ISSN 2078-6441. Вісник Львівського університету. Серія географічна. 2013. Випуск 42. С. 179–195.
Visnyk of the Lviv University. Series Geography. 2013. Issue 42. P. 179–195.

УДК 911.2:551.586

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ОЦІНКИ ВІТРОПРОНИКНОСТІ ОДЯГУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ ТІЛА ЛЮДИНИ

Сергій Ковальчук

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки,
вул. Потапова, 9, каб. 601 (корпус С № 2), 43025, м. Луцьк, Україна,
e-mail: geographical@univer.lutsk.ua

Сьогодні нема точної методики визначення теплового балансу тіла людини, особливо з урахуванням вітропроникності одягу. Розроблено алгоритми оцінки швидкості потоку повітря в кільцевому каналі, індукованого силою аеродинамічного опору. Методика ґрунтується на визначенні гідравлічного опору стінки одягу та опису відповідних нелінійних ефектів у кільцевому каналі за допомогою ітераційних рівнянь. Загальний гідравлічний опір стінки одягу отримано внаслідок обчислення місцевих гідравлічних опорів з урахуванням їхнього взаємного впливу та опору шарів тканини з коридорним чи шаховим порядком розміщення шарів.

Ключові слова: гідравлічний опір, біокліматичний індекс, вітропроникність одягу, ітераційне рівняння, тепловий баланс тіла людини.

Розвиток рекреаційної галузі, зміна кліматичних умов, збільшення частоти повторюваності екстремальних погодних умов, повсюдне поширення портативних обчислювальних пристроїв і сенсорів сприяють тому, що виникла потреба (і можливість) в обчисленні біокліматичної комфортності в режимі реального часу.

Є різноманітні індекси, за допомогою яких оцінюють та картографують біокліматичну комфортність території. Найбільш коректними є індекси, що ґрунтуються на обчисленні теплового балансу тіла людини загалом та окремих його частин (відкрита поверхня шкіри та внутрішня поверхня легень), що безпосередньо контактують із повітрям зовнішнього середовища. Адже коли відомий тепловий баланс тіла, то можна передбачити, через який проміжок часу виникне загроза переохолодження, теплового чи сонячного удару, обмороження шкіри чи слизової оболонки органів дихання. Урахування впливу вітру на тепловий баланс тіла людини досить складне, адже оцінка вітропроникності одягу не є загальнопоширеною практикою на виробництві. Визначення вітропроникності одягу не зводиться до визначення повітропроникності шматка тканини (20 см^2) для вузького діапазону динамічного тиску (найчастіше це лише одне значення – 50 Па), що повсюди використовують у лабораторіях підприємств для оцінки (і стандартизації) властивостей тканин та одягу [4, с. 2; 6, с. 226]. Відповідно, виникла необхідність розглянути загальні особливості проходження повітря через одяг.

Сучасна географічна наука для опису гідрометеорологічних умов та клімату території через призму оцінки відчуттів людини (головно, відчуттів пов’язаних з температурою) для їхнього подальшого оцінювання застосовує цілий комплекс індексів біокліматичної комфортності. Основна частина індексів описує окремі параметри гідрометеорологічних умов середовища: температуру, тиск, вологість, швидкість вітру, їхні комбінації, порівняно із відчуттями людини, що перебуває у певних фіксованих умовах (під час штилю, у стані спокою, без одягу, в тіні тощо) [8, с. 2–12]. З огляду на певну неадекватність отриманих результатів розроблено індекси вітрового охолодження Хілла та суворості погоди Бодмана, щоб описати ймовірність обмороження, що призвело до появи логічного парадоксу: в умовах комфортного теплового балансу та будь-якої теплопродуктивності організму може відбутися обмороження відкритих частин тіла за певної комбінації температури, вологості повітря та швидкості вітру [1, с. 78]; якщо строго дотримуватися фізичної термінології, то переохолодження виникає тоді, коли локальний тепловий баланс відкритої частини тіла набув від'ємного значення, що через деякий проміжок часу спричинило охолодження поверхні тіла до температури нижче 0° С. Отже, виникла деяка неточність у термінології опису біокліматичної комфортності, адже необхідно розрізняти (і, відповідно, обчислювати) загальний тепловий баланс тіла людини (його назвали тепловий комфорт), так і його окремих частин. У процесі подальшого наукового пошуку з'явилася частина методик оцінки біокліматичної комфортності, виробничого мікроклімату та оцінки умов життєдіяльності на окремих територіях, які стали враховувати приблизний тепловий баланс. Частина з них не враховує наявності одягу на тілі людини, інші обмежені визначенням теплового опору типового одягу. Всі отримані значення індексів біокліматичної комфортності переводять у бали. Застосування бальних шкал з невеликим діапазоном значень зменшує їхню практичну цінність, оскільки поняття комфорту, субкомфорту тощо для конкретної людини не має значної інформаційної цінності (для 5 % людей зона комфорту є зоною дискомфорту) [3, с. 534]. На нашу думку, основним індексом біокліматичної комфортності (окрім індексів патогенності) повинен бути абсолютний показник теплового балансу, адже він дає змогу врахувати індивідуальні параметри організму, його активність, стан здоров'я (у тій частині, що пов'язана з інтенсивністю метаболізму) та одяг і забезпечує можливість точного прогнозування часу виникнення екстремального стану організму.

Наша мета – розглянути основні елементи математичного апарату для опису процесів проходження повітря через одяг під дією аеродинамічного тиску вітрового потоку для уточнення алгоритму оцінки теплового балансу тіла людини. Завдання наші такі: 1) визначити основний понятійний апарат, що використовують для опису потоків повітря у системі людина–одяг за умов дії вітру; 2) розробити методику оцінки гідродинамічного опору для одно- і багатошарового одягу; 3) розглянути рівняння для врахування нелінійних ефектів надходження повітря в кільцевому каналі; 4) розробити алгоритм для оцінки швидкості потоку повітря в кільцевому каналі; 5) визначити проблеми та перспективи подальших досліджень.

У ході дослідження ми використовували такі джерела: довідники, підручники і збірники лекцій з гідродинаміки та теплотехніки, автореферати дисертацій у галузі біокліматології, публікації у збірниках університетів (гідродинаміка та оцінка теплопередавання в умовах прояву вимушеної конвекції), власні теоретичні дослідження. Під час підготовки публікації використовували такі методи дослідження: кореляційний аналіз, ітераційний (метод Ньютона), зворотного інжинірингу (редукційний аналіз).

Оскільки, повний опис усіх чинників, що визначає теплопродуктивність організму та його тепловтрату, є досить громіздким, адже одночасно діє багато складових, які нелінійно між собою пов'язані, то ми розглянемо лише окрему складову – вплив вітропроникності одягу на швидкість теплопередавання, а саме: на швидкість руху повітря у кільцевому каналі (просторі) між поверхнею одягу та поверхнею тіла (чи одягу, що щільно прилягає до поверхні тіла).

Для спрощення обчислення вітропроникності одягу застосуємо обмеження за дискретизацією часу, тобто оберемо певний тривалий проміжок часу, протягом якого нівелюється вплив флуктуацій (період не більше однієї хвилини для людини, яка пересувається). Отриманий після процедури дискретизації проміжок часу називають часом релаксації. Час релаксації (квант часу) – проміжок часу (який для розрахунків можна вважати неподільним), протягом якого відбувається релаксація (справжня (фактична) чи умовна (на вибір дослідника залежно від мети і необхідної точності розрахунків)) системи, тобто впливу минулого стану системи на її динаміку не відбувається (або практично не простежується). Уважають, що протягом часу релаксації властивості системи не змінюються.

Оскільки будь-який легкий одяг сприяє виникненню гідродинамічного опору, то швидкість потоку повітря, що пройшов через товщу одягу, менша, ніж швидкість вітру. Припустимо, що людина перебуває у вертикальному положенні, вектор потоку повітря має горизонтальний напрям (вертикальний кут атаки дорівнює 0°). Джерелом рушійної сили для повітря у товщі одягу є аеродинамічний тиск (детального алгоритму його обчислення тут не розглядаємо); як з'ясуємо дещо пізніше, це швидше різниця між аеродинамічним і внутрішнім тиском у кільцевому каналі (виявляється нелінійний ефект – негативний зворотний зв'язок: чим більший внутрішній тиск, тим менше повітря надходить у кільцевий канал). Кінцева швидкість потоку повітря у кільцевому каналі є основним шуканим параметром, адже від його відносного значення залежить подальший вибір субалгоритму обчислення теплообміну: як теплообмін в умовах вільної (вертикальний напрям потоку) чи вимушеної (горизонтальний чи вертикальний напрям потоку) конвекції у замкненому, відкритому чи напіввідкритому кільцевому каналі. Можливі такі варіанти розвитку ситуації: 1) вітер штормової сили, одяг щільний, жорсткий, виявляється незначна деформація: у цьому випадку, одяг притискається до поверхні тіла, що призводить до появи ще одного шару з тепловим опором на поверхні тіла, відповідно, розраховують лише вимушену конвекцію на зовнішній поверхні одягу; 2) вітер штормової сили, одяг не жорсткий, виявляється значна деформація (ефект надування, не враховуємо пульсації швидкості вітру): повітря проникає у кільцевий канал, підвищуючи внутрішній тиск, надлишковий тиск у відкритому каналі сприяє виходу повітря через верхній і нижній поперечні перерізи, у напіввідкритому – лише через один переріз, у закритому – тиск наростає до такого рівня, коли усталюється динамічна рівновага і повітря виходить через протилежну стінку одягу. Отже, для випадку 1 швидкість вітру і швидкість потоку повітря однакові, у випадку 2 – швидкість вітру більша, ніж швидкість потоку повітря, у цьому разі вектор потоку повітря може бути і горизонтальним, і вертикальним залежно від типу кільцевого каналу.

Стінка (чи товща) одягу може складатися з одного чи декількох шарів тканини (композитні матеріали тут не розглядаємо). Повітря проходить через невеликі трубчаті канали (отвори між нитками основи та утоку) круглого чи квадратного перерізу. Шари тканини можуть розміщуватися у коридорному чи шаховому порядку. Розміщення у коридорному порядку сприяє формуванню проникних каналів різного поперечного перерізу. Оскільки довжина ділянки стабілізації потоку значно перевищує довжину каналу (стабілізація відбувається приблизно за довжини каналу, що у 50 разів більша від його ширини [5, с. 1]), то опором одиничного каналу можна знехтувати. Отже, єдиним (чи основним) способом отримати наближений результат є застосування аналогії розміщення трубних пучків. Місцевий гідравлічний опір визначатимуть як коефіцієнт опору для потоку, що надходить з необмеженої камери у вузький канал. У гідродинаміці виділяють декілька варіантів входу (у трубчатий канал): у трубу із виступом (чи без виступу), перфоровану пластину чи сітку, для раптового звуження каналу, у трубу із фаскою – ці варіанти, крім останнього, є взаємопов'язаними і вироджуються одне в одного у разі обчислення коефіцієнта місцевого гідравлічного опору, тоді як труба із фаскою в разі сполучення їх між собою найліпше відповідають поверхні тканини, де канали між нитками круглого перерізу складені самими нитками, а їхня вхідна і вихідна частини плавно переходять одна в одну. Значення коефіцієнта опору труби з фаскою залежить від внутрішнього діаметра каналу, відносних розмірів товщини фаски та кута її розкриття (табл. 1).

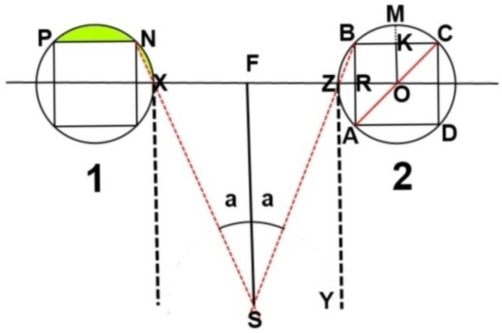
Таблиця 1

Коефіцієнт місцевого гідравлічного опору труби з фаскою [7, с. 92]

$\frac{BR}{XFZ}$	**β, град**								
	0	**10**	**20**	**30**	**40**	**60**	**100**	**140**	**180**
0,025	0,50	0,47	0,45	0,43	0,41	0,40	0,42	0,45	0,50
0,050	0,50	0,45	0,41	0,36	0,33	0,30	0,35	0,42	0,50
0,075	0,50	0,42	0,35	0,30	0,26	0,23	0,30	0,40	0,50
0,1	0,50	0,39	0,32	0,25	0,22	0,18	0,27	0,38	0,50
0,15	0,50	0,37	0,27	0,20	0,16	0,15	0,26	0,37	0,50
0,60	0,50	0,27	0,18	0,13	0,11	0,12	0,23	0,26	0,50

Якщо товщина фаски дорівнює нулю, то коефіцієнт опору становить 0,5.

Для визначення кута розкриття необхідно застосувати основні частини одиничного умовного каналу, вони зображені на рисунку. Очевидно, що для дотримання умов формування круглої фаски необхідне розміщення каналів (відповідно, і ниток) у квадратному пакуванні.



Визначення кута розкриття фаски

На рисунку показано поперечні перерізи двох сусідніх ниток *1* і *2*, нитки вважають ідеально круглими, відрізок XFZ – це ширина каналу (і одночасно його середній діаметр), шуканий кут розкриття фаски $\beta = 2\alpha$. Частини кола між хордами PN і NX та відповідними їм дугами, зафарбовані на рисунку, вважають умовно прямими, тобто загальна буквена формула вертикального перерізу каналу і фаски PNXFZBKC. Прямі лінії $FS \parallel BR$, тоді лінія SB перетинає їх під кутом 90°–*a*. Отже, кут

$\angle$BZR=$\angle$FZS=90°–*a*. Обчислити його можна через тангенс. За визначенням, тангенс кута – це відношення довжини протилежного катета до довжини прилеглого катета. Відповідно, $\mathrm{tg}\angle BZR = \frac{BR}{ZR}$, або $\angle BZR = \mathrm{tg}^{-1}\frac{BR}{ZR}$. Отже, $\angle\beta = 2(90 - \angle BZR)$. Відрізок BR = 0,5BA, OZ = r, ZR = OZ–OR = r–0,5BC = r–BR. Радіус кола, описаного навколо квадрата, r = 1, довжина діагоналі квадрата AC = 2r, згідно з теоремою Піфагора про прямокутний трикутник, $BA^2+BC^2 = AC^2=4r^2$, відповідно, $BA^2 = 2r^2$, тому $BA = r\sqrt[2]{2}$. Тоді відрізок $BR = \frac{BA}{2} = \frac{r\sqrt[2]{2}}{2} = \frac{r\sqrt[2]{2}}{\sqrt[2]{2}\times\sqrt[2]{2}} = \frac{r}{\sqrt[2]{2}} \approx 0{,}707r$, звідси $ZR = r - \frac{r}{\sqrt[2]{2}} \approx r - 0{,}707r = 0{,}293r$.

Отже, $\angle\beta = 2(90° - \angle BZR) = 180° - 2\mathrm{tg}^{-1}\frac{BR}{ZR} = 180° - 2\mathrm{tg}^{-1}\frac{0{,}707}{0{,}293} = 180° - 134{,}979° \approx 45°$. Якщо застосувати уточнення, що схил фаски не ZB, а ZM, то кут $\angle\beta = 180° - 2\mathrm{tg}^{-1}1 = 180° - 90° = 90°$. Абсолютна товщина схилу фаски дорівнює довжині відрізка BR ≈ 0,707r (для 45°) до 1r (для 90°). Відносну товщину схилу фаски визначають як $\frac{BR}{XFZ}$, згідно з рисунком. Оскільки товщину схилу фаски визначають у радіусах нитки, то абсолютний діаметр каналу теж ліпше визначати в радіусах нитки.

Іншим способом обчислення місцевого гідравлічного опору є визначення коефіцієнта опору перфорованої пластини – сітки (аналог поверхні нещільної одношарової тканини), його обчислюють подібно як і опір діафрагми з отвором, необхідно лише, щоб сумарна площа отворів перфорованої пластини дорівнювала площі отвору діафрагми [7, с. 92] (S_0 – площа отворів, S – загальна площа перерізу каналу):

$$\zeta = \left(1 + 0{,}707\sqrt{1 - \frac{S_0}{S}} - \frac{S_0}{S}\right)^2 \left(\frac{S_0}{S}\right)^2.$$

Для тих випадків, коли ширина каналу значно більша (у 3,5 раза чи більше) від радіуса нитки (чи половини її ширини для плоскої форми), необхідно застосувати формулу для діафрагми. Це можна довести так: у випадку квадратного пакування (а це стандартне розміщення ниток у тканині) площа елементарної комірки (переріз каналу) дорівнює квадрату суми ширини каналу (Nr = D) та двох радіусів нитки (тобто товщина стінок, що належать каналу) ($S_{кв} = (Nr+2r)^2$), тоді беремо ширину каналу, яка дорівнює 3 і 3,5 та 4 радіуси. Оскільки ширина отвору – це одночасно і його діаметр, то його площа дорівнює $0{,}7854\times D^2$ ($S_{отв} = 0{,}7854(Nr)^2$) або $0{,}7854\times(3 \text{ і } 3{,}5, \text{ і } 4{,}0)^2$. Отриманий результат підставляємо у формулу для діафрагми, коефіцієнти, відповідно, становлять 0,1386, 0,1620, 0,1817. Порівнюємо їх із коефіцієнтами для труби з фаскою (максимальна відносна товщина фаски для всіх випадків становитиме 0,707/3=0,2357 (мінімальна – 0,1767), тобто ближче до табличного значення 0,15), які становлять (за кута розкриття 40 і 60 градусів, різниці табличних значень для цих кутів практично нема) для обох випадків ширини каналу (3 і 3,5) – 0,16–0,15. Отже, можна стверджувати, що для застосування рівняння залежності опору діафрагми з отвором необхідною умовою є ширина каналу понад 3,5 радіуса нитки (адже за меншої ширини каналу опір, отриманий за формулою для діафрагми, більший, ніж для труби з фаскою).

Зазначимо, що застосування як показника опору сітки не передбачає виділення місцевого опору для входу і виходу потоку (для одношарових тканин).

У разі виходу потоку з каналу (ми розглядаємо кожний канал як окремий) теж виникає місцевий опір виходу. Труба з фаскою в цьому випадку є дифузором з уже відомим кутом розходження. Тільки в цьому разі площею потоку вважають площу отвору і площу квадратного пакування. Формула для обчислення має такий вигляд: $\zeta = \alpha\varphi_D\left(1-\frac{S_1}{S_2}\right)^2 = \alpha\varphi_D\left(1-\frac{0{,}7854(Nr)^2}{(Nr+2r)^2}\right)^2$, де φ_D – допоміжний коефіцієнт, значення якого наведені у табл. 2; α – коефіцієнт кінетичної енергії (використовують як уточнювальний коефіцієнт до формули Вейсбаха), що залежить від нерівномірності поля швидкостей у живому перерізі, тобто від режиму течії рідини: для ламінарної течії $\alpha = 2$, для турбулентної – α =1,05–1,15($\alpha \approx 1$).

Таблиця 2

Допоміжні коефіцієнти для обчислення місцевого опору дифузора [7, с. 91]

β, град.	**φ_D**	**β, град.**	**φ_D**	**β, град.**	**φ_D**
3	0,21	15	0,32	40	1,0
5	0,16	20	0,47	60	1,28
7,5	0,14	25	0,62	100	1,20
10	0,20	30	0,75	180	1,0

Оскільки, максимальний кут розходження дорівнює 90°, а мінімальний – 45°, то середнє значення допоміжного коефіцієнта – близько φ_D=1,15.

Унаслідок того, що для встановлення квазістаціонарного розподілу швидкості потоку необхідною є умова $L/d \geq 50$ (для турбулентного потоку), у випадку, коли ця умова не виконується (що простежується у одно- і багатошарових тканинах), виникає явище інтерференції, тобто взаємного впливу близько розміщених місцевих гідравлічних опорів. Для обчислення кінцевого значення цих опорів застосовують рівняння Скобельцина–Хомутова ($Re > 500$): $\zeta_{1-2} = k_1(\zeta_1 + \zeta_2)$, де k_1 – коефіцієнт взаємовпливу. У разі великих значень відносної довжини (понад 10) використовують емпіричні значення коефіцієнта взаємовпливу [5, с. 1].

L/d	10	20	30	40	50
k_1	0,72	0,82	0,90	0,96	1,00

З урахуванням можливості появи у практиці таких значень L/d, які не наведені вище, побудовано аналітичну залежність для їхнього наближеного розрахунку. Формулу підбирали у два етапи:

1) з урахуванням плавного приросту значення k_1 (без екстремумів) зі збільшенням значення L/d зроблено припущення про залежність його відносного приросту від приросту десяткового логарифма L/d. Визначено коефіцієнт відповідності: $K = \frac{\Delta k_1}{\Delta \log x} = \frac{\frac{1{,}00}{0{,}72}-1}{\log 50 - \log 10} = \frac{0{,}38889}{0{,}69897} = 0{,}5563$, на підставі цього складено перше наближене рівняння:

$$k_1 = 0{,}72 \times \left(1 + 0{,}55638\left(\log\frac{L}{d} - 1\right)\right) = 0{,}72 + 0{,}4006\log\frac{L}{d} - 0{,}4006 = 0{,}3194 + 0{,}4006\log\frac{L}{d};$$

2) кінцева формула: $k_1 = 0{,}336 + 0{,}385\log\frac{L}{d}$ (рівняння 2). Порівняємо отримані рівняння із фактичними даними (табл. 3).

Таблиця 3

Відносна похибка k_1, обчисленого за різними рівняннями

Фактичне значення k_1	**Обчислене значення k_1 (рівняння 1)**	**Відносна похибка, рівняння 1, %**	**Обчислене значення k_1 (рівняння 2)**	**Відносна похибка, рівняння 2, %**
0,72	0,720000	0,000	0,721	0,139
0,82	0,840593	2,511	0,836897	2,061
0,90	0,911135	1,237	0,904692	0,521
0,96	0,961185	0,123	0,952793	-0,751
1,00	1,000001	0,001	0,990103	-0,990
Сума	Абс. відхилення 0,03292 (по модулю 0,03292)	3,873 (по модулю 3,873)	Абс. відхилення 0,00549 (по модулю 0,02260)	0,98 (4,462 по модулю)

Для точності обчислень важливо, щоб формула давала якнайменше відносне відхилення від фактичних значень для кожного конкретного випадку і мала якнайменше абсолютне відхилення, тому, як випливає з порівняння наведених у табл. 3 даних і результатів рівнянь, рівняння 2 має менше значення найбільшої відносної похибки та меншу суму абсолютних відхилень як за модулем, так і за реальними значеннями (за даної середньої точності 0,9 % достатньо для цього дослідження); коефіцієнт кореляції становить 0,996763.

Для значень відносної довжини $L/d \le 9$ застосовують таку залежність [5, с. 3]:

$$k_1 = \frac{1{,}36}{\left(\frac{L}{d}\right)^{0{,}242}}.$$

Загальний гідравлічний опір для одношарової тканини дорівнює, згідно з запропонованою моделлю, сумі місцевих опорів на вході й виході з каналу. Якщо декілька шарів ниток (тканини) розміщені безпосередньо один біля одного в складі суцільного блоку в тканині, то утворений канал між нитками (квадратне пакування) матиме коридорний (тобто канал має пряме простягання без внутрішніх перешкод) чи шаховий (тобто в разі переходу з одного шару тканини в інший елементарний потік матиме перешкоду у вигляді ниток, що перетинають канал, і розділятиметься на окремі струмені, що змушені будуть огинати цю додаткову перешкоду) порядок. Найточнішим способом обчислення загальних втрат тиску для коридорного і шахового порядків є його визначення як суми перепадів тиску на окремих рядах (тобто шарах тканини). Середня швидкість проходження потоку в перерізах каналів, яку беруть для визначення коефіцієнта Дарсі, дорівнює середній швидкості, визначеній через об’ємну витрату. Оскільки ця швидкість, яку братимуть для обчислень, сама буде результатом цих обчислень, то її шукатимуть за допомогою ітераційного рівняння.

Для коридорного та шахового порядку загальна формула втрати тиску має такий вигляд [2, с. 30]:

$$\Delta\rho = \sum_{i=1}^{n} C_z \Delta\rho_i \ ,$$

де C_z – коефіцієнт, що враховує різні втрати тиску на перших рядах (він відображає, як потік на перших рядах "пристосовується" до особливостей каналу); $\Delta\rho_i$ – втрата тиску на i-му ряді, $\Delta\rho_i = \lambda \frac{\rho \upsilon_{cp}^2}{2}$. Коефіцієнт Дарсі λ обчислюють так [2, с. 30]:

1) для коридорного порядку: $\lambda = \mathrm{Re}^{-0,15}\left[0,176 + \frac{0,32b}{(a-1)^{0,43+\frac{1,13}{b}}}\right]$;

2) для шахового порядку: $\lambda = \mathrm{Re}^{-0,16}\left[1 + \frac{0,47}{(a-1)^{1,08}}\right]$.

У разі визначення числа Рейнольдса для кільцевого каналу наголосимо, що за характерний розмір (гідравлічний діаметр каналу) беруть зовнішній діаметр ниток; показники a і b – це відносні поперечні та поздовжні кроки розміщення ниток, їх визначають як відношення відстані між центрами ниток у рядах до їхнього зовнішнього діаметра. Коефіцієнт взаємного впливу місцевих гідравлічних опорів залежить від відносної довжини каналу, яку виражають як відношення до його діаметра, тому для визначення довжини каналу необхідно обчислити його з урахуванням кількості шарів та діаметра ниток: $L = d_3(1 + b(n-1))$, де n – кількість шарів тканини.

Допоміжні коефіцієнти C_z визначають так [2, с. 30–31]:

1) для коридорного порядку:

$$\begin{cases} \mathrm{Re} \cong 10 \Rightarrow C_z = \frac{3,879}{Z + 0,091} - 0,217; C_z = 1 \text{ при } Z > 3 \\ \mathrm{Re} \cong 100 \Rightarrow C_z = 0,409 + \frac{5,049}{Z + 5,006}; C_z = 1 \text{ при } Z > 3 \\ \mathrm{Re} \cong 10^4 \Rightarrow C_z = 7,0 - 7,53Z + 2,73Z^2 - 0,305Z^3; C_z = 1 \text{ при } Z > 4 \\ \mathrm{Re} \cong 10^6 \Rightarrow C_z = 8,16 - 8,314Z + 3,303Z^2 - 0,52Z^3 + 0,025Z^4; C_z = 1 \text{ при } Z > 3 \end{cases}$$

2) для шахового порядку:

$$\begin{cases} \mathrm{Re} \cong 10 \Rightarrow C_z = 1,065 - \frac{0,180}{Z - 0,29}; C_z = 1 \text{ при } Z > 3 \\ \mathrm{Re} \cong 100 \Rightarrow C_z = 1,798 - \frac{3,497}{Z + 1,273}; C_z = 1 \text{ при } Z > 3 \\ \mathrm{Re} \cong 10^3 \Rightarrow C_z = 1,149 - \frac{0,411}{Z - 0,412}; C_z = 1 \text{ при } Z > 3 \\ \mathrm{Re} \cong 10^4 \Rightarrow C_z = 0,924 + \frac{0,269}{Z + 0,143}; C_z = 1 \text{ при } Z > 3 \\ \mathrm{Re} \cong 10^5 ... 10^6 \Rightarrow C_z = 0,62 + \frac{1,467}{Z - 0,667}; C_z = 1 \text{ при } Z > 4 \end{cases}$$

Значення коефіцієнтів C_z, обчислених згідно з наведеними вище формулами, представлено у табл. 4.

ISSN 2078-6441. Вісник Львівського університету. Серія географічна. 2013. Випуск 42

Таблиця 4

Допоміжні коефіцієнти C_z

	Число Рейнольдса, Re	**Z=1**	**Z=2**	**Z=3**	**Z=4**	**Z=5**	**Сума членів $C_z \neq 1$**
Коридорний порядок	$\mathrm{Re} \cong 10$	3,338	1,638	1,038	1	1	6,014
	$\mathrm{Re} \cong 100$	1,250	1,130	1,040	1	1	3,420
	$\mathrm{Re} \cong 10^4$	1,895	0,420	0,745	1,04	1	4,100
	$\mathrm{Re} \cong 10^6$	2,654	0,984	0,93	1	1	4,568
Шаховий порядок	$\mathrm{Re} \cong 10$	0,811	0,960	0,999	1	1	2,770
	$\mathrm{Re} \cong 100$	0,260	0,730	0,98	1	1	1,970
	$\mathrm{Re} \cong 10^3$	0,450	0,890	0,990	1	1	2,330
	$\mathrm{Re} \cong 10^4$	1,159	1,050	1,010	1	1	3,219
	$\mathrm{Re} \cong 10^5 \ldots 10^6$	5,025	1,721	1,249	1,060	1	9,055

Оскільки λ і $\dfrac{\rho \upsilon_{cp}^2}{2}$ для конкретного значення числа Рейнольдса є сталим, то $\Delta\rho_i = \mathrm{const}$ і формулу втрати тиску можна виразити як $\Delta\rho = \Delta\rho_i \sum_{i=1}^{n} C_z$ (формула 1). Однак це рівняння не є точним, якщо не відома середня об'ємна швидкість, а її необхідно ще обчислити, тому складемо ітераційне рівняння. Виразимо формулу 1 у такому вигляді (підставимо динамічний тиск і середню об'ємну швидкість та врахуємо динамічний напір потоку після виходу з каналу (він дорівнює одиниці)): $\dfrac{\rho V^2}{2} = \dfrac{\rho \upsilon_{cp}^2}{2}\left(\lambda \sum_{i=1}^{n} C_z + \zeta_{1-2} + 1\right)$. Динамічний тиск практично не змінює густини повітря (наприклад, за швидкості вітру 20 м/с і коефіцієнті аеродинамічного опору $C = 1$ динамічний тиск становить ≈ 200 Па, або 0,2 % від тиску в 760 мм рт. ст.), тому можна вважати, що $\rho = \mathrm{const}$, отже, ми можемо скоротити ліву і праву частини рівняння на $\dfrac{\rho}{2}$, у цьому разі зробимо заміну $N = \lambda \sum_{i=1}^{n} C_z + \zeta_{1-2} + 1$ і $\upsilon_{cep} = \upsilon$, отримаємо $V^2 = \upsilon^2 N$, або $V = \upsilon\sqrt{N}$, далі $\upsilon = \dfrac{V}{\sqrt{N}}$. Для обчислення коефіцієнта Дарсі необхідне значення числа Рейнольдса, оскільки $\mathrm{Re} = \dfrac{\upsilon d}{\nu}$ (d – гідравлічний діаметр, ν – кінематична в'язкість); замінимо $\dfrac{d}{\nu} = C_1$, відповідно, $\mathrm{Re} = \dfrac{V}{\sqrt{N}} C_1, \zeta_{1-2} = C_3$; у формулі коефіцієнта Дарсі λ теж зробимо заміну:

$$C_2 = \left\{\frac{\left[0{,}176 + \dfrac{0{,}32b}{(a-1)^{0{,}43+\frac{1{,}13}{b}}}\right]}{\left[1 + \dfrac{0{,}47}{(a-1)^{1{,}08}}\right]}\right..$$

Отже, $N=\left(\frac{V}{\sqrt{N}}C_1\right)^{-0,15(-0,16)}\times\left(C_2\times\sum_{i=1}^{n}f\left(\frac{V}{\sqrt{N}}C_1\right)\right)+C_3+1;\left(\frac{V}{\sqrt{N}}C_1\right)^{-0,15(-0,16)=-R}=V^{-R}\times N^{0,5R}\times C_1^{-R}$

(оскільки $\frac{1}{\sqrt[2]{N}}=N^{-0,5}$ і $\left(N^{-0,5}\right)^{-R}=N^{-0,5\times-R}=N^{0,5R}$); звідси кінцеве рівняння набуває такого вигляду:

$$N=V^{-R}\times N^{0,5R}\times C_1^{-R}\times\left(C_2\times\sum_{i=1}^{n}f\left(\frac{V}{\sqrt{N}}C_1\right)\right)+C_3+1$$

Це рівняння має псевдоітераційну складову (тобто існує вкладена ітерація: необхідно підбирати відповідне табличне значення), оскільки його частина у дужках залежить від значення числа Рейнольдса (зв'язок незначний, адже діапазони значень числа Рейнольдса зростають як 10^n) і, відповідно, від шуканої швидкості. Для спрощення рівняння ліпше окремо обчислювати ситуаційну сталу $X=V^{-R}\times C_1^{-R}\times\left(C_2\times\sum_{i=1}^{n}f\left(\frac{V}{\sqrt{N}}C_1\right)\right)$, адже її значення практично не змінюється (у разі наближення до розв'язку), тоді $N=XN^{0,5R}+C_3+1$ (рівняння 3), похідна $\left(N-XN^{0,5R}-C_3-1\right)'=1-0,5R\times X\times N^{(0,5R-1)}$. $N_0=1$, бо це відповідає умовам, коли гідравлічного опору нема. Різниця (тобто похибка кінцевого результату) між правою і лівою частинами рівняння 3 в ідеальному випадку має дорівнювати нулю. Отже, кінцеве ітераційне рівняння (відносна похибка задана на рівні 0,1 %, хоча можна задати будь-який рівень точності):

$$\begin{cases} N-\left(XN^{0,5R}+C_3+1\right)=0; \\ N_{n+1}=N_n+\dfrac{0-\left(N-\left(XN^{0,5R}+C_3+1\right)\right)}{1-0,5R\times X\times N^{(0,5R-1)}}; \\ N_n=N,\text{ якщо }\left|0-\left(\mathrm{N}-\left(\mathrm{XN}^{0,5R}+C_3+1\right)\right)\right|\le10^{-3}; \\ N_0=1. \end{cases}$$

Число $K=\frac{1}{\sqrt[2]{N}}$ є коефіцієнтом послаблення швидкості, відповідно, для наближених розрахунків його можна застосовувати без повторного розрахунку ітерації з новим значенням вхідної швидкості V, тоді в разі виходу повітря зі складного шару тканини (чи декількох шарів) необхідно коефіцієнт послаблення перемножити стільки разів, скільки є складних шарів тканини (за визначенням, мінімальна їхня кількість дорівнює двом – навітряний і підвітряний одиничний складний шар тканини (чи одягу)).

Під час проходження вітрового потоку повітря через тканину його швидкість значно зменшується. Оскільки аеродинамічний тиск є порівняно незначним, а густина повітря не змінюється (тобто компенсувати приріст об'єму цього повітря стисненням неможливо), то у внутрішній простір (наприклад, кільцевий канал) надходить певний додатковий об'єм повітря, збільшуючи тиск у цьому об'ємі, у цьому випадку можливі два сценарії розвитку подій: 1) внутрішній об'єм кільцевого каналу є ізольованим (тобто одна зі стінок каналу є повністю повітронепроникною), тому виникає динамічна рівновага, зовнішній вітровий тиск зрівноважується підвищеним внутрішнім тиском у каналі (джерелом приросту тиску у внутрішньому об'ємі є нагнітання повітря вітровим потоком та підвищення тиску внаслідок нагрівання тілом повітря), і повітря перестає надходити у кільцевий канал (пульсації швидкості руху повітря протягом часу релаксації не враховуємо); 2) внутрішній об'єм є відкритим, тому підвищений тиск у цьому об'ємі спричиняє витік повітря через підвітряну стінку. Підвітряна стінка теж затримує потік (коефіцієнт послаблення швидкості), тому більша частина додаткового повітря залишається у внутрішньому об'ємі, а підвищений тиск спричинить витік повітря ще й через основні отвори (відкриті поперечні перерізи кільцевого каналу нижньої і верхньої частини одягу), тобто простежуватиметься індукована підвищеним внутрішнім тиском вимушена конвекція; якщо швидкість повітря під час внутрішнього конвективного теплообміну у кільцевому каналі значно більша, ніж індукована, то її можна усунути з розрахунків, оскільки її врахування не збільшить точності визначення загального конвективного теплообміну.

Для визначення об'єму вхідного повітря можна використати таку формулу: $V_{об'єм\,(вхідний)} = S_{отв} \times \frac{V}{\sqrt[2]{N}} = S_{отв} \times V \times K^n$, де n – кількість складних (для яких характерний коридорний чи шаховий порядок розміщення елементарних шарів ниток, наприклад, одночасно декілька видів верхнього одягу) шарів тканини (одягу); у випадку, коли кожному складному шару тканини властиві інші параметри (діаметр і довжина каналів, діаметр ниток, порядки розміщення), для збереження точності обчислень ліпше визначати індивідуальні коефіцієнти послаблення, тому формула набуде такого вигляду: $V_{об'єм\,(вхідний)} = S_{кан} \times V_{швидк} \times \prod_{i=1}^{n} K_i$.

З урахуванням того, що декілька складних шарів тканини можуть перебувати на різній відстані між собою, формуючи індивідуальні локальні концентричні кільцеві канали, то з розрахунків можна усунути ті, які є повністю замкненими, тобто площа верхнього і нижнього поперечного перерізів дорівнює нулю, тоді їх можна вважати умовною поверхнею тіла людини, оскільки через них відбуватиметься теплопередавання лише електромагнітним випромінюванням та теплопровідністю (внутрішній конвективний теплообмін практично не виявляється внаслідок щільного розміщення і відсутності суцільного прошарку повітря). Отже, у формулі вхідного об'єму повітря необхідно використовувати коефіцієнти послаблення лише для не щільно прилеглих складних шарів тканини з відкритими (і напіввідкритими, коли відкритим є лише один з поперечних перерізів) кільцевими каналами. Через підвітряну частину одягу проникатиме частина додаткового об'єму повітря. Припустимо, що це повітря рухається без тертя з тією ж швидкістю, з якою воно потрапило у внутрішній об'єм. Стінка кільцевого каналу певного рівня складена з того ж самого матеріалу, тому коефіцієнт послаблення на виході практично дорівнює коефіцієнту на вході (з урахуванням поправки на менше значення числа Рейнольдса), позначимо його як коефіцієнт виходу $K_{вих}$, тоді об'єм повітря, що виходить за межі кільцевого каналу через його стінки, $V_{об'єм(вихідний)} = V_{об'єм\,(вхідний)} \times K_{вих}$.

Відповідно, залишковий додатковий об'єм повітря

$$V_{об'єм(залишковий)} = V_{об'єм(вхідний)} - V_{об'єм(вихідний)} .$$

Отже, швидкість виходу (вертикальний потік) додаткового об'єму повітря

$$\upsilon_{вих} = \frac{V_{об'єм(залишковий)}}{S_{кан}} ,$$

де $S_{кан}$ – середня площа поперечного перерізу кільцевого каналу: для напіввідкритого каналу це площа одного отвору, для відкритого необхідно врахувати загальну площу поперечного перерізу двох отворів (верхнього і нижнього).

Для закритого (але не ізольованого) кільцевого каналу швидкість горизонтального потоку повітря дорівнюватиме певній результуючій швидкості, оскільки тиск у межах каналу збільшуватиметься доти, доки не усталиться динамічна рівновага за балансом надходження і витрати повітря (тобто спочатку відбудеться розширення кільцевого каналу до максимального об'єму, після чого – підвищення тиску, і внаслідок підвищення тиску зросте витрата повітря через підвітряну стінку і зменшиться його надходження через навітряну).

У ході визначення результуючої швидкості складемо рівняння динамічної рівноваги. Оскільки динамічний тиск $p = \frac{\rho V^2}{2}$, то швидкість можна обчислити як $2p = \rho V^2 \Rightarrow V^2 = \frac{2p}{\rho}$. Рівність квадратів швидкості однозначно свідчить про рівність швидкостей (ми беремо скалярні значення, а не векторні). Якщо густина повітря на вході і виході відрізняється, то рівність вхідного і вихідного результуючих тисків, що залежать від цих швидкостей, не є повністю однозначною (хоча густину повітря для описаних вище умов уважаємо сталою); коефіцієнт сповільнення є відношенням вихідної швидкості після проходження через канал із додатним гідравлічним опором до вхідної швидкості, оскільки під час проходження через канал з урахуванням його незначної довжини та пасивного тепловиділення температура практично не змінюється і, відповідно, густина повітря теж не змінюється. Отже, динамічний тиск на виході з каналу залежить лише від швидкості у квадраті, тому відношення вихідного тиску до вхідного визначають як коефіцієнт послаблення у квадраті. Оскільки $K = \frac{1}{\sqrt[2]{N}}$, то $K^2 = \left(\frac{1}{\sqrt[2]{N}}\right)^2 = \frac{1}{N} = N^{-1}$. Позначимо динамічний тиск на вході у канал навітряної стінки як P_0, на виході з каналу цієї ж стінки – P_1; P_2 – вхід у канал підвітряної стінки, P_3 – вихід з каналу підвітряної стінки. Тиск P_2 простежується у всьому об'ємі кільцевого каналу, отже, він є результуючим тиском, бо одночасно діє на вихідний канал підвітряної стінки та вхідний канал навітряної. Відповідно, $P_1 = P_0K_1^2 - P_2 = P_0N_1^{-1} - P_2$, $P_3 = P_2K_2^2 = P_2N_2^{-1}$. Отже, за умови динамічної рівноваги швидкість на виході з каналу навітряної стінки V_1 повинна дорівнювати швидкості на виході з каналу підвітряної стінки V_3, виразимо їх через відповідний тиск:

$$\begin{cases} V_1^2 = \frac{2P_1}{\rho} = \frac{2\left(P_0K_1^2 - P_2\right)}{\rho}; \\ V_3^2 = \frac{2P_3}{\rho} = \frac{2P_2K_2^2}{\rho}; \\ V_1^2 = V_3^2. \end{cases}$$

Розв'яжемо систему рівнянь, отримаємо рівність $2P_0K_1^2 - 2P_2 = 2P_2K_2^2 \Rightarrow 2P_0K_1^2 = 2P_2(K_2^2+1) \Rightarrow P_0K_1^2 = P_2(K_2^2+1)$, тоді $P_2 = \frac{P_0K_1^2}{(K_2^2+1)}$.

ISSN 2078-6441. Вісник Львівського університету. Серія географічна. 2013. Випуск 42

Отже, результуюча швидкість $V_3 = \sqrt[2]{\frac{2P_3}{\rho}} \Rightarrow V_3 = \sqrt[2]{\frac{2\left(\frac{P_0 K_1^2}{\left(K_2^2+1\right)}\right)K_2^2}{\rho}} = \sqrt[2]{\frac{2\left(\frac{0{,}5\rho V^2 N_1^{-1}}{\left(N_2^{-1}+1\right)}\right)N_2^{-1}}{\rho}}$.

Рівняння результуючої швидкості можна звести до такого вигляду, якщо виразити її через сумарний коефіцієнт гідравлічного опору каналу N (зауваження: рівняння результуючої швидкості з урахуванням нагрівання в кільцевому каналі та його стінках повітря розглянемо окремо):

$$V_3 = \frac{\sqrt[2]{\rho V^2 N_1^{-1} N_2^{-1}}}{\sqrt[2]{\left(N_2^{-1}+1\right)\rho}} \Rightarrow V_3 = V \times \frac{\sqrt[2]{\rho N_1^{-1} N_2^{-1}}}{\sqrt[2]{\left(N_2^{-1}+1\right)\rho}} \Rightarrow V_3 = V \times \frac{\sqrt[2]{\rho} \times \sqrt[2]{N_1^{-1} N_2^{-1}}}{\sqrt[2]{\left(N_2^{-1}+1\right)} \times \sqrt[2]{\rho}} \Rightarrow V_3 = V \times \frac{\sqrt[2]{N_1^{-1} N_2^{-1}}}{\sqrt[2]{\left(N_2^{-1}+1\right)}}.$$

Позначимо $\frac{\sqrt[2]{N_1^{-1} N_2^{-1}}}{\sqrt[2]{\left(N_2^{-1}+1\right)}} = K_{\text{результ}}$, отже, кінцеве рівняння для результуючої швидкості набуває такого вигляду: $V_3 = V \times K_{\text{результ}}$.

Вихідна швидкість, наведена у формулі вище, є ефективною, оскільки вона визначена з абсолютного значення джерела рушійної сили для потоків повітря у каналі – динамічного тиску. Динамічний тиск на поверхні навітряної стінки, відповідно, дорівнює відношенню сили аеродинамічного опору тіла до площі його найбільшого поперечного перерізу (тобто міделю), що вже безпосередньо залежить від швидкості вітру, густини повітря та коефіцієнта аеродинамічного опору *C*. Звідси $p = C \times \frac{\rho V_{\text{вітр}}^2}{2} = CP_{\text{вітр}}$, з іншого боку, $p = \frac{\rho V^2}{2}$, то $\frac{\rho V^2}{2} = C\frac{\rho V_{\text{вітр}}^2}{2} \Rightarrow V^2 = CV_{\text{вітр}}^2$. Отже, рівняння для обчислення ефективної швидкості потоку на поверхні навітряної стінки таке: $V = V_{\text{вітр}} \times \sqrt[2]{C}$.

Результуюча швидкість завжди менша, ніж швидкість на виході з каналу (отвору) навітряної стінки кільцевого каналу, тому сумарний гідравлічний опір буде іншим, ніж обчислений для відкритого кільцевого каналу, відповідно, ітераційне рівняння теж буде іншим, оскільки зміниться його частина, що відповідає значенню числа Рейнольдса. Зробимо заміну у формулі числа Рейнольдса виразу середньої швидкості на рівняння результуючої швидкості: $\frac{V}{\sqrt{N}}C_1 \Rightarrow \frac{V \times \sqrt[2]{N_1^{-1} N_2^{-1}}}{\sqrt[2]{\left(N_1^{-1}+1\right)}}C_1$. Число Рейнольдса підносять до степеня –*R*, тому його можна розкласти до такого виразу:

$$\left(\frac{V \times \sqrt[2]{N_1^{-1} N_2^{-1}}}{\sqrt[2]{(N_1^{-1}+1)}}C_1\right)^{-R} = \frac{V^{-R} \times N_1^{0,5R} N_2^{0,5R} \times C_1^{-R}}{\left(\left(N_1^{-1}+1\right)^{0,5}\right)^{-R}} = \frac{V^{-R} \times N_1^{0,5R} N_2^{0,5R} \times C_1^{-R}}{\left(N_1^{-1}+1\right)^{-0,5R}} = V^{-R} \times N_1^{0,5R} N_2^{0,5R} \times$$

$$C_1^{-R} \times \left(\left(N_1^{-1}+1\right)^{-0,5R}\right)^{-1} = V^{-R} \times N_1^{0,5R} N_2^{0,5R} \times C_1^{-R} \times \left(N_1^{-1}+1\right)^{0,5R}.$$

Оскільки в процесі розв’язування рівняння динамічної рівноваги і поступового наближення до кінцевого значення $N_1^{-1} - N_2^{-1} = 0$, то $\sqrt[2]{N_1^{-1} N_2^{-1}} = N^{-1}$ і $N_1^{0,5R} N_2^{0,5R} = N^R$. Запишемо нове ітераційне рівняння:

ISSN 2078-6441. Вісник Львівського університету. Серія географічна. 2013. Випуск 42

$$N = V^{-R} \times N^{R} \times C_1^{-R} \times \left(N^{-1}+1\right)^{0,5R} \times \left(C_2 \times \sum_{i=1}^{n} f\left(\frac{V \times N^{-1}}{\sqrt[2]{\left(N^{-1}+1\right)}} C_1 \right) \right) + C_3 + 1 .$$

Позначимо, $X = V^{-R} \times C_1^{-R} \times \left(C_2 \times \sum_{i=1}^{n} f\left(\frac{V \times N^{-1}}{\sqrt[2]{(N^{-1}+1)}} C_1 \right) \right)$.

Отже, $N = X \times \left(N^{R} \times \left(N^{-1}+1\right)^{0,5R} \right) + C_3 + 1 \Rightarrow N - \left(X \times \left(N^{R} \times \left(N^{-1}+1\right)^{0,5R} \right) + C_3 + 1 \right) = 0$.

Похідну виразу $N - X \times \left(N^{R} \times \left(N^{-1}+1\right)^{0,5R} \right) - C_3 - 1$ визначимо

$$\left(N - X \times \left(N^{R} \times \left(N^{-1}+1\right)^{0,5R} \right) - C_3 - 1 \right)' = 1 - X \times \left(\left(N^{R}\right)' \times \left(N^{-1}+1\right)^{0,5R} + N^{R} \times \left(\left(N^{-1}+1\right)^{0,5R} \right)' \right) =$$

$$1 - X \times \left(R \times N^{R-1} \times \left(N^{-1}+1\right)^{0,5R} + N^{R} \times 0,5R \times \left(N^{-1}+1\right)^{(0,5R-1)} \right).$$

Отже, кінцеве ітераційне рівняння (задана відносна похибка 0,1 %)

$$N - \left(X \times \left(N^{R} \times \left(N^{-1}+1\right)^{0,5R} \right) + C_3 + 1 \right) = 0;$$

$$N_{n+1} = N_n + \frac{0 - \left(N - \left(X \times \left(N^{R} \times \left(N^{-1}+1\right)^{0,5R} \right) + C_3 + 1 \right) \right)}{1 - X \times \left(R \times N^{R-1} \times \left(N^{-1}+1\right)^{0,5R} + N^{R} \times 0,5R \times \left(N^{-1}+1\right)^{(0,5R-1)} \right)};$$

$$N_n = N,\ \textit{якщо} \left| 0 - \left(N - \left(X \times \left(N^{R} \times \left(N^{-1}+1\right)^{0,5R} \right) + C_3 + 1 \right) \right) \right| \le 10^{-3};$$

$$N_0 = 1.$$

Тіло людини є непроникним для газів, тому в ділянці кільцевого каналу, де простежується огинання потоком із результуючою швидкістю, виявляються сили тертя. Оскільки немає можливості точно їх визначити, то можна застосувати в першому наближенні аеродинамічний опір циліндра як моделі тіла людини, адже в разі огинання циліндра гідродинамічний перехідний шар рухається немовби по кільцевому каналу навколо циліндра, і товщина перехідного шару в більшості випадків становить менше 1 см, а товщина кільцевого каналу теж є в цих межах. Тому у наведене вище кінцеве ітераційне рівняння (як для відкритого, так і для закритого кільцевого каналу) варто долучити як додаткову ситуаційну сталу C_4 значення коефіцієнта аеродинамічного опору циліндра: $N - \left(X \times \left(N^{R} \times \left(N^{-1}+1\right)^{0,5R} \right) + C_3 + C_4 + 1 \right) = 0$ (для відкритого кільцевого каналу $N - \left(XN^{0,5R} + C_3 + C_4 + 1 \right) = 0$), що не змінює ні загального виразу ітераційного рівняння, ні виразу похідної. З урахуванням незначної мінливості значення сталої C_4, уточнення кінцевого результату збільшить кількість ітераційних циклів лише на декілька одиниць.

Отже, алгоритм оцінки швидкості повітря у кільцевому каналі, зовнішня стінка якого є повітропроникною, зводиться до розв'язування ітераційного рівняння, яке поєднує всі параметри, що описують гідродинамічний опір; вихідний елемент цього рівняння враховує процес виникнення динамічної рівноваги між надходженням і витратою повітря, що омиває тіло людини (чи його умовну поверхню). Унаслідок взаємозв'язку між вихідним ітераційним рівнянням (параметр N) та рівнянням, що описує динамічну рівновагу (результуюча швидкість), необхідно на перших циклах алгоритму виконати розрахунок на підставі вихідного ітераційного рівняння для кожного конкретного значення результуючої швидкості, щоб перерахувати всі залежні від швидкості параметри моделі (коефіцієнта Дарсі, числа Рейнольдса тощо). Після обчислень, коли необхідна точність параметра N досягнута, отриману результуючу швидкість уважаю швидкістю горизонтального потоку повітря у закритому кільцевому каналі. Для відкритого і напіввідкритого кільцевого каналу вистачає (хоча для максимально точних розрахунків необхідно визначити сумарний коефіцієнт гідравлічного опору підвітряної стінки для потоку повітря, що виходить з навітряної стінки) розрахунку лише за вихідним ітераційним рівнянням для визначення коефіцієнта ослаблення та переведення отриманої об'ємної швидкості у вертикальну швидкість потоку повітря з урахуванням поперечного перерізу кільцевого каналу.

Для забезпечення достатнього рівня точності оцінки вітропроникності (результуюча швидкість: вертикальна і горизонтальна) у випадку застосування одягу з наповнювачем (пористим чи волокнистим матеріалом з нерегулярною структурою, що надзвичайно ускладнює розробку відповідних алгоритмів) необхідно поширити практику оцінки повітропроникності (на лабораторіях підприємств) на всі типи матеріалу та максимально широкий діапазон динамічного тиску (для швидкості вітру від 0,1 до 60 м/с, тобто приблизний діапазон тиску від 0,007 до 2 300 Па) із визначенням аналітичної залежності, придатної для безперервних (недискретних щодо швидкості вітру) обчислень серед усіх виробників одягу та формування відповідної бази даних. У ході подальших досліджень необхідно розглянути вплив змінного поперечного перерізу кільцевого каналу вздовж вертикального профілю людського тіла на результуючу швидкість та вплив довгоперіодичних пульсацій швидкості вітру на зміну об'єму кільцевого каналу з урахуванням жорсткості одягу. Окремо треба розглянути поведінку ітераційних рівнянь складних функцій для прискореного отримання наближеного до кінцевого результату нульового члена кінцевого ітераційного рівняння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Борисова С. В.* Изменения климатических факторов и биоклиматических показателей в Украинских Карпатах / С. В. Борисова, Г. П. Катеруша // Укр. гідрометеорол. журн. – 2010. – № 7. – С. 74–81.
2. *Василенко С. М.* Теплообмінні апарати. Основи розрахунку та вибору : цикл лекцій / С. М. Василенко, В. В. Шутюк. – К. : УДУХТ, 2008. – 36 с.
3. *Григорьева Е. А.* Оценка теплоизоляционных свойств одежды человека в климатических условиях Дальнего Востока России / Е. А. Григорьева // Изв. Самар. науч. центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 5 (2). – С. 534–537.
4. *Дудла І. О.* Дослідження впливу спеціальної обробки на повітропроникність вовняних пальтових тканин : [Електронний ресурс] / І. О. Дудла, О. Б. Хребтань. – 8 с. – Режим доступу : http://archive.nbuv.gov.ua/portal/soc_gum/Tti/2009_1/8.pdf.

5. *Орел В. І.* Коефіцієнт взаємовпливу опорів у разі раптового розширення труб : [Електронний ресурс] / В. І. Орел. – 5 с. – Режим доступу: http://archive.nbuv.gov.ua/portal/natural/vnulp/Teploenerg/2009_659/12.pdf.
6. *Привала В. О.* Аналіз методів дослідження водо- і вітрозахисних властивостей матеріалів і пакетів для одягу / В. О. Привала, А. А. Мичко // Вісник Хмельницького ун-ту. Сер. техн. науки. – 2011. – № 1. – С. 225–228.
7. Процессы и аппараты химических технологий: справочник / [ред. тома Г. М. Островский] / Серия : Новый справочник химика и технолога. – СПб. : АНО НПО "Профессионал", 2004. – Ч. 1. – 848 с.
8. *Ткачук С. В.* Обзор индексов степени комфортности погодных условий и их связь с показателями смертности : [Електронний ресурс] / С. В. Ткачук. – 20 с. – Режим доступу: http://method.hydromet.ru/publ/tr/tr347/tkachuk.pdf.

Стаття: надійшла до редакції 04.09.2013
доопрацьована 19.09.2013
прийнята до друку 10.10.2013

THEORETICAL ASPECTS OF EVALUATION BREATHABILITY CLOTHING FOR DETERMINING HEAT BALANCE OF THE HUMAN BODY

Sergiy Kovalchuk

Lesya Ukrainka Eastern European National University,
Potapov Str., 9, office 601, UA – 43025 Lutsk, Ukraine

At the moment, there is no accurate method of determining the thermal balance of the human body, especially given breathability clothing. The main objective is to provide estimation algorithm air flow in the annular channel induced aerodynamic drag force. The developed method is based on the determination of the hydraulic resistance wall clothes and description of the appropriate non-linear effects in the annular channel using iterative equations. Total hydraulic resistance of the wall apparel determined by computing the local hydraulic resistance based on their mutual influence and resistance layers of fabric with the bellhop or staggered placement of layers.

Key words: hydraulic resistance, bioclimatic index, breathability clothing, the iterative equation, the heat balance of the human body.

ISSN 2078-6441. Вісник Львівського університету. Серія географічна. 2013. Випуск 42

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ВЕТРОПРОНИЦАЕМОСТИ ОДЕЖДЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

Сергей Ковальчук

Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки,
ул. Потапова, 9, каб. 601 (корпус С № 2), 43025, г. Луцк, Украина,
e-mail: geographical@univer.lutsk.ua

Сегодня не существует точной методики определения теплового баланса тела человека, особенно с учетом ветропроницаемости одежды. Разработано алгоритмы оценки скорости потока воздуха в кольцевом канале, индуцированного силой аэродинамического сопротивления. Методика основывается на определении гидравлического сопротивления стенки одежды и описании соответствующих нелинейных эффектов в кольцевом канале с помощью итерационных уравнений. Общее гидравлическое сопротивление стенки одежды получено в результате вычисления местных гидравлических сопротивлений с учетом их взаимного влияния и сопротивления слоев ткани с коридорным или шахматным порядком размещения слоев.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, биоклиматический индекс, ветропроницаемость одежды, итерационное уравнение, тепловой баланс тела человека.