

УДК 5324

СПРЯЖЕНИЙ ТЕПЛООБМІН ПЛОСКИХ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК, ОХОЛОДЖУВАНИХ НА БАРАБАНИ

В. Г. Горобець, доктор технічних наук

e-mail: gorobetsv@ukr.net

Анотація. *Проведено аналіз теплофізичних процесів, що протікають на різних ділянках поверхні полімерної плівки, розроблена математична модель теплопереносу з урахуванням контактного термічного опору між плівкою і барабаном. Проведено чисельні розрахунки теплопереносу в полімерних плівках і отримані рекомендації по інтенсифікації процесів теплообміну для розглянутих пристроїв.*

Ключові слова: *полімерна плівка, теплоперенос, барабан, струминна течія, контактний теплообмін*

Полімерні плівки знайшли широке застосування в технологіях при виробництві сільськогосподарської продукції, наприклад, в тепличних комплексах для вирощування овочів, розсади, квітів, тощо, при зберіганні і фасуванні плодоовочевої продукції та в ряді інших технологій. При виробництві полімерних плівок використовують два основних технологічних пристрої – установки для формування рукавних плівок шляхом їх охолодження струминними течіями холодного повітря і установки для виробництва плоских плівок при охолодженні їх на циліндричному барабані[1].

Основний принцип роботи пристроїв при формуванні плоских полімерних плівок з охолоджувальним барабаном полягає в інтенсивному відборі теплоти від полімерної плівки, що витягається з екструдера, шляхом контакту з барабаном, що охолоджується внутрішнім теплоносієм. У початковій області охолодження плівки полімеру на барабані для притиску плівки до його поверхні використовується або притискний валок, або притиск здійснюється

струменем повітря, який витікає з щілинного каналу. При цьому важливо створити оптимальні умови відбору теплоти від полімерної плівки при її охолодженні на стадії розплаву і кристалізації, що дає можливість зекономити ресурси при розробці промислових установок для виробництва плоских полімерних плівок.

Мета досліджень – провести аналіз теплофізичних процесів, що протікають при формуванні плоскої полімерної плівки при охолодженні її на барабані, розробити математичну моделі процесів переносу, виконати чисельний розрахунок параметрів теплопереносу та виробити рекомендації щодо покращення конструкції пристроїв для виробництва плоских полімерних плівок.

Матеріали та методика досліджень. Розглянемо умови переносу теплоти при охолодженні плівки полімеру на барабані при струминному притиску плівки до його поверхні. Схема охолоджувального пристрою представлена на рис.1. Розплав полімеру зфіль'єри подається наметалевий барабан. На початковій ділянці дотику плівки з барабаном на поверхню плівки натікає плоский струмінь повітря, що витікає з щілинного отвору. Передбачається, що напрямок струменя перпендикулярний до поверхні натікання і збігається з лінією дотику плівки і барабана. Струминний потік використовується в двох цілях: 1) для створення підвищеного тиску в області натікання і зменшення контактного термічного опору між барабаном і плівкою; 2) для охолодження полімерної плівки із зовнішньої сторони. В результаті розтікання струменя на зовнішній поверхні плівки відбувається формування приграничних шарів (ПШ).

Один з них формується поблизу точки натікання і зростає по мірі наближення до філь'єри, а інший має протилежний напрям при його формуванні. На рис.1 ділянки формування ПШ позначені, відповідно, I і III. На внутрішній стороні плівки можна виділити три ділянки поверхні, на яких механізм теплообміну має відмінності. В області, позначеній індексом I, ПШ

формується за рахунок руху полімерної плівки, має початок поблизу філь'єри і закінчується близько від барабана. У зоні II відбір теплоти від плівки здійснюється при контакті з барабаном. На цій ділянці важливу роль відіграє контактний термічний опір між ними. В області III ПШ формується поблизу відриву плівки від барабана і розвивається по мірі наближення до намотувального валка.

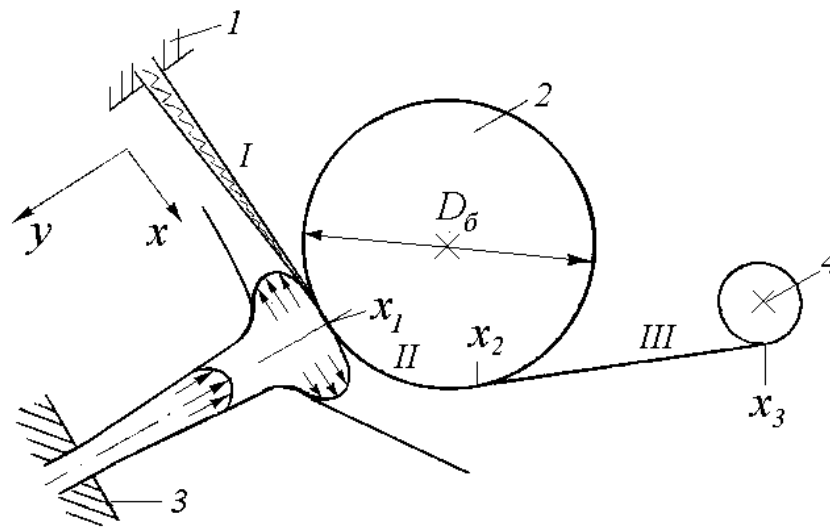


Рис. 1 Схема охолодження полімерної плівки:

1 – філь'єра, 2 – барабан, 3 – щілинний отвір, 4 – намотувальний валок

При розробці математичної моделі були зроблені такі припущення:

- 1) плівка полімеру розглядається як термічно тонке тіло;
- 2) кривизна плівки не має істотного впливу на умови теплообміну;
- 3) вплив філь'єри, барабана і намотувального валка на умови формування

ПШ незначні.

Для розрахунку теплообміну в областях формування ПШ була використана методика, що базується на інтегральних методах розрахунку [2, 3].

При виводі рівнянь переносу теплоти в полімерній плівці виходимо з припущення, що в силу малої провідності матеріалу плівки кондуктивний теплоперенос в поздовжньому напрямку істотно менший складової

теплопереносу за рахунок руху плівки. При цьому рівняння переносу теплоти в плівці має вигляд

$$\rho(T)c_p(T)U_s(x)\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right], \quad (1)$$

де x, y – поточні координати, T – температура плівки, $\rho(T)$ – густина полімеру, $c_p(T), \lambda(T)$ – питома теплоємність і коефіцієнт теплопровідності полімеру, $U_s(x)$ – швидкість руху плівки полімеру.

Умова незмінності витрати полімеру в будь-якому перерізі визначається рівнянням

$$\rho(x)U_s(x)\delta(x)H = const, \quad (2)$$

де δ, H – відповідно товщина і ширина полімерної плівки.

Використовуючи припущення, що перепад температур в поперечному перерізі плівки незначний після осереднення температури плівки по координаті $0y$ $\bar{T} = \frac{1}{\delta(x)} \int_{-\delta/2}^{\delta/2} T dy$, в результаті деяких перетворень рівняння (1)

приходимо до такого рівняння

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = - \frac{1}{\gamma(\bar{T})c_k \rho_k U_{sk} \delta_k} (q_{s1} + q_{s2}), \quad (3)$$

де індекс k відноситься до області кристалізації, індекси 1 і 2 позначають зовнішню і внутрішню поверхню плівки, s відноситься до областей поверхні, що відрізняються механізмом теплопереносу між плівкою і зовнішнім середовищем, а $\gamma(\bar{T}) = c_p(\bar{T})/c_p(\bar{T} = T_k)$. Рівняння (3) записано з урахуванням співвідношення (2), яке виконується для будь-якого перерізу полімерної плівки, в тому числі, після лінії кристалізації.

Гранична умова для рівняння (3) має вигляд

$$\bar{T}(x=0) = T_0, \quad (4)$$

де T_0 – температура полімерної плівки на виході із філь'єри.

Густина теплових потоків, що відводяться q_{s1} , q_{s2} мають різні значення для областей поверхні плівки, де механізми теплопереносу відрізняються між собою. Розглянемо умови теплообміну в кожній з областей.

В області I із зовнішньої сторони плівки (див. рис.1) є два механізми формування ПШ. З одного боку відбувається формування ПШ при струминному натіканні повітря на поверхню, з іншого боку є утворення ПШ за рахунок руху плівки. Тобто на ділянці I спостерігається суперпозиція двох ПШ, що мають різний механізм утворення.

Для реальних охолоджувальних пристроїв швидкість струминної течії лежить в межах $U_j \sim 1-5$ м/с, а швидкість руху плівки $U_s \sim 0,1-5$ м/хв. Оцінки показують, що для таких умов теплообмін за рахунок струминної течії є переважаючим.

Для внутрішньої поверхні стінки ПШ формується за рахунок руху поверхні плівки в нерухомому повітряному середовищі.

Вираз для теплового потоку $q_{1j}(x, \bar{T})$ на поверхні плівки при формуванні ПШ за рахунок струминної течії або руху полімерної плівки на ділянках I, II, III (за виключенням ділянки II на внутрішній поверхні плівки) можна представити у загальному вигляді [м]

$$q_{ji}(x) = \alpha_{ji}^*(|x_i - x|) \left[T(x=x_i) - T_{i,g} + \int_0^x dx' f(|x_i - x|, |x_i - x'|) \frac{dT}{dx'} \right], \quad (5)$$

або

$$q_{js}(x) = \alpha_{ji}^*(|x_i - x|) \left[\bar{T}(x=x_i) - T_{i,g} + \sum_{n=1}^{\infty} g_n (|x_i - x|)^n \frac{d^n \bar{T}}{dx^n} \right], \quad (6)$$

де $f(\xi, x) = \left[-(\xi/x)^{C_1} - C_2 \right]$ – функція впливу необігрітої ділянки поверхні обтікання, $\alpha_{ji}^*(x)$ – коефіцієнт тепловіддачі для ізотермічної поверхні, індекси

$i=1,2$ – позначають відповідно зовнішню і внутрішню поверхню стінки, $j=1,2,3$ – координати, які позначають точки приєднання і відриву полімерної плівки від поверхні барабана (див. рис. 1). Методи визначення коефіцієнтів C_1, C_2 і g_k для ПШ при натіканні струменя на поверхню для ламінарного та турбулентного режимів течії розроблені в роботах [4, 5].

У зоні II з внутрішньої сторони плівки теплоперенос здійснюється при контакті полімерної плівки з поверхнею охолодженого барабана. При переносі теплоти між плівкою і барабаном основну роль відіграє контактний термічний опір, в якому визначальне значення має ступінь шорсткості барабана, а поверхню плівки в першому наближенні можна вважати ідеально гладкою (рис.2).



Рис.2 Схема контакту шорсткої поверхні барабана з полімерною плівкою

Відомі в літературі методи розрахунку контактного термічного опору базуються або на теоретичних передумовах, або використовують емпіричні залежності [6]. Для поверхонь близьких до ідеальних, коли висоту горбків шорсткості можна порівняти з довжиною вільного пробігу молекул повітря, визначальним є молекулярний механізм переносу теплоти від стінки до стінки, який характерний для розріджених середовищ (т.зв. ефект Смолуховського) [6].

При розгляді контактного термічного опору використовують співвідношення [6]

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_m}, \quad (7)$$

де R_k – сумарний термічний опір, R_c – термічний опір, який визначається теплопровідністю теплоносія, що заповнює порожнини між контактуючими тілами, величиною зазору і іншими факторами, а R_m – обумовлений термічним опором власне самих виступів і залежить від їх теплопровідності, тиску в місцях контакту, властивостей матеріалів і інших чинників. При розробці математичної моделі були використані як теоретичні моделі, так і емпіричні залежності [6], які дають незначні відмінності в результатах розрахунку. Для поверхонь з малою шорсткістю враховувалися також ефекти, характерні для середовищ, що мають великий ступінь розрідженості.

Густина відведеного теплового потоку на ділянці II знаходиться з виразу

$$q_{22}(x, \bar{T}) = \alpha_k (\bar{T} - T_b), \quad (8)$$

де, $\alpha_k = \frac{1}{R_k}$, T_b – температура поверхні барабана.

Таким чином, теплоперенос у полімерній плівці для вищенаведених припущень зводиться до розв'язку рівняння (3) з граничною умовою (4), причому величини q_{1i} і q_{2i} приймають різні значення залежно від механізму теплопереносу на різних ділянках поверхні плівки.

Для чисельного розрахунку рівняння (3) з граничною умовою (4) була використана схема розроблена в [7].

З огляду на те, що питома теплоємність полімеру $c_p(\bar{T})$ суттєво залежить від температури плівки \bar{T} , величина $\gamma(\bar{T})$ на інтервалі $T_{i-1} \leq T \leq T_i$ була апроксимована поліномом третього степеня за методом сплайн-інтерполяції [8]:

$$\gamma(T) = A_i + B_i(T - T_{i-1}) + C_i(T - T_{i-1})^2 + D_i(T - T_{i-1})^3. \quad (9)$$

Як вузли інтерполяції $y_i = \gamma(T_i)$ вибрані значення теплоємності, затабульовані в [9]. Коефіцієнти A_i, B_i, D_i задовольняють співвідношенням

$$\begin{aligned} A_i &= y_i, \quad 1 \leq i \leq N, \\ B_i &= \left[(y_i - y_{i-1}) / h_i - \frac{1}{3} h_i (C_{i+1} - 2C_i) \right], \quad 1 \leq i \leq N-1, \\ B_N &= \left[(y_N - y_{N-1}) / h_N - \frac{2}{3} h_N C_N \right], \\ D_i &= (C_{i+1} - C_i) / 3h_i, \quad 1 \leq i \leq N-1, \\ D_N &= -C_N / 3h_N, \end{aligned} \quad (10)$$

а C_i – системі лінійних рівнянь

$$\begin{aligned} C_1 &= 0 \\ h_{i-1} C_{i-1} + 2(h_{i-1} + h_i) C_i + h_i C_{i+1} &= 3 \left[(y_i - y_{i-1}) / h_i - (y_{i-1} y_{i-2}) / h_{i-1} \right], \quad 2 \leq i \leq N, \\ C_{N+1} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Розв'язки системи рівнянь (10), (11) дозволяють визначити коефіцієнти A_i, B_i, C_i, D_i , а, отже, і параметр $\gamma(\bar{T})$ для кожного значення \bar{T} в даному інтервалі зміни температури плівки.

У розрахунках приймалися значення динамічних і геометричних параметрів, характерних для охолоджувальних пристроїв, що використовуються для виробництва полімерних плівок. Зокрема, поверхня барабана розглядалася як гладка полірована і, відповідно, вибиралася ступінь шорсткості для таких поверхонь.

Результати досліджень. Результати чисельного розрахунку представлені на рис. 3–11. Досліджено вплив різних параметрів на умови охолодження полімерної плівки. Як випливає з рис. 3, 4 у процесі охолодження визначальним є теплопереносна поверхні барабана, де коефіцієнти тепловіддачі істотно вищі, ніж на інших ділянках поверхні плівки. Для області натікання струменя на поверхню плівки характерні максимальні значення коефіцієнтів тепловіддачі і саме на цих ділянках відбувається різке охолодження плівки (див. рис. 5–11).

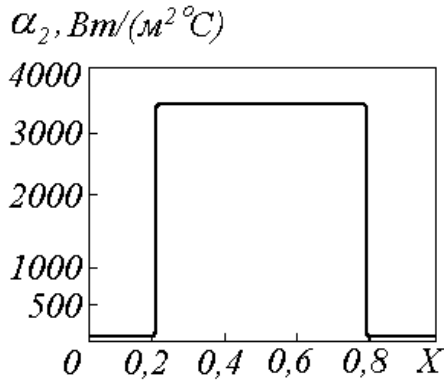


Рис. 3. Локальні значення коефіцієнта тепловіддачі на поверхні плівки з боку барабана

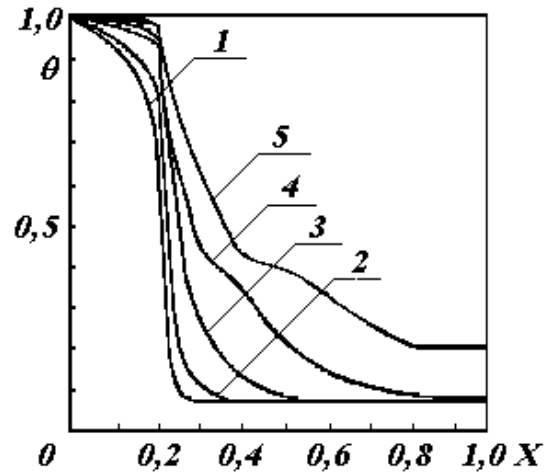


Рис. 4. Локальні значення коефіцієнта тепловіддачі з боку струминного обдування

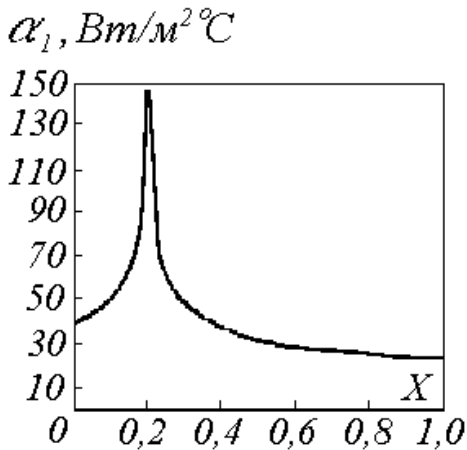


Рис. 5. Розподіл температур по довжині плівки при різній швидкості її руху U_{sk} (м/с):

1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,25; 4 – 0,5; 5 – 1,0 ($\delta_k = 0,5$ мм, $T_0 = 40^\circ\text{C}$, $U_0 = 8$ м/с)

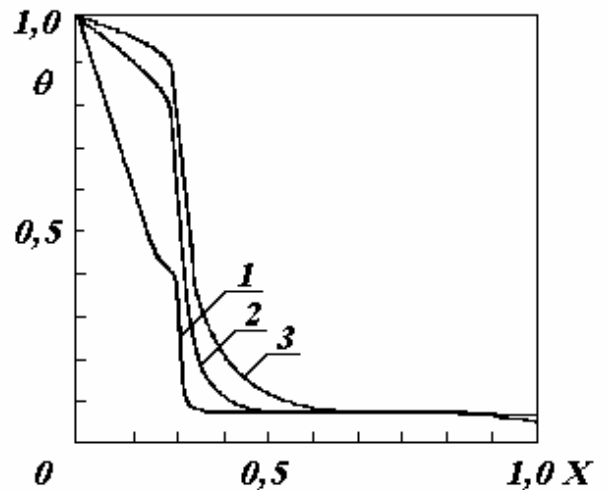


Рис. 6. Вплив товщини плівки δ_k на температурні розподіли по її довжині:

1 – 0,2 мм; 2 – 1,0 мм; 3 – 2,0 мм

Важливим параметром, що визначає продуктивність установки, є швидкість руху плівки. Як впливає з рис. 5, для малих швидкостей руху плівки U_{sk} її температура стає близькою до температури поверхні барабана, проте у

міру збільшення U_{sk} падіння температури в плівці стає не таким різким. Характерно, що для малих швидкостей руху плівки її кристалізація відбувається на початкових ділянках її стикання з барабаном. Варіюючи U_{sk} можна визначити максимальну продуктивність, яка досягається для заданих динамічних і геометричних параметрів установки.

Оскільки на практиці продукується плівка різної товщини, досліджуємо вплив її товщини δ_k на умови охолодження. Як випливає з рис. 6, для більш товстих плівок охолодження відбуватися менш інтенсивно і область кристалізації зміщується нижче від точки дотику плівки і барабана. Це має природне фізичне пояснення – від більш товстої плівки потрібно відвести більше теплоти для охолодження її до заданої температури.

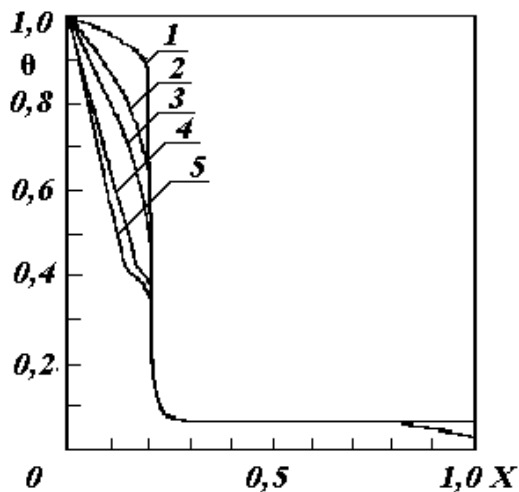


Рис. 7. Температурні розподіли в полімерній плівці при різних значеннях швидкості струминного натікання повітря U_0 на поверхню плівки:

1 – 1 м/с, 2 – 5 м/с, 3 – 10 м/с, 4 – 20 м/с, 5 – 30 м/с

Далі розглянемо вплив динамічних геометричних параметрів системи струминного обдування на умови теплообміну полімерної плівки. Основними параметрами при цьому є швидкість обдування і відстань від щілини сопла до поверхні плівки. На рис. 7 представлені залежності температурних розподілів по довжині плівки від швидкості витікання струменя з щілинного отвору U_0 . Як бачимо, струминне охолодження відіграє визначальну роль на

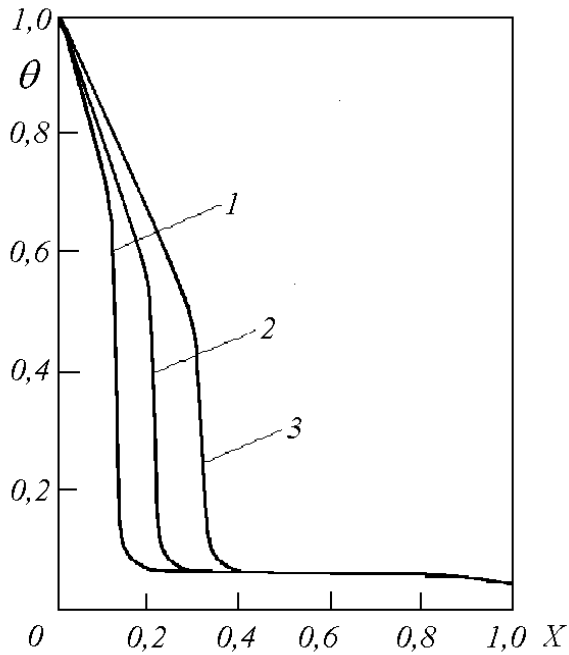


Рис. 8 Вплив відстані від філь'єри до барабана $X_1 = x_1 / L$ на температурні характеристики плівки:

1 – $X_1 = 0,1$; 2 – $0,2$; 3 – $0,3$

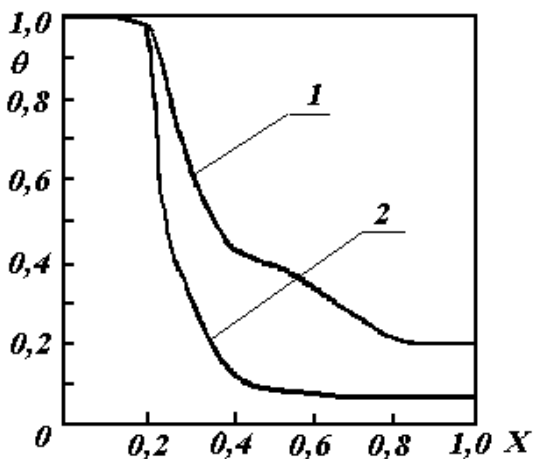


Рис. 9 Вплив температури поверхні барабана T_b на умови охолодження полімерної плівки: 1 – 35°C , 2 – 25°C

ділянці від філь'єри до лінії контакту плівки і барабана. Як показують розрахунки вплив параметра h/l (h – відстань від щілини до поверхні плівки, l – ширина щілини) на умови охолодження невелика і його вибирають в межах $h/l = 6 - 10$.

Ще одним параметром, який може вплинути на умови охолодження є відстань від філь'єри до лінії стикування

плівки з барабаном x_1 . Як впливає з рис. 8, інтенсивність охолодження плівки зростає із збільшенням цієї відстані, проте його варіювання істотно не впливає на процес охолодження для малих швидкостей

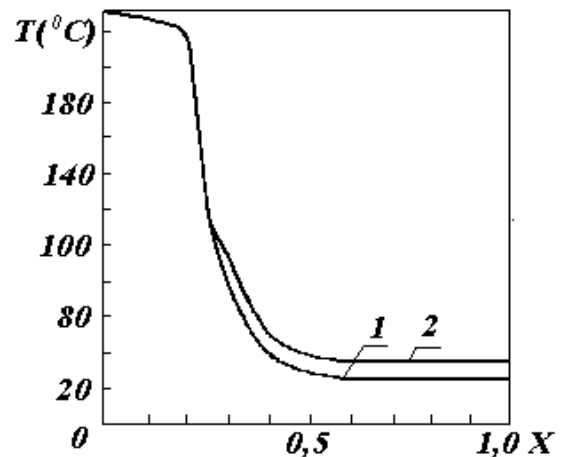
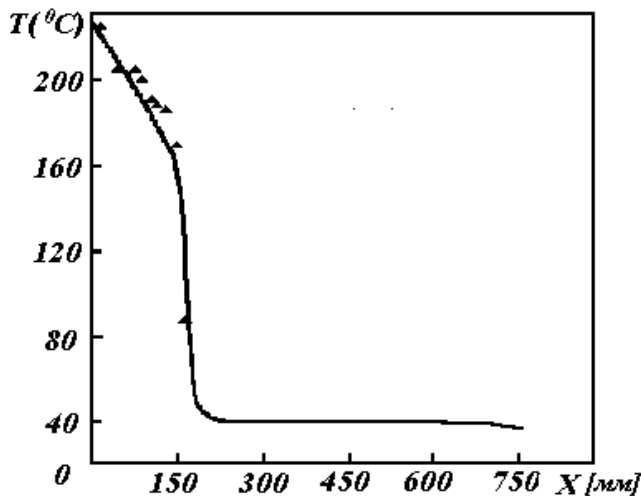


Рис.10 Температура полімерної плівки при наявності між контактуючими поверхнями повітряного (1) і гліцеринового прошарку (2)

руху плівки і стає помітним при великих її значеннях.

Найбільш важливими факторами, що визначають продуктивність охолоджувального пристрою є температура поверхні барабана і ступінь шорсткості його поверхні. На рис.10 представлена зміна температурних розподілів по довжині плівки від температури поверхні барабана T_b . Щоб оцінити вплив ступеня шорсткості і товщини повітряного прошарку між плівкою і барабаном на рис. 9 представлено зміна



**Рис. 11 Порівняння
розрахункових і
експериментальних даних по
температурам полімерної
плівки $T_b = 40^{\circ}C$, $\delta_k = 200$
мкм, $T_0 = 225^{\circ}C$, $U_{sk} = 0,0483$
м/с, $x_1 = 150$ мм**

На рис.11 наведено порівняння результатів розрахункової моделі і експериментальних даних, отриманих в УкрНДІпластмаш Мінхіммашу України. Максимальна похибка в розрахунках не перевищує 12 %.

Висновки

1. Розроблена математична модель процесів теплопереносу при формуванні плоскої полімерної плівки на охолоджувальному барабані.
2. Проведені чисельні розрахунки та визначено вплив основних динамічних, теплофізичних і геометричних параметрів на умови охолодження полімерної плівки.

3. Проведено порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними даними та отримано їх задовільний збіг.

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. Кэйс В. М. Конвективный тепло– и массоперенос / В. М. Кэйс. – М.: Энергия, 1972. – 446 с.
3. Дорфман А. Ш. Теплообмен при обтекании неизотермических тел / А. Ш. Дорфман. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 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. Майерс Г. Е. Теплообмен в плоских турбулентных струях у стенки / Г. Е. Майерс, И. И. Шауэр, Р. Х. Юстис // Теплопередача. – 1963. – Т.80. – №3.
6. Шлыков Ю. П., Ганин Ю. Е., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление / Ю. П. Шлыков, Ю. Е. Ганин, С. Н. Царевский. – М.: Энергия, 1977. – 327 с.
7. Gorobets V. G. Heat transfer in a non–isothermal extended surface / V. G. Gorobets. – К.:Компринт, 2014. – 377 с.
8. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М.: Энергия, 1972. – 680 с.
9. Пивень А. Н. Теплофизические свойства полимерных материалов / А. Н. Пивень, Н. А. Гречаная, И. И. Чернобыльский. – К.: Вища школа, 1971. – 179 с.

СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН ПЛОСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК, ОХЛАЖДАЕМЫХ НА БАРАБАНЕ

В. Г. Горобец

Аннотация. *Проведен анализ теплофизических процессов, протекающих на различных участках поверхности полимерной пленки, разработана математическая модель теплопереноса с учетом контактного термического сопротивления между пленкой и барабаном. Проведены численные расчеты теплопереноса в полимерных пленках и получены рекомендации по интенсификации процессов теплообмена для рассматриваемых устройств.*

Ключевые слова: *полимерная пленка, теплоперенос, барабан, струйное течение, контактный теплообмен*

CONJUGATE HEAT TRANSFER OF PLANE POLYMER FILMS COOLED DRUM

V. Gorobets

Annotation. *The analysis of thermal processes occurring in different parts of the polymer film surface, the mathematical model of heat transfer based contact thermal resistance between the film and the drum. Numerical calculations of heat transfer in polymer films and received recommendations for intensification of heat transfer for the considered devices.*

Keywords: *polymer film, heat transfer, drum, jet flow, heat transfer contact*