

Можливості застосування рідинного охолодження рукавних полімерних плівок

В.С. Гапон, к.т.н., А.Д. Петухов, д.т.н., І.О. Мікульонок, д.т.н., КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

Процес охолодження екструдованої рукавної полімерної плівки істотно впливає на продуктивність плівкової технологічної лінії та на якість готового виробу. Натепер завдяки відносній простоті конструктивно-технологічної реалізації процесу охолодження найбільш поширеним є повітряний спосіб, проте він не завжди може відповідати високій продуктивності базової машини плівкової лінії — черв'ячного екструдера, передусім під час виготовлення товстих полімерних плівок [1]. Актуальність вирішення цієї проблеми також підтверджується необхідністю пакування сотень тисяч тонн гранульованих полімерів і полімерних композиційних матеріалів у герметичні мішки з поліетилену високого тиску (ПЕВТ), виготовлені з плівки завтовшки 200–250 мкм і завширшки до 550 мм без фальцювання.

Істотно підвищити ефективність та інтенсивність охолодження полімерного рукава в процесі виготовлення плівки можна, забезпечивши його взаємодію з плівкою рідини, що стікає по зовнішній поверхні відформованого рукава. При цьому найбільш доцільним методом екструзії рукавної полімерної плівки є метод екструзії полімерного рукава з роздувом за схемою «зверху вниз» (на відміну від повітряного охолодження, коли найприйнятнішою є схема «знизу вгору») [1–3].

Під час вибору технологічних параметрів виробництва рукавних полімерних плівок з їх рідинним охолодженням, а також конструктивного оформлення плівкової технологічної лінії потрібно за заданою величиною масової продуктивності лінії й типорозміром одержуваної плівки (ширина й товщина) правильно задати густину зрошення рукава (або товщину рідинної плівки, що стікає по поверхні рукава), а також визначити межі застосування водяного способу охолодження. Так, порушення стійкості формування рідинної плівки може настати через перевищення сил, що виникають під час течії плівки рідини по поверхні полімерного рукава, над в'язкісними силами полімеру.

Для визначення конструктивно-технологічних параметрів процесу охолодження рукавної полімерної плівки запишемо рівняння, що пов'язує реологічні властивості перероблюваного полімеру з гідродинамічними параметрами системи рідинного охолодження плівкової технологічної лінії. Із цією метою розглянемо рівновагу сил, що діють на полімерний рукав, обмежений двома перерізами: виходом розплаву з кільцевої екструзійної головки та лінією контакту тягнучих валків (рис. 1):

$$\vec{F}_0 + \vec{P} + \vec{G} + \vec{P}_{\text{ном}} + \vec{F}_\sigma + \vec{F}_{\text{тер}} + \vec{F}_{\text{пл}} = 0, \quad (1)$$

де \vec{F}_0 — в'язкопружна розтягувальна сила, що діє у основи рукава (вона є результатом дії решти сил, що діють на рукав), Н; \vec{P} — сила від дії тиску повітря всередині рукава, Н; \vec{G} — вага рукава, Н; $\vec{P}_{\text{ном}}$ — сила швидкісного напору потоку рідини на виході з розподільного пристрою рідинної плівки, Н; \vec{F}_σ — сила витягування рукава з боку тягнучих вал-

ків, Н; $\vec{F}_{\text{тер}}$ — сила тертя рукава по шоках складального пристрою, Н; $\vec{F}_{\text{пл}}$ — сила тертя між рукавом і плівкою рідини, Н. Запишемо залежність (1) у проєкціях на поздовжню вісь рукава:

$$F_0 + P - G - P_{\text{ном}} \cos \gamma - F_\sigma + F_{\text{тер}} - F_{\text{пл}} = 0. \quad (2)$$

Тепер розглянемо кожен зі складових залежності (2) окремо. В'язкопружна розтягувальна сила, що діє на основу рукава:

$$F_0 = 2\pi r_0 \delta_0 \sigma_0, \quad (3)$$

де r_0 — початковий радіус рукава на виході з екструзійної головки, м; δ_0 — початкова товщина заготовки рукава на виході з екструзійної головки, м; σ_0 — поздовжнє напруження розтягу в рукаві на виході з екструзійної головки, Па [4].

Сила від дії тиску повітря всередині рукава [4]:

$$P = \pi (r_k^2 - r_0^2) \Delta p, \quad (4)$$

де r_k — кінцевий радіус рукава в результаті його роздуву, м; Δp — надлишковий тиск всередині рукава, Па.

Вага полімерного рукава становить:

$$G = G_1 + G_2 + G_3, \quad (5)$$

де G_1 — вага рукава на ділянці роздуву, Н; G_2 — вага рукава циліндричної форми на ділянці від місця контакту рукава з рідиною до ділянки складування рукава, Н; G_3 — вага рукава на ділянці від місця складування рукава до тягнучих валків, Н.

Проаналізуємо складові залежності (5).

Вага рукава на ділянці роздуву становить:

$$G_1 = 2\pi r_0 \delta_0 H_1 \rho g \left(\frac{v_0}{v_k - v_0} (H_1 - h) \ln \frac{v_k}{v_0} + h \right), \quad (6)$$

де v_0 — швидкість заготовки рукава на виході з екструзійної головки, м/с; v_k — швидкість сформованого рукава на виході з ділянки роздуву, м/с; H_1 — відстань від початку роздуву заготовки рукава до місця початку контакту рукава з рідиною (довжина ділянки роздуву), м; h — відстань від екструзійної головки до початку роздуву заготовки рукава, м.

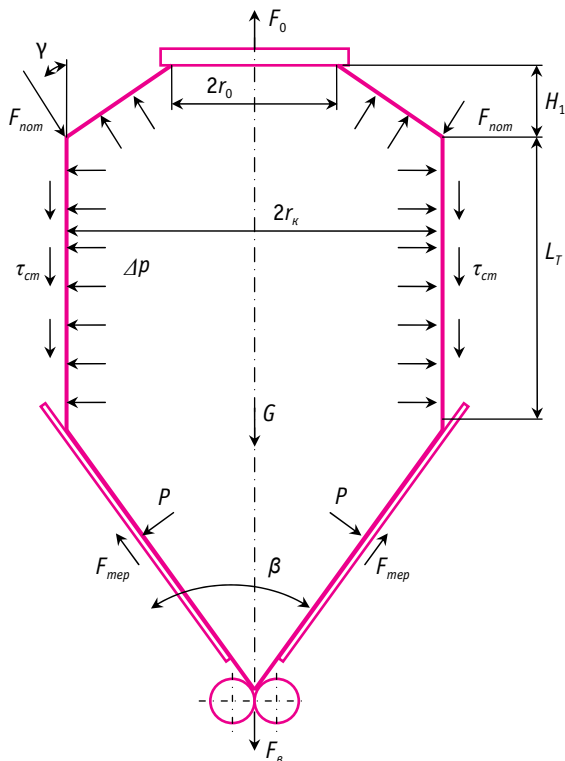
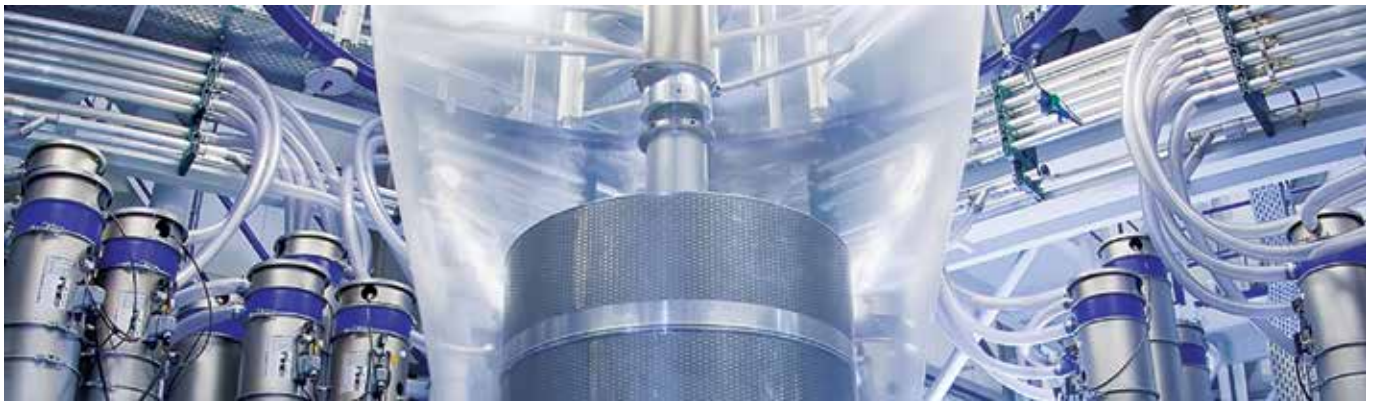


Рис. 1. Схема сил, що діють на полімерний рукав під час рідинного охолодження

Відповідно до практики виготовлення рукавних полімерних плівок їхня стійкість під час охолодження плівкою рідини максимальна в разі, коли $h = 0$. Тоді залежність (6) остаточно набуває вигляду:

$$G_1 = 2\pi r_0 \delta_0 H_1 \rho g \left(\frac{v_0}{v_k - v_0} \ln \frac{v_k}{v_0} \right). \quad (7)$$

Вага рукава циліндричної форми на ділянці від місця контакту рукава з рідиною до ділянки складування рукава:

$$G_2 = 2\pi r_k \delta_k \rho g L_{nl}. \quad (8)$$

Вага рукава на ділянці від місця складування рукава до тягнучих валків:

$$G_3 = 2\pi r_k^2 \delta_k \rho g \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}. \quad (9)$$

Тоді з урахуванням (6)–(9) залежність (5) набуде вигляду:

$$G = 2\pi r_0 \delta_0 H_1 \rho g \left(\frac{v_0}{v_k - v_0} \ln \frac{v_k}{v_0} \right) + 2\pi r_k \delta_k \rho g \left(L_{nl} + r_k \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2} \right). \quad (10)$$

Сила швидкісного напору кільцевого потоку рідини:

$$P_{nom} = \pi r_k H \rho \bar{U}^2, \quad (11)$$

де H – ширина щілини рідинного розподільного кільця, м; ρ – густина рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$; \bar{U} – середня швидкість рідини в точці зустрічі з полімерним рукавом, м/с.

Зусилля тертя рукава по щоках складального пристрою $F_{тер}$ залежить від тиску всередині рукава, коефіцієнта тертя полімеру по матеріалу щік за відомої температури та площі контакту рукава зі щоками.

Зусилля тертя між рукавом і плівкою рідини становить:

$$F_{nl} = S_{cm} \tau_{cm}, \quad (12)$$

де S_{cm} – площа поверхні полімерного рукава завдовжки L_{nl} (від місця початку контакту рукава з рідиною до місця розриву суцільної кільцевої плівки рідини на окремі струминки), м; τ_{cm} – дотичні напруження на межі контакту «полімер – рідина», Па [5]:

$$\tau_{cm} = g \bar{\delta} \rho, \quad (13)$$

де g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; $\bar{\delta}$ – середня товщина плівки рідини на ділянці її стійкої течії завдовжки L_{nl} , м.

Середню товщину плівки рідини на ділянці завдовжки L_m визначимо із залежності [5]:

$$\bar{\delta} = 0,457 \left(\frac{v^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \left[\operatorname{Re}(1 \pm \Pi) \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{для } \operatorname{Re}(1 \pm \Pi) > 1600, \quad (14)$$

де $\Pi = U_0 / \bar{U}$ – симплекс, що враховує відносну швидкість плівки рідини; U_0 – швидкість полімерного рукава, м/с; \bar{U} – середня швидкість течії плівки рідини на ділянці завдовжки L_{nl} , яка дорівнює середній швидкості рідини в точці зустрічі з полімерним рукавом, м/с.

Оскільки об'ємна витрата рідини є постійною (втрати на випаровування в навколишнє середовище нехтуємо),

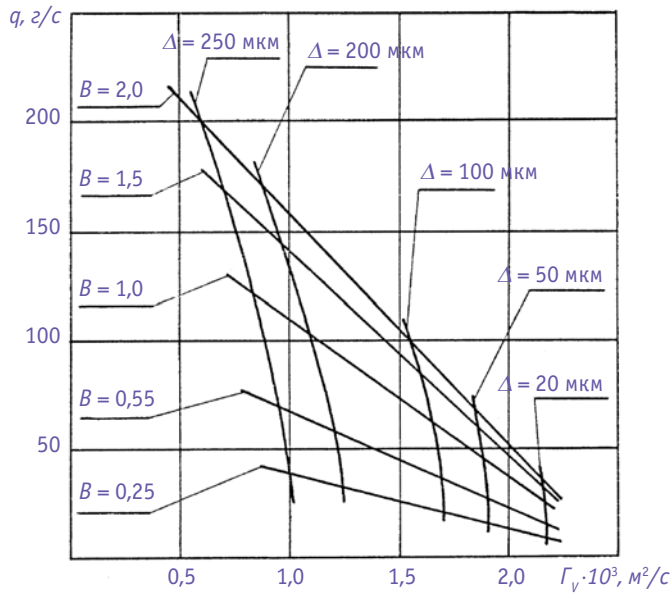


Рис. 2. Номограма для визначення граничних значень об'ємної густини зрошення та продуктивності технологічної лінії від геометричних розмірів полімерної плівки

то з урахуванням виразу для густини зрошення $\Gamma_v = \bar{U}H$ складова швидкісного напору набуде вигляду:

$$P_{ном} = \pi r_k H \rho \bar{U}^2 \cos \gamma = \frac{\pi r_k H \rho \Gamma_v^2 \cos \gamma}{H} \quad (15)$$

Під час аналізу залежності (2) практичне значення має випадок, коли розплав полімеру буде витягуватися не зусиллям з боку тягнучих валків, а власною вагою і силою швидкісного напору потоку рідини \vec{F} . Припустімо, що $F_g = F_{мер}$, тоді залежність (2) набуде вигляду:

$$F_0 + \pi(r_k^2 - r_0^2)\Delta p - G - g\bar{\delta}\rho S_{нл} - \pi r_k H \rho \bar{U}^2 \cos \gamma = 0. \quad (16)$$

Тоді з урахуванням наведених залежностей вираз (16) матиме вигляд:

$$F_0 + \pi(r_k^2 - r_0^2)\Delta p - 2\pi r_0 \delta_0 H_1 \rho g \left(\frac{v_0}{v_k - v_0} \ln \frac{v_k}{v_0} \right) - 2\pi r_k \delta_k \rho g \left(L_{нл} + r_k \text{ctg} \frac{\beta}{2} \right) - g \rho S_{cm} \left(\frac{3v^2}{4g} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left[\frac{4\Gamma_v}{v} \text{Re}(1 + \Pi) \right]^{\frac{1}{3}} - \frac{2\pi r_k \rho \Gamma_v^2 \cos \gamma}{H} = 0. \quad (17)$$

У разі подачі рідини по нормалі до поздовжньої осі полімерного рукава, що зазвичай має місце на практиці, складова швидкісного потоку напору рідини стає рівною нулю.

Тоді з урахуванням, що $S_{cm} = 2\pi r_k L_{нл}$, рівняння рівноваги сил матиме вигляд:

$$2\pi r_0 \delta_0 \sigma_0 + \pi(r_k^2 - r_0^2)\Delta p - 2\pi r_0 \delta_0 H_1 \rho g \left(\frac{v_0}{v_k - v_0} \ln \frac{v_k}{v_0} \right) - 2\pi r_k \delta_k \rho g \left(L_{нл} + r_k \text{ctg} \frac{\beta}{2} \right) - 2\pi r_k g \rho L_{нл} \left(\frac{3v^2}{4g} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left[\frac{4\Gamma_v}{v} \text{Re}(1 + \Pi) \right]^{\frac{1}{3}} = 0. \quad (18)$$

Із залежності (18) визначають значення густини зрошення Γ_v , яке задовольнятиме умову рівноваги сил (1) під час рідинного охолодження полімерного рукава.

Тепер визначимо критичні параметри процесу охолодження полімерного рукава.

У результаті дослідження зазначеного процесу було встановлено, що охолодження за густини зрошення значних значень ($\Gamma_v \geq 50,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, або $\text{Re} \geq 20000$) недоцільне, оскільки в теплообміні бере участь лише пристінний шар рідини. Проте такі великі значення густини зрошення чинитимуть істотне силове навантаження на полімерний рукав. Саме тому під час параметричних розрахунків процесу охолодження потрібно визначити критичне значення об'ємної густини зрошення, яке витримає полімерний рукав певних діаметра й товщини.

Відповідно до рівняння (17) було проведено розрахунок критичного значення об'ємної густини зрошення для рукавних плівок різного типорозміру з ПЕВТ. Оскільки в зазначеному рівнянні невідомими величинами є як Γ_v , так і $L_{нл}$, яка у свою чергу залежить від об'ємної густини зрошення, то розрахунок здійснювали методом послідовних наближень.

За критичними значеннями об'ємної густини зрошення розраховували об'ємну продуктивність технологічної лінії (або швидкість виходу розплаву полімеру з екструзійної головки v_0) за умови досягнення потрібної температури на внутрішній поверхні полімерного рукава.

На рис. 2 наведено номограму для визначення об'ємної густини зрошення охолоджувальної рідини, а також об'ємної продуктивності технологічної лінії залежно від геометричних параметрів готового полімерного рукава. Як видно, найбільший ефект від рідинного охолодження можна досягти під час виготовлення плівок із шириною рукава в складеному вигляді до 1 м.

У результаті проведених досліджень встановлено, що:

1. Параметри рідинної плівки (профіль швидкості, товщина плівки) змінюються лише на вхідній ділянці й залежать від густини зрошення, швидкості полімерного рукава й початкового розподілу швидкості рідинної плівки на виході з розподільного кільця.
2. За високих значень густини зрошення, що забезпечують розвинений турбулентний режим течії плівки рідини (число Рейнольдса понад 20000), у теплообміні бере участь лише пристінний шар рідини.
3. Для ПЕВТ зовнішня поверхня полімерного рукава твердне на відстані близько 0,01 м від початку контак-



ту з рідиною, тому розподільне кільце рідини потрібно встановлювати після закінчення ділянки роздуву заготовки полімерного рукава.

4. Для ПЕВТ внутрішня поверхня полімерного рукава твердне на відстані близько 0,1–0,15 м від початку контакту з рідиною, тому на цій довжині потрібно забезпечити стійкий суцільний рух рідинної плівки по зовнішній поверхні полімерного рукава.
5. Для товстих плівок з ПЕВТ (завтовшки понад 200 мкм) завширшки понад 1 м інтенсивність охолодження обмежена критичною густиною зрошення.

Наведені результати досліджень дають змогу визначити оптимальні конструктивно-технологічні параметри як нового, так і наявного обладнання для одержання рукавних полімерних плівок.

Література

1. Лукач Ю.Е., Петухов А.Д., Сенатос В.А. Оборудование для производства полимерных пленок. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
2. Гапон В.С., Лукач Ю.Е., Петухов А.Д., Радченко Л.Б. Применение жидкостного охлаждения при производстве рукавной полимерной пленки // Химическое машиностроение: респ. межвед. научн.-техн. сб. – К.: Техніка, 1981. – Вып. 33. – С. 25–27.
3. Мікульонюк І.О. Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 312 с.
4. Ведь Г.І., Мікульонюк І.О., Петухов А.Д., Сенатос В.О. Формоутворення рукава полімерної плівки (критичні параметри процесу) // Упаковка. – 2013. – № 2. – С. 50–53.

5. Гапон В.С. Исследование процесса производства пленок из термопластов с жидкостным охлаждением: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химической технологии» / Гапон Виктор Семенович. – К., 1982. – 170 с. *Ж*

Возможности применения жидкостного охлаждения рукавных полимерных пленок

В.С. Гапон, к.т.н., А.Д. Петухов, д.т.н., И.О. Микульонюк, д.т.н.

Определены предельные условия применения жидкостного охлаждения рукавных полимерных пленок из условия обеспечения их механической прочности под действием силовой нагрузки, действующей со стороны стекающей пленки жидкости на полимерный рукав, а также обеспечения необходимой температуры полимерного рукава на выходе из зоны охлаждения. Приведена номограмма для определения предельных значений объемной плотности орошения и производительности технологической линии от геометрических размеров полимерной пленки. Приведены рекомендации по практическому применению метода жидкостного охлаждения рукавных полимерных пленок.

Ключевые слова: экструзия; рукавная полимерная пленка; жидкостное охлаждение; условия применения.

Possibilities of application of liquid cooling of tube polymeric films

V.S. Gapon, Ph. D., A.D. Petukhov, Dr., I.O. Mikulionok, Dr.

Limit conditions of application of liquid cooling of tube polymeric films from a condition of ensuring their mechanical durability under the influence of the power loading operating from the flowing-down liquid film on a polymeric sleeve and also ensuring necessary temperature of a polymeric tube at the exit from a cooling zone are defined. The nomogram for determination of extreme values of volume water concentration and productivity of the technological line from the geometrical sizes of a polymeric film is provided. Recommendations about practical application of tube polymeric films liquid cooling method are provided.

Keywords: extrusion; tube polymeric film; liquid cooling; application conditions.



ЛЕКО-ПЛЮС

- Широкий выбор баночек, тубофлаконов и флаконов для косметики, бытовой химии и медицины
- Разнообразные цветовые решения и формы
- Нанесение любого изображения на флаконы и баночки методом шелкографии и тампопечати www.leko-print.com.ua
- Создание креатива, разработка оригинал-макета

www.leko-plus.com.ua

