

УДК 536.24

СПРЯЖЕНИЙ ТЕПЛООБМІН БАГАТОШАРОВИХ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК ПРИ СТРУМИННОМУ ЇХ ОХОЛОДЖЕННІ

*В. Г. Горобець, доктор технічних наук
Національний університет біоресурсів і природокористування України
e-mail:gorobetsv@ukr.net*

Анотація. Розроблена математична модель та проведений чисельний розрахунок процесів теплообміну при формуванні багатошарової рукавної полімерної плівки в умовах струминного її охолодження. У результаті чисельних розрахунків отримано температурні розподіли по довжині полімерної плівки та знайдено області її кристалізації. Проаналізовано вплив динамічних і геометричних параметрів на процеси формування плівки та вказані шляхи для підвищення продуктивності таких установок.

Ключові слова: *багатошарова рукавна полімерна плівка, теплообмін, струминна течія, кристалізація полімерної плівки*

Актуальність. Багатошарові полімерні плівки мають широку область застосування в різних галузях народного господарства. У галузі сільського господарства вони можуть бути використані при переробці та зберіганні сільськогосподарської продукції, в тепличних комплексах, тощо. При виробництві рукавних або плоских полімерних плівок, які витягуються з філь'єри в розплавленому стані, застосовуються два основних методи охолодження – двостороннє обдування поверхонь плівки струменями повітря або охолодження плівки на барабані шляхом її притискання до його поверхні повітряним струменем [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В інженерних методиках розрахунку процесів теплопереносу, які протікають у таких системах, використовують емпіричні залежності для усереднених значень коефіцієнтів тепловіддачі [1,2]. При цьому не враховуються ряд факторів, наприклад, нерівномірність локальних розподілів коефіцієнтів тепловіддачі поверхнею плівки, залежність теплофізичних властивостей полімерних матеріалів від температури, неізотермічність поверхні обтікання та ряд інших, які впливають

на умови охолодження плівок та приводять до виникнення похибок при розрахунку систем охолодження плівок [3]. У роботах [4,5] проведено розрахунок теплопереносу в одношарових рухомих плівках, що обдуваються струминним потоком теплоносія, в яких враховано локальні розподіли коефіцієнтів тепловіддачі і неізотермічність поверхні плівки та показаний вплив цих факторів на умови теплообміну. Слід відмітити, що у вищевказаних роботах розглядалися лише полімерні плівки, що мають один шар полімерного матеріалу. Однак полімерні плівки можуть складатися з кількох шарів різної товщини, які мають різні теплофізичні властивості і різну температуру кристалізації полімерів. Детальні розрахунки таких плівок з урахуванням наведених вище факторів не проводились. Для композитних полімерних плівок, що складаються з декількох полімерів з різними властивостями, розроблені пристрої, в яких для їх охолодження при переході з розплаву в твердий стан застосовується двосторонній обдув струменями повітря. Дослідження показали, що режим течії струминних потоків повинен бути турбулентним. Докладний аналіз теплофізичних процесів, що протікають на поверхнях плівки викладено в [6,7], тому далі розроблена математична модель теплопереносу в багатошаровій плівці, проведений чисельний розрахунок та аналіз процесів, які протікають при охолодженні та кристалізації багатошарової полімерної плівки.

Мета дослідження – розробка математичної моделі і чисельний розрахунок процесів переносу при струминному повітряному охолодженні багатошарової рукавної полімерної плівки та аналіз впливу динамічних і геометричних факторів на умови формування плівки.

Матеріали та методи дослідження. Система охолодження багатошарової рукавної полімерної плівки складається з філь'ери, з якої витягується плівка та повітряного її охолодження у вигляді двох струминних потоків, що витікають з щілинних отворів (рис. 1,а). Координати точок натікання на зовнішню і внутрішню поверхню плівки позначені відповідно

x_1, x_2 . Поверхня плівки розбивається на три зони 1–3, у яких мають місце різні умови гідродинамічної течії. На зовнішній стороні плівки у зоні 1 спостерігається відривна поворотна течія, а в зоні 2,3 пристінна струминна течія. На внутрішній поверхні плівки відривна поворотна течія формується у зонах 1,2, а пристінна струминна течія – у зоні 3 (див. рис. 1а).

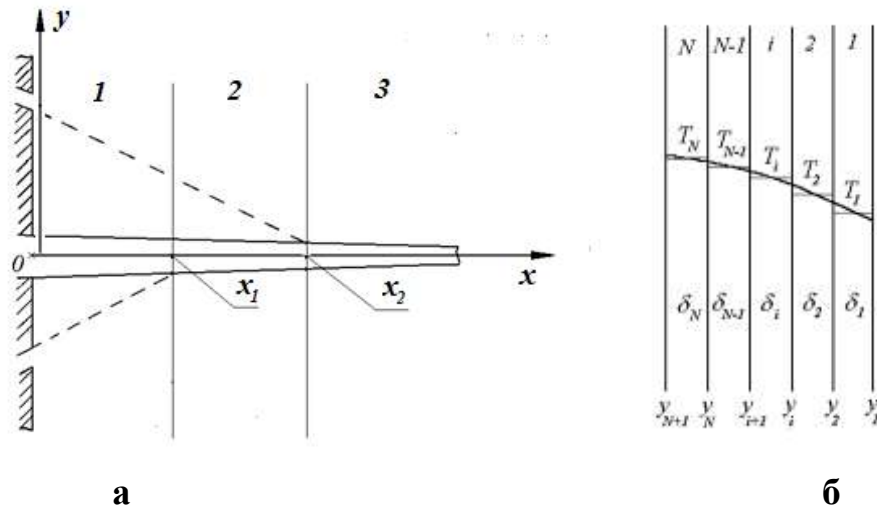


Рис.1 Схема позонного розрахунку (а) та температурний розподіл по перерізу (б) багат шарової полімерної плівки

Рівняння переносу енергії в рухомій плівці, що складається з N шарів, має вигляд

$$\rho_i(T_i) c_{pi}(T_i) U_s(x) \frac{\partial T_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial y} \right], \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad (1)$$

де $c_{pi}, \rho_i, \lambda_i$ – відповідно, питома теплоємність, густина і коефіцієнт теплопровідності полімеру для i -го шару, i – номер шару, N – кількість шарів.

Вважаючи, що температура шарів при виході з філь'єри змінюється незначно і дорівнює T_0 , а тепловідводом від охолодженої плівки під час намотування її на намотувальний барабан можна знехтувати, запишемо для рівняння (1) такі граничні умови

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=y_i} = \lambda_{i-1} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial y} \Big|_{y=y_i}, T_i(y=y_i) = T_{i-1}(y=y_i), i=2, \dots, N;$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=y_1} = q_{1S}(x, T_{1n}), \lambda_N \frac{\partial T_N}{\partial y} \Big|_{y=y_N} = q_{2S}(x, T_{Nn}), \quad (2)$$

$$T_i(x=0) = T_0, \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0, \quad i=1, 2, \dots, N$$

де $q_{1S}(x, T_{1n}), q_{2S}(x, T_{Nn})$ – локальні значення теплових потоків, що відводяться з поверхонь плівки, індекси 1 і 2 позначають, відповідно, внутрішню і зовнішню поверхню плівки, $s = 1, 2$ визначає номер області, відповідно, для відривної та приєднаної струминної течії, а n – поверхню плівки.

Система рівнянь (1) є нелінійною в силу залежності теплофізичних властивостей полімерів від температури (особливо в зоні кристалізації). Цю систему можна дещо спростити, беручи до уваги, що число Біо для кожного шару $Bi_i = \alpha \delta_i / \lambda_i$ невелике і зазвичай не перевищує 0,1. Тому, кожен шар можна розглядати як термічно тонке тіло і провести усереднення по товщині

шару $\bar{T}_i = \frac{1}{\delta_i} \int_{y_i}^{y_{i+1}} T_i dx$, де $\delta_i = y_{i+1} - y_i$ – товщина i -го шару, y_{i+1}, y_i – поперечні

координати i -го полімерного шару (див. рис.1б). Після інтегрування системи рівнянь (1) по координаті y для кожного шару така система рівнянь зводиться до вигляду

$$c_{pi}(\bar{T}_i) \rho_i(\bar{T}_i) \delta_i(x) U_s(x) \frac{\partial \bar{T}_i}{\partial x} = \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=y_{i+1}} - \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=y_i}, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

Відомо, що для багат шарових тіл великої протяжності ($L \gg \delta$, L, δ – відповідно, довжина і товщина плівки) розподіл температури поперек шару близький до лінійного і величину теплового потоку поперек шару можна представити у вигляді

$$\lambda_{i-1} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial y} \Big|_{y=y_i} = -\frac{\lambda_{i-1}}{\delta_{i-1}/2} (\bar{T}_{i-1} - T_{in}), \quad (4)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=y_i} = \frac{\lambda_i}{\delta_i/2} (\bar{T}_i - T_{in}), \quad i = 2, \dots, N. \quad (5)$$

де T_{in} – температура на лінії контакту i -го і $i-1$ -го шарів. З урахуванням (4) – (5), а також беручи до уваги граничні умови (2) систему рівнянь (3) можна привести до наступного вигляду

$$\begin{aligned} c_{p1}(\bar{T}_1) \rho_1(\bar{T}_1) \delta_1(x) U_s(x) \frac{\partial \bar{T}_1}{\partial x} &= \frac{\lambda_1}{\delta_1/2} \left(1 + \frac{\lambda_2 \delta_1}{\lambda_1 \delta_2}\right)^{-1} (\bar{T}_1 - \bar{T}_2) + q_{1S}(x, \bar{T}_1) (1 + Bi_1)^{-1}, \\ c_{pi}(\bar{T}_i) \rho_i(\bar{T}_i) \delta_i(x) U_s(x) \frac{\partial \bar{T}_i}{\partial x} &= \frac{\lambda_i}{\delta_i/2} \left(1 + \frac{\lambda_i \delta_{i+1}}{\lambda_{i+1} \delta_i}\right)^{-1} (\bar{T}_i - \bar{T}_{i+1}) - \\ &- \frac{\lambda_{i-1}}{\delta_{i-1}} \left(1 + \frac{\lambda_i \delta_{i-1}}{\lambda_{i-1} \delta_i}\right)^{-1} (\bar{T}_{i-1} - \bar{T}_i) \quad (6) \\ c_{pN}(\bar{T}_N) \rho_N(\bar{T}_N) \delta_N(x) U_s(x) \frac{\partial \bar{T}_N}{\partial x} &= \frac{\lambda_N}{\delta_N} \left(1 + \frac{\lambda_N \delta_{N-1}}{\lambda_{N-1} \delta_N}\right)^{-1} \times \\ &\times (\bar{T}_N - \bar{T}_{N-1}) + q_{2S}(x, \bar{T}_N) (1 + Bi_N)^{-1}, \quad i = 2, \dots, N-1 \end{aligned}$$

Беручи до уваги співвідношення для постійної витрати полімеру в кожному перерізі плівки [1]

$$\rho_i(T_i) U_s(x) \delta_i(x) R(x) = const, \quad i = 1, 2, \dots, N: \quad (7)$$

запишемо систему рівнянь (6) в безрозмірному вигляді

$$\begin{aligned} \frac{c_{p1}(\theta_1)}{c_{p1k}(\theta_{1k})} \frac{d\theta_1}{dx} &= \frac{\lambda_1 L}{\rho_{1k} U_{Sk} \delta_{1k} c_{p1k} \delta_{1k} \delta_1(X)} \left(1 + \frac{\lambda_2 \delta_1}{\lambda_1 \delta_2}\right)^{-1} (\theta_1 - \theta_2) + , \\ &+ \frac{q_{1S}(X, \theta_1) L}{\rho_{1k} U_{Sk} \delta_{1k} c_{p1k} \delta_{1k} \delta_1(X) (T_0 - T_{1\infty})} (1 + Bi_1)^{-1}, \\ \frac{c_{pi}(\theta_i)}{c_{pik}(\theta_{ik})} \frac{d\theta_{i1}}{dx} &= \frac{\lambda_i L}{\rho_{ik} U_{Sk} \delta_{ik} c_{pik} \delta_{ik} \delta_i(X)} \left(1 + \frac{\lambda_i \delta_{i+1}}{\lambda_{i+1} \delta_i}\right)^{-1} (\theta_i - \theta_{i+1}) - \end{aligned}$$

$$-\frac{(\theta_{i-1}-\theta_i)L}{\rho_{ik}U_{Sk}\delta_{ik}c_{pik}\delta_{ik}\delta_{i-1}(X)(T_0-T_{1\infty})}\left(1+\frac{\lambda_i\delta_{i-1}}{\lambda_{i-1}\delta_i}\right)^{-1}, \quad (8)$$

$$\frac{c_{pN}(\theta_N)}{c_{pNk}(\theta_{Nk})} \frac{d\theta_N}{dx} = \frac{\lambda_N L}{\rho_{Nk}U_{Sk}\delta_{Nk}c_{pNk}\delta_{Nk}\delta_N(X)} \left(1 + \frac{\lambda_N \delta_{N-1}}{\lambda_{N-1} \delta_N}\right)^{-1} \times$$

$$\times (\theta_N - \theta_{N-1}) + \frac{q_{2S}(X, \theta_N)L}{\rho_{Nk}U_{Sk}\delta_{Nk}c_{pNk}\delta_{Nk}\delta_N(X)(T_0-T_{1\infty})} (1 + Bi_N)^{-1}, \quad i = 2, \dots, N-1$$

Тут прийнято: $X = x/L$, $\theta_i = \frac{T_i - T_{1\infty}}{T_0 - T_{1\infty}}$, L – загальна довжина плівки, індекс

k позначає значення параметрів в точці кристалізації.

Радіус рукава в зоні формоутворення визначається емпіричним співвідношенням [1]

$$R(x) = R_0 + 0,5(R_k - R_0) \left[1 - \cos(\pi x / x_k)\right], \quad (9)$$

де R_0 – радіус рукава на виході з філь'єри, R_k, x_k – радіус рукава і координата в точці кристалізації. В силу того, що координата точок кристалізації x_k різна для різних шарів багат шарової плівки використовують його значення для полімеру, температура кристалізації якого мінімальна. З урахуванням (9) величина $\delta_i(X)$ може бути представлена у вигляді

$$\delta_i(X) = \delta_{ik} / \psi_R(X), \quad (9)$$

де $\psi_R(X) = R(X) / R_k$.

Як було зазначено вище, зовнішня і внутрішня поверхня плівки умовно розбита на дві області – область поворотної вихрової течії і область пристінної струминної течії. Локальні теплові потоки в області поворотної і пристінної струминної течії $q_{1S}(X, \theta_1)$, $q_{2S}(X, \theta_N)$ приймають різні значення. У зоні поворотної вихрової течії $q_{i1}(X, \theta_m)$ може бути представлена у вигляді

$$q_{i1}(X, \theta_m) = \alpha_{i,omp}^* (X_i - X)(T_0 - T_{1\infty}) \left[\theta_m - \theta_{i,omp} + \int_{X_i}^X dX' f(X_i - X, X_i - X') \frac{d\theta_m}{dX'} \right], \quad (10)$$

де $0 \leq X \leq X_i$, $i=1,2$; $m=1,N$; X_i – координата точки натікання струменя на поверхню плівки, $\theta_{i,omp} = (T_{i,omp} - T_{1\infty}) / (T_0 - T_{1\infty})$, $T_{i,omp}$ – температура в області потенційної вихрової течії.

Значення локальних коефіцієнтів тепловіддачі при формуванні пограничного шару на ізотермічній поверхні для відривної області течії $\alpha_{i,omp}^*$, з огляду на її ламінарний характер, можна представити у вигляді [8, 9]

$$\alpha_{i,omp}^*(X_i - X) = g_0 \lambda_g / L \text{Re}_{iL}^{1/2} (X_i - X)^{-1/2}, \quad i=1,2; \quad (11)$$

де $\text{Re}_{iL}^* = U_{i,omp} L / \nu$ – число Рейнольдса. Параметр g_0 для ламінарних безградієнтних течій дорівнює [7] $g_0 = 0,33 \text{Pr}^{0,33}$ (Pr – число Прандтля).

Вираз для густини теплового потоку в області приєднаної струминної течії ($X_i \leq X \leq 1$) $q_{i2}(X)$ має вигляд

$$q_{i2}(X) = \alpha_i^*(X - X_i) \times \left[\theta_m(X = X_i) - \theta_{i\infty} + \int_{X_i}^X dX' f(X_i - X, X_i - X') \frac{d\theta_m}{dX'} \right], \quad (12)$$

де $X_i \leq X \leq 1$, $i=1,2; m=1,N$; для зовнішньої сторони плівки ($i=1$), $\theta_{1\infty} = 0$, $m=1$ і ($i=2$), $\theta_{2\infty} = (T_{2\infty} - T_{1\infty}) / (T_0 - T_{1\infty})$, $m=N$ – для внутрішньої сторони плівки.

Коефіцієнт тепловіддачі в області пристінної струминної течії $\alpha_i^*(X - X_i)$ для турбулентного режиму течії визначається виразом [2, 10]

$$\alpha_i^*(X - X_i) = 0,058 \frac{\lambda_g}{l_i} \text{Pr} \text{Re}_i^{0,8} \left(\frac{L}{l_i} \right)^{-0,37} (X - X_i)^{-0,37}, \quad (13)$$

де $\alpha_i^*(X - X_i) = 0,058 \frac{\lambda_g}{l_i} \text{Pr} \text{Re}_i^{0,8} \left(\frac{L}{l_i} \right)^{-0,37} (X - X_i)^{-0,37}$, $i=1,2$; l_i – ширина

щілини, $\text{Re}_i = U_i l_i / \nu$ – число Рейнольдса для струминної течії.

Поряд з інтегральною формою подання густини відведених теплових потоків (див. вирази (10), (12)) можна також записати диференційну форму [7]. Приведемо її.

Для відривних зон

$$q_{i1}(X, \theta_m) = \alpha_{i,omp}^* (X_i - X)(T_0 - T_{1\infty}) \times \left[\theta_m(X) - \theta_{i,omp} + \sum_{k=1}^{\infty} g_k (X_i - X)^k \frac{d^k \theta_m}{dX^k} \right], \quad 0 \leq X \leq X_i, \quad i=1,2; \quad m=1,N. \quad (14)$$

Для пристінних струминних течій

$$q_{i2}(X) = \alpha_i^* (X - X_i) \left[\theta_m(X=X_i) - \theta_{i\infty} + \sum_{k=1}^{\infty} g_k (X - X_i)^k \frac{d^k \theta_m}{dX^k} \right], \quad (15)$$

де $X_i \leq X \leq 1$, $i=1,2; m=1,N$;

Щоб завершити побудову математичної моделі задачі теплопереносу при двосторонньому струминному охолодженні багатошарової полімерної плівки, запишемо граничні умови на виході з філь'єри та в кінцевій області системи охолодження поблизу намотувального валка. З урахуванням (2) граничні умови на вході і виході в безрозмірних змінних приймають вигляд

$$\theta_i(X=0) = 1, \quad \left. \frac{\partial \theta_i}{\partial X} \right|_{X=1} = 0, \quad i=1,\dots,N. \quad (16)$$

Таким чином, задача зводиться до розв'язку системи нелінійних інтегро-диференційних рівнянь (8) з граничними умовами (16). Поверхня плівки розбивається на ділянки з різними умовами гідродинамічної течії, де густина теплових потоків $q_{1S}(X, \theta_1)$, $q_{2S}(X, \theta_N)$ визначається з виразів (10)–(15), які відповідають типу течії в даній області.

Чисельний розрахунок системи рівнянь (8) з граничними умовами (16) проведено, використовуючи метод Рунге–Кутта [11]. Інтегральні члени обчислювалися із застосуванням методу Сімпсона [12]. Оскільки значення похідних $\frac{d\theta}{dX}$ на поточному кроці невідомі, була організована ітераційна

процедура розрахунку, в процесі якої ці значення уточнювалися. З огляду на те, що питома теплоємність для кожного полімеру, що входить до складу композитної плівки $\bar{c}_{mp}(T_m)$, ($m=1, \dots, N$), істотно залежить від температури \bar{T}_m і визначається з таблиць, величина $\gamma(T_m) = \bar{c}_{pm}(\bar{T}_m) / \bar{c}_{pm}(\bar{T}_{mk})$ була апроксимована поліномом третьої степені за методом сплайн-інтерполяції [12]. Процедура визначення параметра $\gamma(T_m)$ наведена в [7].

Результати досліджень. Перш ніж перейти до обговорення результатів розрахунку зазначимо таке. На умови охолодження плівки полімеру, що складається з декількох шарів, має вплив ряд факторів, пов'язаних з витратою повітря через щілинні отвори (або з швидкістю обдування) та геометричними характеристиками – товщиною шарів плівки, відстанню від філь'єри до точки натікання повітряного струменя і іншими факторами. Важливим фактором є також швидкість руху плівки, яка визначає продуктивність системи охолодження. Дослідження впливу цих факторів дозволяє виявити основні шляхи підвищення продуктивності системи охолодження.

Для апробації розробленої математичної моделі проводилося порівняння результатів розрахунку для багатошарової плівки при граничному переході до відомих результатів для одношарової плівки [3] і наявними для таких плівок експериментальними даними. Результати чисельного розрахунку представлені на рис.2–6, на яких показано вплив основних факторів на теплові характеристики багатошарових полімерних плівок. У розрахунках приймалося, що композитна плівка складається з п'яти шарів ($N=5$) ПЕВТ – Байнел – поліамід ПА–6 – Байнел – ПЕВТ. У розрахунках приймалися наступні значення вихідних параметрів: $T_{1\infty} = 22^{\circ}\text{C}$, $T_{2\infty} = 50^{\circ}\text{C}$, $R_0 = 0,5\text{м}$, $R_k = 0,765\text{м}$, $L = 6\text{м}$, $l_1 = 10\text{мм}$, $l_2 = 16\text{мм}$. Всі інші значення динамічних і геометричних

параметрів наведені в табл. 1. Наведені в таблиці варіанти вихідних даних використані в розрахунках для вивчення впливу різних параметрів на температурні характеристики багатошарових плівок (див. рис.2– 6).

Для великих швидкостей струминної течії охолодження багатошарових полімерних плівок характеризується значним падінням температурного напору і великими негативними значеннями градієнтів температур на ділянках поверхні полімеру, що примикають до лінії натікання струменя (див. рис.2– 4). Це призводить до суттєвого зменшення локальних значень коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha(x,T)$ в цій області, якщо порівнювати їх із значеннями коефіцієнтів тепловіддачі на ізотермічній поверхні $\alpha^*(x)$. На рис. 2 наведено графік зміни значень коефіцієнта неізотермічності $\chi = \alpha(x,T)/\alpha^*(x)$ по довжині полімерної плівки на зовнішній поверхні. Розрахунок проведено для варіанта 2 (див. табл. 1) при невеликій протяжності ділянки поверхні з відривною течією.

1. Вихідні геометричні та динамічні параметри системи охолодження багатошарової полімерної плівки

№ варіанта	U_{01} м/с	U_{02} м/с	δ_{01} (δ_{1k}) мкм	δ_{02} (δ_{2k}) мкм	δ_{03} (δ_{3k}) мкм	δ_{04} (δ_{4k}) мкм	δ_{05} (δ_{5k}) мкм	U_s (U_{sk}) м/сек	x_1 см	x_2 см
1	10	10	348 (29)	84 (7)	336 (28)	84 (7)	348 (29)	0,3 (0,487)	4,2	3,8
2	70	10	348 (29)	84 (7)	336 (28)	84 (7)	348 (29)	0,3 (0,487)	4,2	3,8
3	80	10	1044 (87)	252 (21)	1008 (84)	252 (21)	1044 (87)	0,3 (0,487)	27	26
4	80	10	1044 (87)	252 (21)	1008 (84)	252 (21)	1044 (87)	0,3 (0,487)	70	65
5	80	10	1044 (87)	252 (21)	1008 (84)	252 (21)	1044 (87)	0,3 (0,487)	27	26
6	80	10	348 (29)	84 (7)	336 (28)	84 (7)	348 (29)	0,3 (0,487)	27	26
7	80	10	348 (29)	84 (7)	336 (28)	84 (7)	348 (29)	0,9 (1,461)	27	26
8	80	10	348 (29)	84 (7)	336 (28)	84 (7)	348 (29)	0,3 (0,487)	27	26

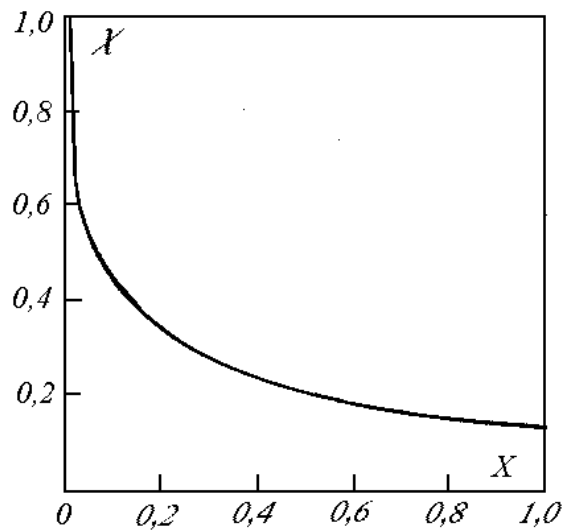


Рис. 2 Розподіл коефіцієнта неізотермічності $\chi = \alpha(x, T) / \alpha^*(x)$ на зовнішній поверхні плівки (розрахунок за варіантом №2 з табл. 1)

$X_1 = x_1 / L = 0,007$. Зазначений коефіцієнт відображає вплив неізотермічності обтічної поверхні на локальні характеристики теплообміну. Як впливає з рис. 2, не врахування цього впливу призводить до значних похибок у визначенні локальних коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні полімерної плівки.

Витратні характеристики системи повітряного охолодження (або швидкості обдування) мають визначальне значення на температурні розподіли по довжині і перерізу полімерної плівки. Регулювання цих витрат дозволяє отримати необхідну температуру плівки поблизу намотувального валка при заданій висоті (довжині) системи охолодження і відомих теплофізичних характеристиках багат шарового рукава. Можливе варіювання витрат повітря в зовнішньому і внутрішньому струминному потоці для забезпечення необхідної температури плівки на виході. На рис.3 наведені температурні розподіли по товщині плівки. Неправильний режим охолодження може привести до того, що одна із сторін плівки виявиться недостатньо охолодженою при намотуванні її на валок. Тому швидкості обдування з зовнішньої і внутрішньої сторін плівки повинні бути, приблизно, рівні. Це особливо важливо для товстих

багатошарових плівок, які мають великий термічний опір по координаті Oy . Відзначимо той факт, що ефективне охолодження плівки відбувається тільки на порівняно невеликій ділянці плівки в області натікання струменя на поверхню. При віддаленні від цієї області умови охолодження стають неефективними і падіння температури плівки далеко від точки натікання незначне.

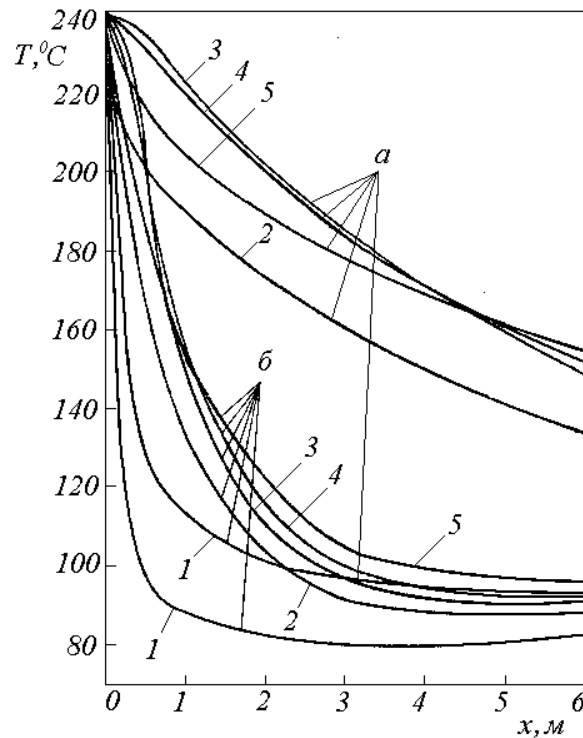


Рис. 3 Розподіл температури по довжині п'ятишарової полімерної плівки при різній швидкості обдування:

a – розрахунок за даними варіанту №1 з табл.1; *b* – розрахунок за даними варіанту №2 з табл.1; 1–5 – номери шарів в багатошаровій плівці.

Іншим важливим фактором, який впливає на умови охолодження, є геометричне розташування щілинного струминного отвору по відношенню до рукавної полімерної плівки. Зміна його розташування і кута витікання струменя з щілини змінює координату точки натікання струменя на поверхню і відстань від щілинного отвору до поверхні по осі руху струменя. На рис.4 показано вплив зміни координати точки натікання на умови охолодження композитної

плівки. Як випливає з аналізу наведених кривих, збільшення відстані між філь'єрою і точкою натікання (відстані x_1, x_2) призводить до погіршення умов тепловіддачі. Це обумовлено двома факторами – збільшенням відривної зони, де умови тепловіддачі погіршені, і збільшенням відстані від щілини до точки натікання, що зменшує швидкість набігання струменя і величину локальних коефіцієнтів тепловіддачі в області пристінної струминної течії. Тому, для інтенсифікації процесу охолодження розташування щілинного каналу слід вибирати таким чином, щоб відстані x_1, x_2 були невеликі. Слід зазначити, що відстань від щілинного каналу до точки натікання, яка забезпечує оптимальні умови теплообміну лежить в межах $h = 6 - 10l$ (l – ширина щілини).

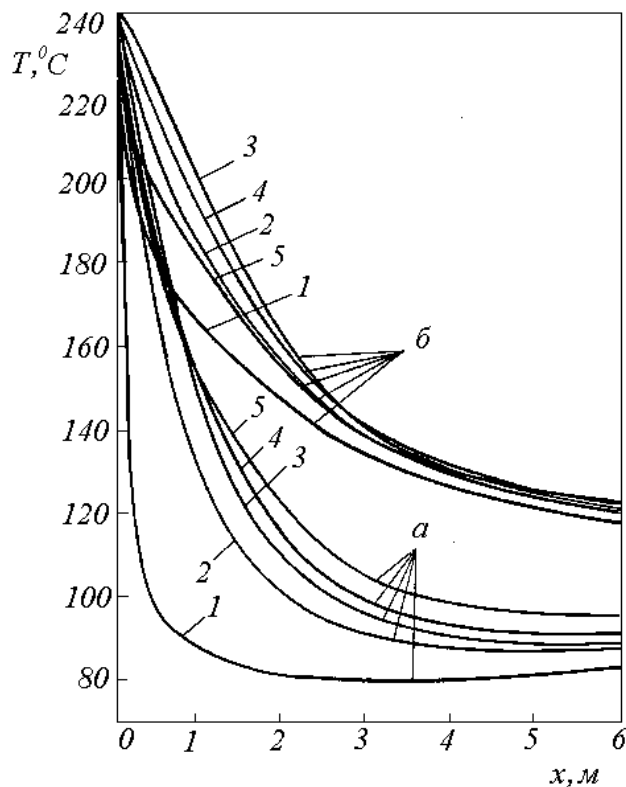


Рис. 4 Температурний розподіл в багат шаровій плівці при різних координатах точок натікання струменів: а – розрахунок за даними варіанту №3 з табл.1; б – розрахунок за даними варіанту №4 з табл.1

В силу того, що виробляється плівка різного поперечного перерізу, на рис. 5 наведені температурні розподілу в п'ятишаровій полімерній плівці, що

має шари різної товщини. Як впливає з рисунка, збільшення товщини шарів призводить до зростання температурних напорів по її довжині, що пояснюється збільшенням тепловмісту в більш товстих плівках. Отже, для забезпечення необхідної температури на виході, необхідно збільшити інтенсивність тепловідводу з поверхні плівки. Відзначимо, що для більш товстих плівок перепади температур в поперечному перерізі багат шарової плівки зростають, що призводить до необхідності створювати однакові умови теплообміну на зовнішній і внутрішній її поверхні.

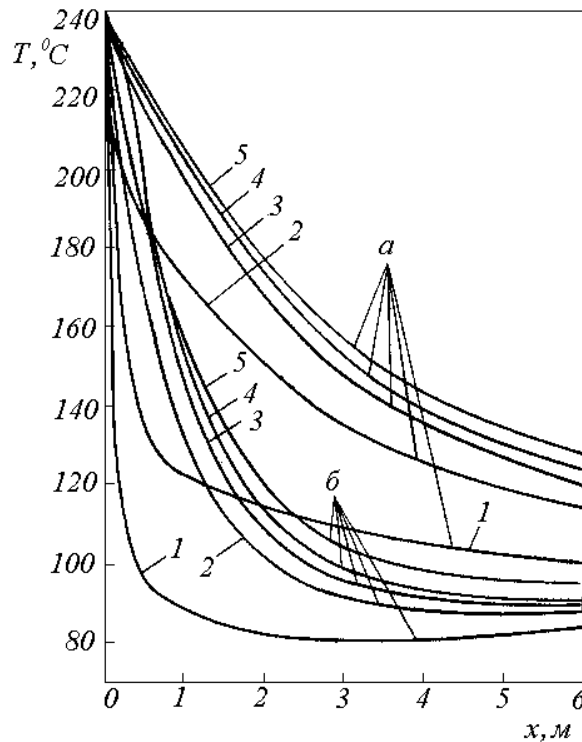


Рис. 5 Розподіл температур по довжині і перерізу полімерної плівки при різній товщині шарів: а – розрахунок за даними варіанту №5 з табл. 1; б – розрахунок за даними варіанту №6 з табл. 1

Що стосується впливу на умови охолодження загальної довжини плівки L , то при її збільшенні температурний напір між плівкою і зовнішнім теплоносієм на ділянках віддалених від точки натікання падає, проте це падіння

незначне і збільшення довжини L не призводить до суттєвого зменшення температури плівки на виході.

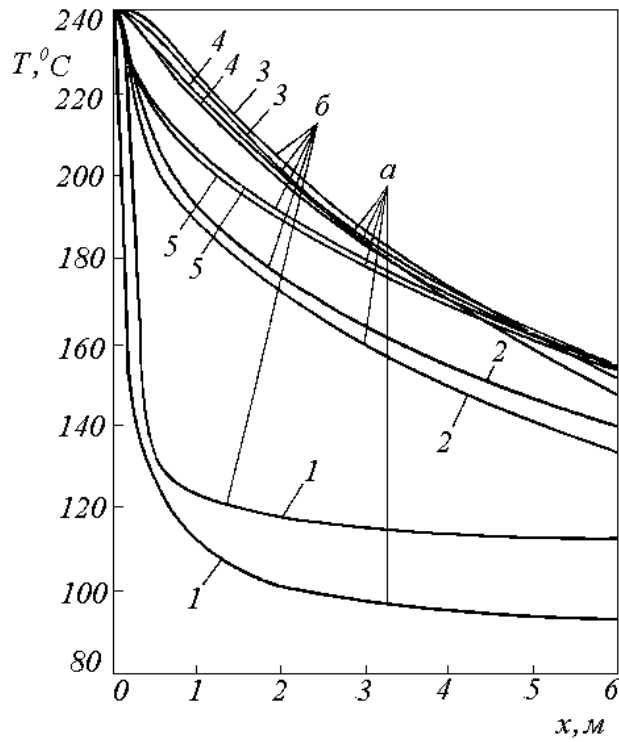


Рис. 6 Вплив швидкості руху плівки на температурний розподіл в композитній плівці: *a* – розрахунок за даними варіанту №7 з табл.1; *б* – розрахунок за даними варіанту №8 з табл.1

Швидкість витяжки або швидкість руху багатошарової полімерної плівки визначає продуктивність охолоджувального пристрою. При заданих витратах повітря, геометрії системи охолодження, температурах плівки на виході з філь'єри і повітряного потоку для заданого складу плівки продуктивність системи охолодження або швидкість руху плівки має обмеження, обумовлене заданою температурою плівки при намотуванні її на валок. Проведено чисельні розрахунки, які ілюструють вплив швидкості руху плівки на її теплові характеристики (див. рис.6). Аналіз отриманих температурних розподілів свідчить про те, що із збільшенням швидкості витяжки температура плівки на виході зростає. Характерною особливістю при цьому є збільшення

температурного перепаду по товщині плівки, тобто із збільшенням швидкості руху плівки температура по перерізу плівки не встигає встановлюватися. Цей ефект зростає із збільшенням товщини композитної плівки, Тому збільшення продуктивності системи охолодження тягне за собою необхідність інтенсифікації теплообміну на її поверхні.

Висновки

1. Розроблена математична модель процесів переносу при струминному повітряному охолодженні багатошарової рукавної полімерної плівки.

2. Проведений чисельний розрахунок та отримано теплові характеристики рукавних полімерних плівок залежно від динамічних і геометричних параметрів системи охолодження.

3. Проведено аналіз впливу основних факторів на продуктивність пристроїв для виробництва багатошарових рукавних полімерних плівок та розроблені рекомендації щодо підвищення продуктивності цих пристроїв.

Список літератури

1. Лукач Ю.Е. Оборудование для производства полимерных пленок./ Ю.Е. Лукач, А.Д. Петухов, В.А. Сенатос. – М.: – Машиностроение. – 1981. – 222 с.

2. Дыбан Е.П., Мазур А.И. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел / Е.П. Дыбан, А.И. Мазур. – К.: Наук. думка, 1982. – 303 с.

3. Новиков В.Г. Сопряженный теплообмен непрерывных тел, движущихся через теплоноситель / В.Г. Новиков // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К.: Ин-т техн. теплофизики АН УССР. – 1984. – 19 с.

4. Гречанный О.А. Теплообмен при струйном обтекании произвольно неизотермической плоской поверхности / О.А. Гречанный, З.И. Наголкина, В.А. Сенатос // Промышленная теплотехника. – 1984. – №6. – С.3–10.

5. Дорфман А.Ш., Гречанный О.А., Новиков В.Г. Сопряженный теплообмен непрерывно движущейся плоской пластины, помещенной в потоке жидкости / А.Ш. Дорфман, О.А. Гречанный, В.Г. Новиков // Теплофизика высоких температур. – 1981. – Т.19. – №5. – С.973–979.

6. Горобец В.Г. Сопряженный теплообмен движущихся полимерных пленок при струйном их обтекании. / В.Г. Горобец, В.А. Сенатос //

Теоретические основы химической технологии. – 1992. – Т.26. – №5. – С.698–706.

7. Gorobets V.G. Heat transfer in a non–isothermal extended surface / V.G. Gorobets.– К.: Компринт, 2014. – 377 с.

8. Кэйс В.М. Конвективный тепло – и массоперенос./ В.М. Кэйс. – М.: Энергия. – 1972. – 446 с.

9. Дорфман А.Ш. Теплообмен при обтекании неизотермических тел. / А.Ш. Дорфман. – М.: Машиностроение. – 1982. – 191 с.

10. Майерс Г.Е. Теплообмен в плоских турбулентных струях у стенки / Г.Е. Майерс, И.И. Шауэр, Р.Х. Юстис // Теплопередача. – 1963. – Т.80. – №3.

11. Калиткин Н.Н. Численные методы. / Н.Н. Калиткин. – М. Энергия, 1972. – 680 с.

12. Березин И.С. Методы вычислений./ И.С. Березин, Н.П. Жидков. – М. Гос. из– во физ.– мат. л– ры, 1966.– Т.2. – 620 с.

References

1. Lukach, Ju. E. Petuhov, A.D., Senatos, V.A. (1981). Oborudovanie dlja proizvodstva polimernih pljonok [Equipment for the production of polymer films]. Mashinostrojenie, 222.

2. Diban, Je. P., Mazur, A. I. (1982). Konvektivnij teploobmjn pri strujnom obtekanii tel [Convective Heat Transfer in jet flow of bodies]. Kyiv: Naukova dumka, 303.

3. Novikov, V. G. (1984). Soprzjzhennij teploobmen neprerivnih tel dvizhuchihsja cherez teplonositel [Conjugate heat transfer of the continuous bodies moving through the coolant]. Institute of Engineering Thermophysics. Ukrainian Academy of Sciences. Kyiv, 19.

4. Grechannij, O. A., Nagolkina, Z.I., Senatos, V.A. (1984). Teploobmen pri strujnom obtekanii proizvolno neizotermicheskoj ploskoj poverhnosti [Heat transfer in the jet flow around an arbitrary non-isothermal flat surface]. Industrial Heat Engineering, 6, 3-10.

5. Dorfman, A. Sh., Grechannij, O. A., Novikov, V. G. (1981). . Soprzjzhennij teploobmen neprerivno dvizhuzhejsja ploskoj plastini pomochjennoj v potokje zhidkosti [Conjugate heat transfer continuously moving flat plate placed in a fluid stream]. High Temperature, 5, 973-979.

6. Gorobets, V. G., Senatos, V. A. (1992). Soprzjzhennij teploobmen dvizhushihsja polimernih pljonok [Conjugate heat transfer motion of polymer films with their jet flow]. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 5, 698-706.

7. Gorobets, V.G. (2014). Heat transfer in a non–isothermal extended surface. 377.

8. Keis, V. M. (1972). Konvektivnij tjeplо– i massoperenos [Convective heat and mass transfer]. Moskow: Energy, 446.

9. Dorfman, A. Sh. (1982). Teploobmen pri obtekanii neizotermicheskih tel [Heat transfer in non– isothermal flow of bodies]. Moskow, Mashinostrojenie, 191.

10. Majers, G. E., Shauer, I.I., Justis, R. H. (1963). Теплообмен в плоских турбулентных струях у стенки [Heat transfer in a plane turbulent jets on wall]. Heat transfer, 80 (3).

11. Kalitkin, N.N. (1972). Численные методы [Numerical methods]. Moscow: Energiya. 680.

12. Berezin, I.S., Jidkov, N.P. Методы вычисления [Calculated methods]. Moscow: Gos. iz- vo fiz.- mat. l- ry , 620.

СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК ПРИ СТРУЙНОМ ИХ ОХЛАЖДЕНИИ

В. Г. Горобец

Аннотация. Разработана математическая модель и проведен численный расчет процессов теплообмена при формировании многослойной рукавной полимерной пленки в условиях струйного ее охлаждения. В результате численных расчетов получены температурные распределения по длине полимерной пленки и найдены области ее кристаллизации. Проанализировано влияние динамических и геометрических параметров на процессы формирования пленки и указаны пути для повышения производительности таких установок.

Ключевые слова: многослойная рукавная полимерная пленка, теплообмен, струйное течение, кристаллизация полимерной пленки

CONJUGATE HEAT TRANSFER OF COMPOSITE POLYMERIC FILMS WITH COOLING BY JETS

V. Gorobets

Abstract The worked out mathematical model and conducted numeral calculation of processes of heat transfer for the forming of many layers sleeve polymeric films. As a result of numeral calculations temperature distributions are got on length of polymeric film and the areas of her crystallization are found. The influence dynamic and geometric parameters on proses of the forming polymeric films are analyzed and the ways of improvement production of this device are found.

Key words: many layers sleeve polymeric film, heat transfer, stream flow, crystallization of polymeric film