac{(\ell \cdot d_c - 4 \cdot d_c^2) \cdot \lambda_n \cdot \lambda_{нов} \cdot M}{\lambda_{нов} \cdot d_c + \lambda_n \cdot (M - d_c)} \quad (13)$$

Наведена формула справедлива й для матеріалів із частково впорядкованими елементами, наприклад, трикотажне полотно з начосом. Але у випадку моделювання процесів теплопровідності трикотажного полотна з ворсовою поверхнею такий матеріал слід розглядати як комплексний, що складається із двох матеріалів з різними структурами: основа (трикотаж) і ворс (нетканий матеріал з хаотичним або впорядкованим розташуванням волокон). У такому випадку теплопровідність основи визначається за

формулою (13), а теплопровідність ворсової поверхні розраховується за формулами визначення теплопровідності нетканого матеріалу залежно від характеру орієнтації волокон (хаотичної чи впорядкованої).

Висновки

1. Для визначення кондуктивної складової ефективного коефіцієнта теплопровідності пропонується розбити елемент структури трикотажу на три зони: зону контакту ниток; зону наскрізних пор та зону зв'язку ниток з повітрям.
2. Запропоновано математичні залежності, що дозволяють наближено визначити розміри зазначених зон. Більш точно їх площі є можливість з'ясувати при наявності тривимірної геометричної моделі нитки в структурі кулірного трикотажу з урахуванням її властивостей, а саме жорсткості при згині, зминальності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа. – 1967. – 513с.
2. Чиркин В.С. Теплопроводность промышленных материалов. – М.: Машгиз. – 1952. – 172с.
3. Делль Р.А., Афанасьева Р.Ф., Чубарова З.С. Гигиена одежды. – М.: Легпромбытиздат. – 1991. – 160с.
4. Колесников П.А. Основы проектирования теплозащитной одежды. – М.: Легкая индустрия. – 1971. – 112 с.
5. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.Г. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – М.: Энергия. – 1974. – 214с.
6. Бессонова Н.Г. Разработка методов и исследование теплофизических свойств текстильных материалов и пакетов при действии влаги и давления: дис... канд. техн. наук: 05.19.01/ Бессонова Наталья Геннадиевна – М., 2005. – 151с.