

УДК 687.17:620.17

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛО- ТА ВОЛОГОПЕРЕНОСУ В ПАКЕТАХ ВЗУТТЄВИХ МАТЕРІАЛІВ

Н.П. Супрун, Г.В. Щуцька

Київський національний університет технологій та дизайну

В статті розглядаються питання моделювання процесів переносу вологи і тепла в пакетах матеріалів верху взуття в умовах градієнту вологості та температури

Ключові слова: перенос вологи, перенос тепла, фізична модель, мікрокліматичний простір.

Складність проектування та створення багатьох видів взуття полягає у необхідності одночасного забезпечення захисних та гігієнічних функцій. Забезпечення комфортного внутрішньовзуттєвого мікроклімату (відносна вологість $\phi=40-50\%$, температура 308 К) неможливе без урахування функціональних (заданих) особливостей взуття та умов оточуючого середовища, в якому воно експлуатується, а також встановлення середнього рівня рухової активності людини, що зумовлює інтенсивність тепло- та вологопродукції з поверхні стопи. Регулюючим фактором забезпечення комфортності є здатність сукупності усіх шарів пакетів деталей взуття відводити залишкову вологу із мікрокліматичного простору. Вирішальним для цього процесу ми вважаємо перепад температур на зовнішньому і внутрішнім боках пакету, а також зміна відносної вологості при переносі вологи через обране число шарів пакету.

Концепція утримання частини вологи матеріалами, що складаються з гігроскопічних волокон, була сформульована більш 60 років тому, але і дотепер ця проблема привертає увагу дослідників. Основна причина такого інтересу полягає в тому, що сорбція вологи в такій системі не тільки супроводжується виділенням теплоти, але і сприяє екрануванню мікрокліматичного простору від різких змін зовнішніх умов при переході, наприклад, від теплої, сухої погоди, до холодної і сирої. При зміні відносної вологості як навколишнього повітря, так і у мікрокліматичному просторі, гігроскопічні матеріали можуть абсорбувати або десорбувати вологу від, або, навпаки, до навколишнього середовища.

При виникненні градієнтів вологості та температури за рахунок різниці значень цих показників у мікрокліматі внутрішньовзуттєвого простору і у навколишньому середовищі, процеси вимушеної конвекції та вологопереносу регулюється здатністю

сукупності усіх шарів пакету відводити залишкову вологу. Вплив буферного ефекту, створюваного гігроскопічним матеріалом, на процес видалення вологи з мікрокліматичного простору і оцінка виникаючих при цьому теплових ефектів є важливою практичною і науковою проблемою, що обговорюється в науковій літературі з достатньо давнього часу.

Як правило, вивчення процесів переносу вологи через пористі матеріали різного волокнистого складу приводило до тривіального висновку про перевагу високої гігроскопічності для забезпечення комфортного самопочуття. Відповідно, в таких виробках створюється більш приємний мікроклімат і зберігається відчуття сухості шкіри. Проте, слід відзначити, що автори робіт [1-3], не знайшли істотної різниці між волокнами бавовни, з одного боку, і волокнами полієфіру і поліпропілену, з іншого, у впливі на такі фізіологічні параметри, як швидкість потіння, затримання води в поверхневому прошарку шкіри, температурі і вологості мікроклімату.

Постановка завдання

Неоднозначність висновків експериментальних робіт і їх залежність від умов досліду призводять до необхідності створення адекватних фізичних моделей. Спроможність цих моделей описати різноманітний вибір матеріалів (за показниками, насамперед, гігроскопічності і параметрів структури), а також прогнозувати будь-які зміни умов переносу вологи (маси) і тепла, на наш погляд, має визначатися використанням фундаментальних рівнянь зберігання (балансу) маси, внутрішньої енергії (тепла) і імпульсу (конвективний перенос); застосуванням реальних (підтверджених відповідними експериментами) початкових і граничних умов та наявністю коректних даних по коефіцієнтах переносу, отриманих дослідницьким шляхом, або за допомогою теоретичних оцінок.

Об'єкт та методи досліджень

Об'єктом дослідження в даній роботі було моделювання процесів переносу вологи і тепла через матеріали, які входять до пакету верху взуття.

Результати дослідження та їх обговорення

Як відомо, одним із основних параметрів, що характеризують ступінь комфортного стану стопи людини при експлуатації взуття, є значення відносної вологості повітря у внутрішньовзуттєвому просторі. Саме тому при виборі матеріалів для внутрішніх деталей взуття вологообмінні властивості вважаються одними з найбільш вагомих. Гідрофільні матеріали для взуття характеризуються наявністю в

структурі мікропор з розвиненою питомою поверхнею. В такій системі вологоперенос може здійснюватися різними способами: дифузій в газовій фазі, переносом в адсорбційному шарі (поверхнева дифузія, плівкова течія), в'язкою течією сконденсованої вологи під дією градієнту капілярного тиску.

Вологоємність як здатність накопичувати вологу при поверхневому контакті з мокрою (за рахунок виділення поту) поверхнею стопи можна віднести до основних гігієнічних характеристик матеріалів внутрішніх деталей взуття. Відомо, що за добу організм людини може виділяти на шкіряну поверхню тіла від 0,5 до 1 літру поту, при важкій фізичній праці – до 3-х літрів, причому значна частина потовиділення проходить саме в області стопи.

У взуттєвих виробках використовується велика кількість матеріалів, ламінованих напівпроникними мембранними плівками. Цим блокується зовнішнє проникнення води, але проходить конденсація водяних парів, які випаровуються із внутрішньовзуттєвого простору. Сконденсована волога у вигляді крапель води може або стікати по поверхні матеріалу, якщо він гідрофобний, або сорбуватися матеріалом, якщо він гідрофільний. Все це викликає значні відмінності в описанні процесів тепловологопереносу, що потребує їх теоретичного розгляду та обґрунтування відповідних рекомендацій щодо комфортності.

Розберемо основні положення запропонованою нами моделі переносу вологи і тепла через гігроскопічне середовище (внутрішньовзуттєвого мікрокліматичного прошарку і пакету верху взуття). На рис.1 показана схема початкових і граничних умов в моделі тепломасопереносу. За початкові умови приймаємо: $T_0(t_i=0)$, $C_0(C_i=0)$ – температура [K] та абсолютна вологість [кг/м³] поверхневого шару шкіри у початковий момент часу t_i , що вимірюється в секундах [с]. Відповідні значення $T_{0i}=(273+33)=306\text{K}$, $\varphi_{0i}=(C_{0i}/C_{max})100=35\%$, взяті із узагальнених даних досліджень по гігієнічним властивостям взуття. Інші початкові умови, які, як правило, приймаються при обговоренні таких процесів T_0 – температура на зовнішній площині поверхні пакету взуття, яка дорівнює температурі навколишнього середовища, та його абсолютна вологість c_0 . Однак, на нашу думку, реальні значення початкових температур поверхні верху взуття і її вологості: $T_1 = T_{1i}(t_i = 0), C_1 = C_{1i}(t_i = 0)$ можуть помітно відрізнятися від відповідних характеристик повітря T_n, C_n , внаслідок близькості ще одного (додатково до повітря) «резервуару» – джерела тепла і вологи – поверхні шкіри людини.

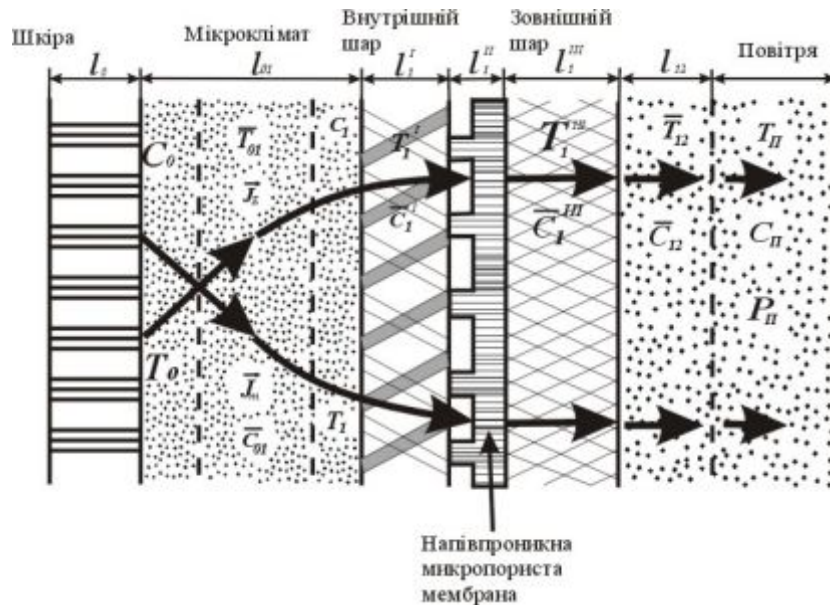


Рис.1. Умовна схема тепло-масообміну у пакеті верху взуття, до складу якого входить напівпроникна пориста мембрана

Послідовність ланцюгу стрілок на рис.1, що показують напрямок взаємодіючих (і тому перехрещуючихся на рис.1 в області мікроклімату внутрішньовзуттєвого простору l_{01}) щільностей потоків тепла (\bar{j}_E) і маси (\bar{j}_m) вздовж позитивного напрямку осі x є не зовсім бажаними. Структура пакету (з плівкою-мембраною, або без неї) повинна служити у якості ефективної ємності для вологи, яку виділяє стопа людини в активний період. В той же час, вона не повинна бути суттєвим джерелом тепла, яке виділяється при сорбції, оскільки у цьому випадку можливим є швидке перегрівання організму. Організація напрямів щільностей потоків (\bar{j}_E) і (\bar{j}_m) та їх значень, яка вирішує перераховані завдання, потребує при створенні взуття раціонального вибору матеріалів пакетів.

Як справедливо відзначалося [4, 5], процеси вологопереносу не можуть бути реалістично описаними у відсутності градієнту температури. Для текстильних матеріалів, ламінованих напівпроникними мембранними плівками, таких досліджень небагато. Врахування реальної динаміки процесу виходу на стаціонарний режим тепломасообміну в умовах рухової активності людини або відпочинку, повинно призводити, на нашу думку, до швидкого вирівнювання температур внутрішньої і зовнішньої поверхонь пакету, просочених невеличкою кількістю вологи, абсорбованої із внутрішньовзуттєвого простору або із навколишнього середовища. Інакше кажучи, нами, на відміну від думки ряду авторів, які займалися побудовою моделей переносу тепла і вологи через пористі матеріали, передбачається, що визначальний вплив на процеси переносу тепла, у цілому,

забезпечує наявність градієнтів температури в прошарку вологого повітря внутрішньовзуттєвого простору l_{01} : $(T_1 - T_0) / l_{01}$ (див. рис.1), а також у прошарку повітря l_{12} , який примикає до зовнішньої поверхні пакету: $(T_n - T_1) / l_{12}$. В більшості існуючих теоретичних моделей для стаціонарного режиму експлуатації взуття зовнішній температурний градієнт узагалі не розглядається, або, якщо розглядається, то без конкретизації товщини прошарку повітря, де він є дуже істотним.

В нашій моделі значення T вважається перемінним, таким, що змінюється в повітряних прошарках l_{01} і l_{12} , але таким, що зберігає своє значення T_1 у шарі матеріалу верху. Непрямо на користь такої концепції свідчать більш висока, у порівнянні з вологим повітрям, теплопровідність вологої шкіри (що сприяє швидкому вирівнюванню її внутрішньої температури до деякого значення: $T_1(t)$ у кожний із моментів часу) і виділення теплоти сорбції при конденсації вологої пари у її волокнах (що призводить до аналогічної тенденції). У будь-якому випадку, матеріал товщиною l_1 , у цілому, можна вважати нестационарним джерелом тепла і вологи для прошарків повітря l_{01} і l_{12} , які примикають до нього з внутрішньої і зовнішньої сторін (рис.1).

Наявність вимушеної конвекції у внутрішньовзуттєвому просторі l_{01} , який відокремлює зовнішній шар шкіри l_0 від шару l_1 в нашій моделі не враховується. Відомо, що присутність у моделі переносу вологи і тепла змущеної конвекції визначається існуванням градієнту тиску. Даний градієнт, очевидно, відсутній у мікрокліматичній зоні l_{01} , де тиск P_{01} або постійний, або відчуває незначні коливання при проникненні через пакет вітру. З іншого боку, присутність градієнту тиску і, відповідно, вимушеної конвекції через шар l_1 : $(P_{12} - P_{01}) / l_{12}$, є цілком вірогідним. Зауважимо, що тиск P_{12} (як і температура T_1), що діє на зовнішню поверхню пакету, у цілому, дещо відрізняється від тиску P_n (і температури T_n) навколишнього середовища.

Сказане вище означає, що основними механізмами переносу вологи в повітряних прошарках l_{01} і l_{12} , є, на наш погляд, дифузія, яка обумовлена градієнтами концентрації: $(C_1 - C_0) / l_{01}$ і $(C_n - \bar{C}_{12}) / l_{12}$, а також термодифузія, пов'язана з зазначеними раніше градієнтами температури: $(T_1 - T_0) / l_{01}$ і $(T_n - T_1) / l_{12}$, відповідно. Тут \bar{C}_{12} дорівнює середній концентрації вологи в повітрі для зовнішнього прошарку l_{12} .

Звичайно, при рішенні даної задачі не можна виключати також чинники, що впливають на характеристики та процеси в цьому ж прошарку, такі, як радіація (від

зовнішніх джерел), природна і вимушена конвекція, обумовлені швидкістю вітру u_B , а також руховою активністю людини. Перенос теплоти в повітряних прошарках l_{01} і l_{12} здійснюється за рахунок механізму теплопровідності через вологе повітря, яке, відповідно до концепції, що викладається нами (див. рис.1), має певні середні характеристики відносної вологості: $\bar{\varphi}_{01} = \bar{C}_{01} \cdot 100\% / C_{max}$, $\bar{\varphi}_{12} = \bar{C}_{12} \cdot 100\% / C_{max}$. Природно, що забезпечення комфортних відчуттів при експлуатації взуття за рахунок підтримки таких середніх характеристик макроклімату, як температура \bar{T}_{01} і відносна вологість $\bar{\varphi}_{01}$ у деяких заданих (оптимальних) інтервалах також є актуальним при виборі складу пакетів верху.

У контексті даної проблеми плідним представляється обговорення і порівняння двох видів початкових і граничних умов для зони мікроклімату і для шару матеріалу верху. Зберігаючи позитивний напрямок осі x (від поверхні шкіри до навколишнього середовища), для зони мікроклімату у термінах даної роботи можна записати:

$$j_m = \gamma_{01}(C_0 - C_1) / l_{01} + l_0(\partial C_0 / \partial t) \quad (1)$$

$$j_E = \lambda_{01}(T_0 - T_1) / l_{01} + l_0(C_v^0 \cdot C_0)(\partial T_0 / \partial t) \quad (2)$$

і для шару матеріалу верху:

$$\gamma_1 \varepsilon (\partial C / \partial x) \Big|_{x=l_1} = -\gamma_n (\bar{C}_{12} - C_n) / l_{12}, (x \in l_1) \quad (3)$$

$$\lambda_1 (\partial T / \partial x) \Big|_{x=l_1} = -\lambda_n (T_1 - T_n) / l_{12} (x \in l_1) \quad (4)$$

Вище прийняті стандартні для теорії тепломасообміну позначення: j_m [кг/м²с], j_E [І/м²с] - щільностей потоків, відповідно, вологи (маси) і тепла (внутрішньої енергії) з поверхні шкіри; γ_{01} [м²/с], λ_{01} [І/мсК] – коефіцієнти молекулярних механізмів переносу, тобто дифузії і теплопровідності через повітряний прошарок l_{01} , а γ_1 , λ_1 – через шар матеріалу верху l_1 ; γ_n , λ_n – через прошарок l_{12} оточуючого середовища, відповідно. $(C_v^0 \cdot C_0)$ – добуток питомої ізохорної теплоємності C_v^0 [І/кг К] на концентрацію вологи C_0 [кг/м³] у поверхневому шарі шкіри l_0 ; ε – пористість матеріалу верху. Слід відзначити, що параметр пористості ε потребує уточнення, якщо досліджується процес протікання вологого повітря і рідини в мезопорах, і процес накопичення вологи з виділенням теплоти сорбції в мікропорах, що супроводжує його.

Розробка методики надійного виміру l_1 (товщини матеріалу верху) при змінах температури T_1 і середньої відносної вологості φ_1 , є дуже актуальною в проблемі

оптимізації властивостей взуття і буде докладно досліджуватися нами у подальших роботах. Сказане відноситься і до задачі теоретичної оцінки розмірів l_{01} і l_{12} , які навряд чи можна визначити дослідним шляхом. Водночас, намічений вище шлях відповідає всім трьом умовам адекватності фізичних моделей, що описують процеси тепло-масопереносу – зберігання (балансу) маси, внутрішньої енергії (тепла) і імпульсу (конвективний перенос).

Чергування декількох шарів матеріалів верху $l_1^I, l_1^{II}, l_1^{III} \dots$ і прошарків вологого (або майже сухого) повітря між ними повинно, з очевидністю, збільшувати в стаціонарних (не активних) умовах термічний опір ефективного шару $l_1^{ef} : R_1^{ef} = 1 / \lambda_1^{ef}$, у той же час, зменшувати його спроможність відводити вологу з зони мікрокліматичного простору l_{01} у зовнішнє навколишнє середовище l_{12} .

Напівпроникна пориста мембрана, при різних варіантах її розташування, може бути ефективною ємністю для вологи, що виділяється тілом людини в активний період експлуатації взуття. В той же час, вона не повинна бути суттєвим джерелом тепла, яке виділяється при сорбції, оскільки у такому випадку можливим є швидке перегрівання організму людини. Організація напрямків щільностей потоків \vec{j}_E, \vec{j}_m та їх величин, яка вирішує завдання створення комфортного взуття, потребує певних змін в структурі пакетів, що буде розглядатися нами у подальших роботах.

Висновки

Запропоновано фізичну модель, за допомогою якої можна описати процеси переносу вологи і тепла в пакетах матеріалів верху взуття при наявності градієнтів вологості та температури.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Holcombe, Y. Li, B.V. Moisture Buffering Behavior of Hygroscopic Fabric During Wear. / Y. Li, B.V. Holcombe, F. Apar Text. Res.J. 62 (11), 619-627 (1992).
2. Behmann F.W. Influence of the Sorption Properties of Clothing on Sweat Loss and the Subjective Feeling of Sweating, Appl. Polym. Symp. №18, 1477-1482 (1971).
3. Wehner J.A. Dynamics of Water Vapor Transmission Through Fabric Barriers, / Wehner J.A. Miller B., Rebenfeld L, Tex Res, Journal. 58, 581-592 (1988).
4. Matsudaira M. The Effect of a Grooved Hollow in a Fibre on Fabric Moisture- and Heat-transport Properties. / Matsudaira M., Kondo Y J. Text. Inst. – 1996. – V.87. P. 409-416.

5. Moisture Vapor Transport Through Waterproof Breathable Fabrics and Clothing Systems Under a temperature Gradient. [Gretton J.C., D.B. Brook, Dyson H.M, Harlock S.C.] Textile Res. J. 1996. – V 68. P. 936-941.

Н.П. Супрун, А.В. Шуцкая

Моделирование тепло- влагопереноса в пакетах обувных материалов.

В статье рассматриваются вопросы моделирования процессов переноса влаги и тепла в пакетах материалов верха обуви в условиях градиента влажности и температуры.

Ключевые слова: перенос влаги, перенос тепла, физическая модель, микроклиматическое пространство.

N.P. Suprun, A.V. Shutsкая

Simulation of heat and moisture transport through packet of materials for shoes.

In the article the questions of modeling of moisture and heat transport in packages of shoes in conditions of gradient of moisture and temperature are considered.

Key words: moisture transport, heat transport, physical model, microclimate environment.