

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 66.021.4, 678.027.2, 676.056.71, 66.011

ДВОЙНОС Я. Г., к.т.н., ст. викл.; ПОДИМАН Г.С., аспірант; РУДНИЦЬКИЙ Б.А., магістрант
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРАХУНОК ТЕПЛОБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ КАЛАНДРУВАННІ ЛИСТІВ З ПОЛІЕТИЛЕНУ

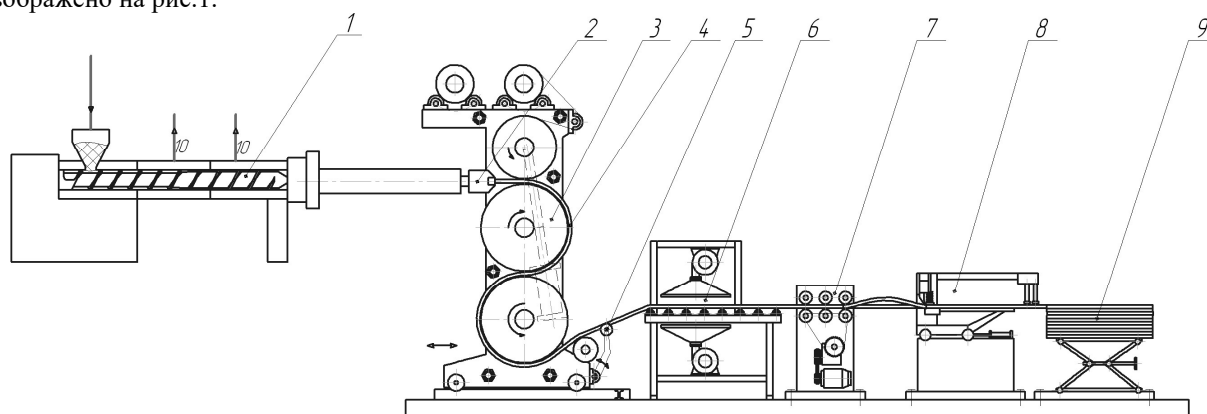
Проведено теоретичний аналіз теплообмінних процесів при каландруванні листів з розплаву по-ліетилену високої густини, проаналізовано технологічні параметри каландрування, та їх вплив на основні параметри якості, сформульовано граничні умови для математичної моделі охолодження листа і умови для чисельного інтегрування рівняння нестационарної теплопровідності з врахуванням теплоти кристалізації, проведено серію чисельних експериментів, визначено вплив товщини листа на вибір температури валів, зроблено висновки щодо вибору теплоносія для валів каландру.

Ключові слова: каландрування, теплообмін, поліетилен, лист.

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2020.219779

© Двойнос Я.Г., Подиман С.Г., Рудницький Б.А., 2020.

Постановка проблеми. Технологічну схему екструзії листів з поліетилену високої густини (HDPE) зображено на рис.1.



1 – екструдер; 2 – формуюча головка; 3 – каландр; 4 – лист з полімерного матеріалу;
5 – пристрій різки кромки; 6 – рольганг охолодження листа; 7 – тягучий пристрій;
8 – пристрій повздожньої різки; 9 – пристрій штабелювання; 10 – потоки теплоносія

Рис. 1 – Лінія виробництва листів з поліетилену високої густини (HDPE)

До основних параметрів якості листів з поліетилену відносяться стабільність геометричних розмірів, площинність, гладкі кромки та шорсткість поверхні. Ці параметри значною мірою визначаються технологічними режимами каландрування, тому дослідження процесу каландрування є важливим, а отримання закономірностей процесу теплообміну при каландруванні листів є актуальним для проектування нового обладнання.

Після формуючої головки (поз. 2 рис. 1) розплав HDPE потрапляє до першого зазору каландра, при цьому температура першого валу має бути достатньою для запобігання утворення твердих включень у «запасі» перед зазором. Для лінійної швидкості $0,01 \div 0,2$ м/с рекомендоване значення температури першого валу (верхнього) $T_{\text{гоп1}} = 125^\circ\text{C}$. Такі умови дозволяють тримати достатній «запас» і вирівнювати різнововщинність заготовки після формуючої головки [1]. При більшій швидкості температура верхнього валу може бути

меншою. Розплав поліетилену після першого зазору каландру механічно зчеплений з поверхнею другого валу і потрапляє у другий зазор каландра вже попередньо охолоджений. Для запобігання проковзування листа у другому зазорі каландру температура поверхні нижнього валу не може бути менше 55°C.

До технологічних обмежень процесу каландрування також відноситься умова виходу листа з каландра при наявності в середньому шарі розплаву, або середньої температури листа не менше 125°C, що обумовлює площинність листа при подальшому охолодженні і склуванні у плоскому стані на рольгангу. Процес склування розплаву полімеру відрізняється широким діапазоном температури, що значно ускладнює розрахунки [2].

Аналіз попередніх досліджень. Теплофізичні параметри HDPE в широкому діапазоні температур від +20°C до +200°C досліджено у роботі [2], авторами запропоновано врахувати теплоту плавлення у рівнянні нестационарної теплопровідності шляхом використання параметру «ефективна теплоємність»:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] + \frac{\Delta H_f}{\rho C_p} \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = a^* \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right], \quad (1)$$

де $a^*(T) = \frac{\lambda(T)}{\rho(T)C_p^*(T)}$ – ефективний коефіцієнт теплопровідності, який враховує теплоту пла-

влення HDPE, $\left(\frac{i}{h}\right)^2$; $C_p(T)$ – теплоємність HDPE; $C_p^*(T)$ – ефективна теплоємність HDPE; $\lambda(T)$ – теплопровідність HDPE; $\rho(T)$ – густина HDPE.

Даний підхід та наведені залежності дозволили в роботі врахувати теплоту кристалізації через ефективний коефіцієнт теплопровідності при використанні чисельних методів інтегрування рівняння нестационарної теплопровідності.

Аналіз нестационарного охолодження пластини проведено у роботах [3, 4], але запропоновані аналітичні рішення для охолодження пластини при відомих коефіцієнті тепловіддачі і температури охолоджуючого середовища не дозволяють їх використати для розрахунку температурних полів в листах HDPE на валах каландру через несиметричність задачі.

Чисельне розв'язання задачі нестационарної теплопровідності при охолодженні та нагріві листів з HDPE при термоформуванні [5, 6] та каландруванні [7], представлення результатів розрахованих температурних полів у даних роботах було використане для розрахунку та аналізу температурних полів при каландруванні листа з HDPE.

Метою статті є визначення закономірностей впливу технологічних параметрів каландрування (товщини листа та температури валів) на процес каландрування листів з HDPE.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

1. Сформулювати математичну модель для процесу охолодження листа з HDPE, який поступово проходить зазори каландру з змінними граничними умовами з врахуванням теплоти кристалізації, яка виділяється в широкому діапазоні температури склування.

2. Провести чисельні експерименти процесу охолодження листа з HDPE в каландрі, проаналізувати результати.

3. Оцінити вплив технологічних параметрів каландрування (температури валів) на процес каландрування.

Виклад основного матеріалу. Фізичну модель процесу охолодження листа в каландрі представлено на рис. 1.

Лист з HDPE в фізичній моделі умовно розгорнуто, зроблено наступні припущення:

1. товщина листа значно менша за діаметр валів каландру, тому використовується ортогональна система координат;

2. перехід розплаву від початкової товщини заготовки S_0 до δ відбувається з лінійною швидкістю πDn (розплав не проковзує по валу), де n – частота обертання валів каландру;

3. теплопровідність HDPE значно менше теплопровідності матеріалу валів, тому температура HDPE в місці торкання до валу дорівнює температурі валу;

4. зменшення товщини листа у другому зазорі не відбувається;

5. дисипація енергії в зазорах не впливає на температурні поля в розплаві;

6. перенос теплоти вздовж листа за рахунок теплопровідності відсутній;

7. ширина листа значно більша за товщину, тому модель процесу охолодження спрощено до од-номірної, без теплообміну впоперек листа.

Відоме рівняння нестационарної теплопровідності процесу охолодження листа в каландрі з врахуванням (1) [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^* \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2)$$

Початкові умови для охолодження листа в каландрі:

$$T(y) = T_m \quad | \quad \tau = 0 \quad (3)$$

Граничні умови для ділянки переходу розплаву в перший зазор (τ_0 – час контакту розплаву з валами перед першим зазором каландру), прийнято довжину зони контакту розплаву з обома валами 3δ):

$$T(y=0) = T_{rool2} \quad T(y=\delta) = T_{rool1} \quad \left| \quad 0 < \tau < \frac{3\delta}{\pi D n} = \tau_0 \quad (4)$$

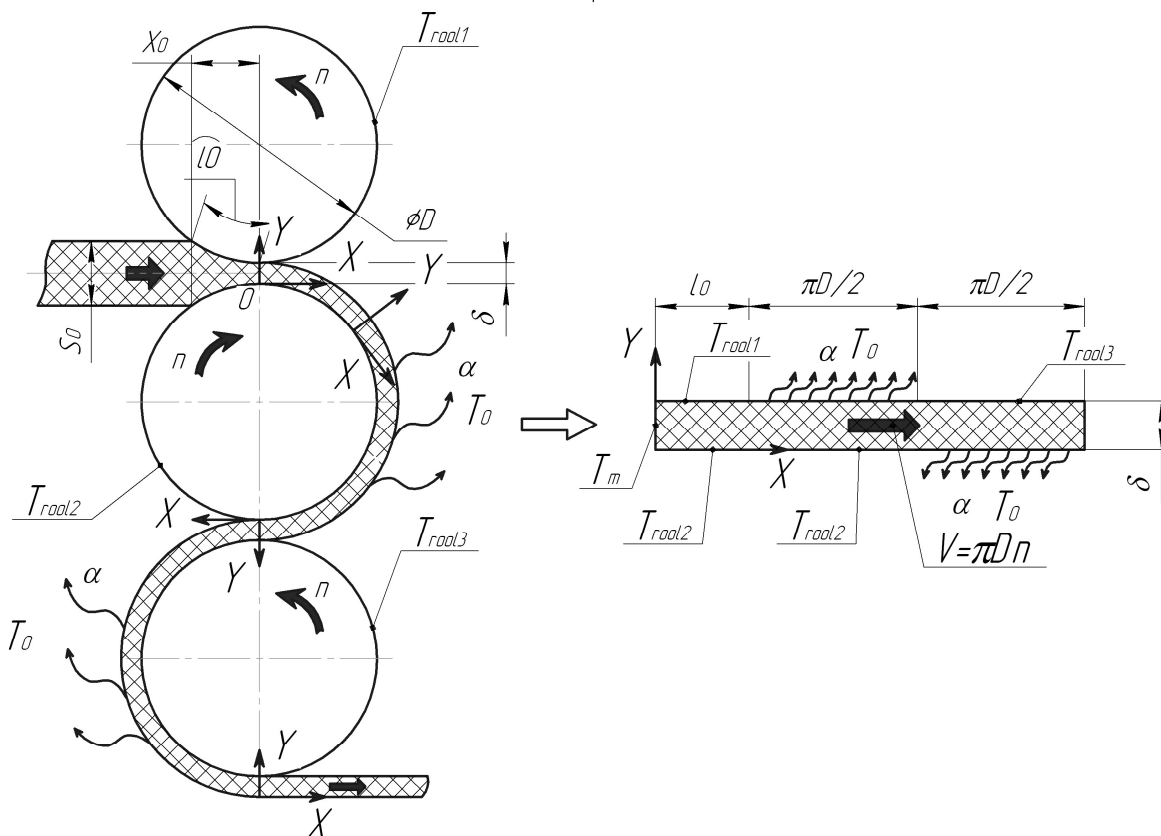


Рис. 2 – Фізична модель процесу охолодження листа в каландрі

Для ділянки руху листа на другому валу каландру:

$$\left| \quad \tau_0 < \tau < \tau_0 + \frac{\pi D}{2 \pi D n} = \tau_0 + \frac{1}{2n} \quad T(y=0) = T_{rool2} \quad (5) \right.$$

Для поверхні листа, що охолоджується повітрям за рахунок вільної конвекції, використовуючи метод контрольного об'єму (метод теплового балансу) [8] для приграничного шару товщиною $dy/2$:

$$\begin{aligned} & \left. \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \rho C_p^* dx \frac{dy}{2} dz = \alpha (T_0 - T) dx dz - \lambda \frac{\partial T}{\partial y} dx dz \right) \right|_{(y=\delta)} \Rightarrow \\ & \rho C_p^* \frac{\partial T}{\partial \tau} \frac{dy}{2} = \alpha (T_0 - T) - \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогічно для дільниці руху листа на третьому валу каландру:

$$\begin{aligned} & \left| \tau_0 + \frac{l}{2n} < \tau < \tau_0 + \frac{l}{n} \quad T(y=\delta) = T_{rool3} \right. \\ & \left. \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \rho C_p^* \frac{dy}{2} = \alpha (T_0 - T) + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right|_{(y=0)} \end{aligned} \quad (7)$$

Перепишемо рівняння у кінцевих різницях, при цьому використаємо сітку, рис. 3.

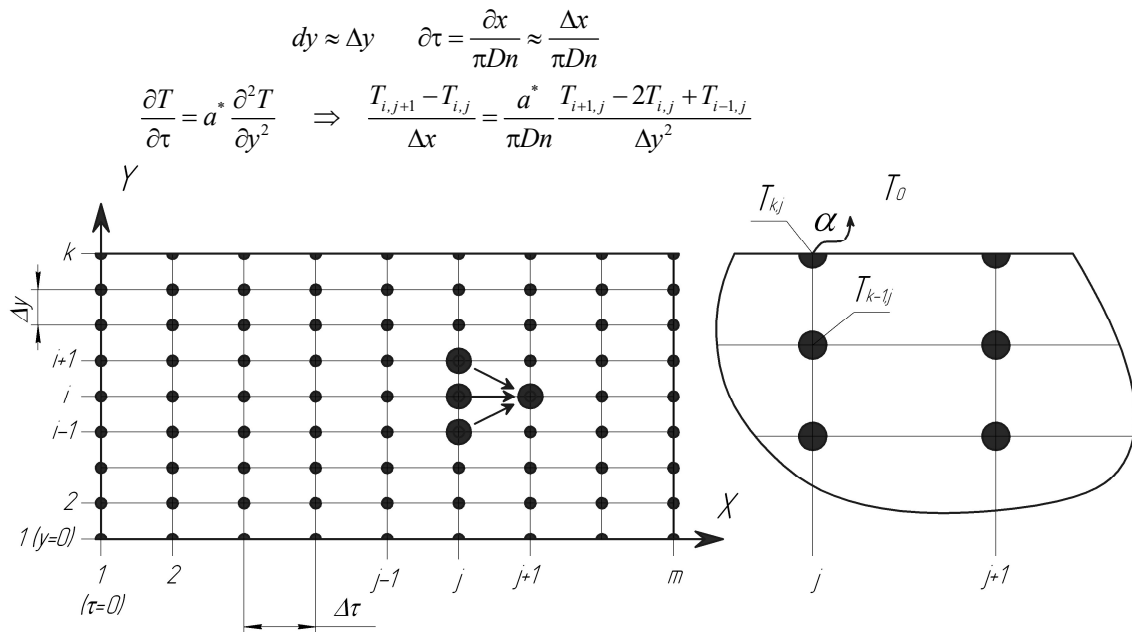


Рис. 3 – Кінцево-різницева схема та позначення для чисельного інтегрування

Для граничних умов (5) першого роду: $T_{1,j} = T_{rool2}$ $T_{k,j} = T_{rool1}$

Для граничних умов (6) першого роду: $T_{1,j} = T_{rool2}$

Для граничних умов (7) першого роду: $T_{k,j} = T_{rool3}$

Для граничних умов (6) третього роду [8], (6):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \rho C_p^* \frac{\partial y}{2} = \alpha (T_0 - T) - \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Rightarrow \frac{T_{k,j+1} - T_{k,j}}{\Delta x} = 2 \frac{\alpha (T_0 - T_{k,j}) - \lambda \frac{T_{k,j} - T_{k-1,j}}{\Delta y}}{\pi D n \rho C_p^* \Delta y}$$

Для граничних умов (7) третього роду [8], (7):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \rho C_p^* \frac{\partial y}{2} = \alpha (T_0 - T) + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Rightarrow \frac{T_{1,j+1} - T_{1,j}}{\Delta x} = 2 \frac{\alpha (T_0 - T_{1,j}) + \lambda \frac{T_{1,j} - T_{1-1,j}}{\Delta y}}{\pi D n \rho C_p^* \Delta y}$$

Умова стійкості різницевої схеми (для явної розрахункової схеми):

$$\Delta\tau < \frac{\Delta y^2}{2a^*} \Rightarrow \Delta x < \frac{\Delta y^2 \pi D n}{2a^*}$$

Теплота, що переноситься від листа до валу розраховувалась за:

$$Q_1 = B \int_{x=0}^{x=3\delta} \lambda \frac{\partial T(x, y = \delta)}{\partial y} dx \quad Q_2 = B \int_{x=0}^{x=3\delta + \frac{\pi D}{2}} \lambda \frac{\partial T(x, y = 0)}{\partial y} dx \quad Q_3 = B \int_{x=3\delta + \frac{\pi D}{2}}^{x=3\delta + \pi D} \lambda \frac{\partial T(x, y = \delta)}{\partial y} dx$$

Теплота, що переноситься від валу до навколишнього середовища:

$$Q_{conv1} = \alpha(T_{rool1} - T_0) \pi D \quad Q_{conv2} = \alpha(T_{rool2} - T_0) \frac{\pi D}{2} \quad Q_{conv3} = \alpha(T_{rool3} - T_0) \frac{\pi D}{2}$$

Теплофізичні параметри HDPE [2]:

$$\frac{1}{\rho} = 1,05 \exp(0,00136T) \quad (T \leq 135^\circ C) \quad \frac{1}{\rho} = 1,14 + 0,0009T \quad (T > 135^\circ C)$$

$$\lambda = 5,665 - 0,87 \ln(T + 273,15) \quad (T \leq 135^\circ C) \quad \lambda = 0,435 \quad (T > 135^\circ C)$$

$$C_p^* = 2,25 \left[1,0 + 5,5 \exp(-a(T - 135)) \right]^2, \quad \text{де } a = 0,005 \quad (T \leq 135^\circ C) \quad a = 0,05 \quad (T > 135^\circ C)$$

Чисельні експерименти проводились для наступних умов: продуктивність по HDPE 500 кг/год = 0,139 кг/с; початкова температура розплаву 235°C; діаметр валів каландру 0,25 м; товщина листа 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 мм. Ширина листа B=1,0 м. Температура першого валу T_{rool1}=125°C, температури валів №2 та №3 за умови середньої температури розплаву на виході з каландру 125°C, температура повітря навколишнього середовища 20°C, коефіцієнт тепловіддачі від листа і валу до повітря $\alpha = 15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$.

Приклад результатів чисельного інтегрування методом Рунге-Кутти (температурні поля та середня температура розплаву) наведено на рис. 4-6.

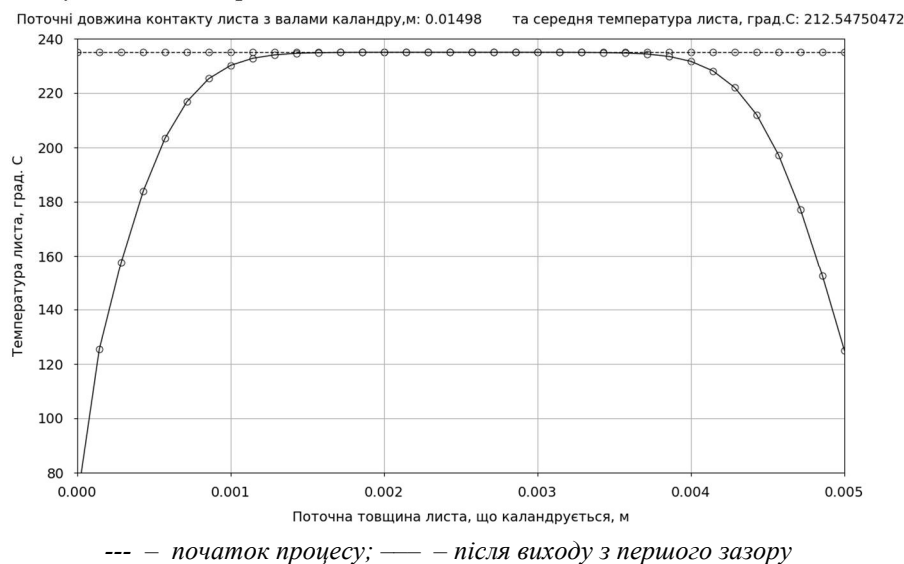


Рис. 4 – Результат роботи програми розрахунку процесу охолодження розплаву HDPE в першому зазорі каландра

Результати чисельних експериментів об'єднано в табл. 1. Для умов чисельного експерименту встановлено, що при каландруванні листів з HDPE товщиною 1,0 та 2,0 мм доведеться обрати високотемпературний теплоносій, що значно ускладнює систему термостабілізації валів, крім того, лист товщиною 1 мм не буде мати глянець через високу температуру валів, а температурна неоднорідність поверхні валу через високу питому теплову потужність може призвести до утворення на поверхні листа центральної смужки без глянцу. Каландрування листів з HDPE товщиною 5 і більше мм для умов чисельного експерименту викликає труднощі через можливий «підрив» листа нагору (за гарячим валом).

Поточні довжина контакту листа з валами каландру, м: 0.40766 та середня температура листа, град.С: 161.161202129

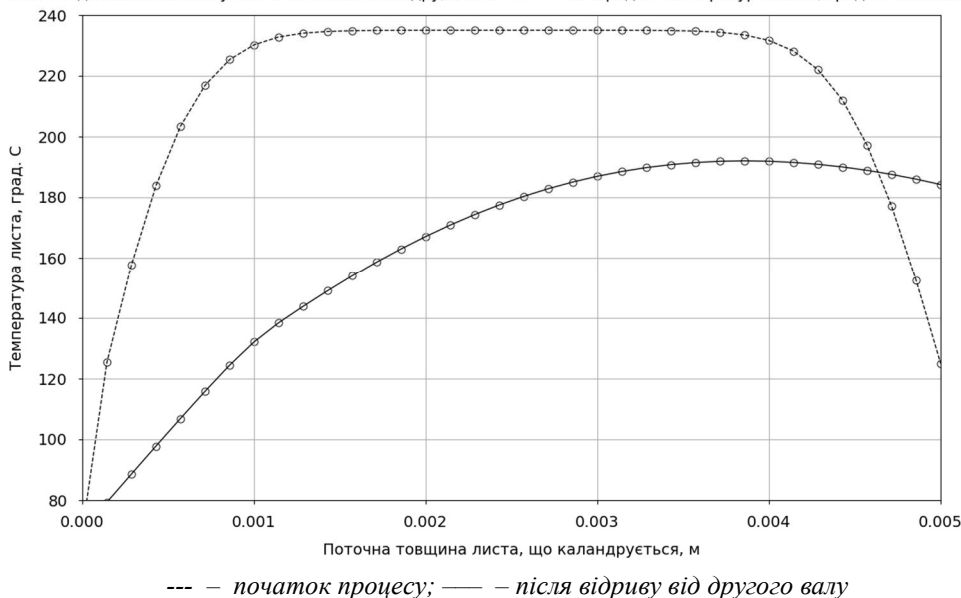


Рис. 5 – Результат роботи програми розрахунку процесу охолодження розплаву HDPE на другому валу каландра

Поточні довжина контакту листа з валами каландру, м: 0.80034 та середня температура листа, град.С: 125.112920428

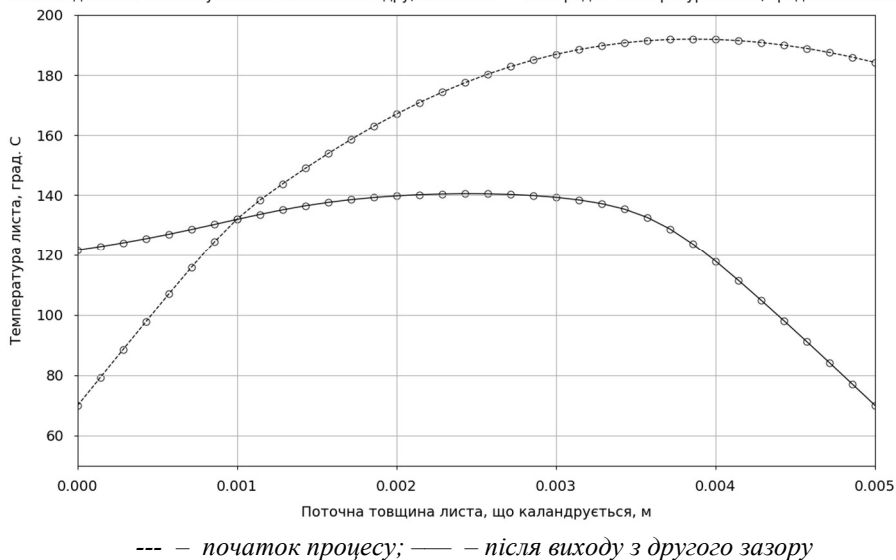


Рис. 6 – Результат роботи програми розрахунку процесу охолодження розплаву HDPE на третьому валу каландра

Таблиця 1 – Розраховані температури валів каландру та потужності нагріву/охолодження

1. Товщи на листа	2. Температу ра валів №2 та №3	3. Теплова потужність, яку треба підвести до валу №1	4. Теплова потужність, яку треба підвести до валу №2	5. Теплова потужність, яку треба підвести до валу №3
мм	6. °С	7. кВт	8. кВт	9. кВт
1,0	112,0	0,7	-31,9	-18,8
2,0	98,5	0,7	-27,3	-21,7
3,0	88,5	0,7	-24,6	-22,8
5,0	70,0	0,7	-22,1	-24,2

Висновки. Сформульовано математичну модель процесу охолодження листа з HDPE на каландрі з врахуванням теплоти кристалізації, технологічні обмеження та вимоги до процесу каландрування. Встановлено, що при каландруванні листів меншої товщини збільшується теплове навантаження на середній вал, та може виникнути необхідність застосування високотемпературних теплоносіїв. Оптимальний температурний режим валів каландру знаходиться у вузькому діапазоні, тому при проектуванні нового обладнання тепловий розрахунок важливий.

Список використаної літератури

1. Бернхард Э. Переработка термопластичных материалов. / Госхимиздат. М., 1962. 747 с.
2. Woo M. W., Wong P., Tang Y., Triacca V., Gloor P. E., Hrymak A. N. and Hamielec A. E. (1995). Melting behavior and thermal properties of high density polyethylene // Polym Eng Sci. Vol. 35, No. 2. pp. 151-156. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.760350205>.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. / Высшая школа. М., 1967. 600 с.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. / «Энергия». М., 1977. 344 с.
5. Shen Y., Li Z., Ren M. and Seol S. (2010). "Modeling and Simulation for Cooling System of Thermoforming" / Second International Conference on Information Technology and Computer Science. 24-25 July 2010. Kiev, Ukraine. pp. 218-220. doi: 10.1109/ITCS.2010.60.
6. Lee Y. S., Kang T. J. and Lee J. K. (1991). A study on heat transfer through plain woven fabric. An approach through finite difference method / Journal of the Korean Fiber Society. Vol. 28, No. 9, P. 707-714.
7. Лукач Ю.Е., Воронин Л.Г., Ружинская Л.И. и др. Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимеров. / Тэника. Киев, 1988. 208 с.
8. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. / Металлургия. Учебник для ВУЗов. М. 1990. 239 с.

Надійшла до редакції 28.09.2020

Dvoinos Y.H., Podyman H.S., Rudnytskyi B.A.

CALCULATION OF HEAT TRANSFER PROCESSES AT CALENDERING OF POLYETHYLENE SHEETS

Introduction. The technological limitations of the calendering process include the condition of leaving the sheet from the calender in the presence of a middle layer of melt, or a sufficient value of the average temperature of the sheet, which determines the flatness of the sheet with subsequent cooling and glazing in a flat state on the roller conveyor. The process of vitrification of the polymer melt has a wide temperature range, which greatly complicates the calculations.

Materials and methods. Processing of high density polyethylene (HDPE) on a calender with three rolls is considered. A series of numerical experiments was performed.

Results and discussion. Boundary conditions for the mathematical model of sheet cooling and conditions for numerical integration of the equation of nonstationary thermal conductivity taking into account the heat of crystallization are formulated, the equation is presented in finite differences, using a grid with a step along the sheet length.

The letter from HDPE in the physical model is conditionally expanded, the following assumptions are made:

1. the thickness of the sheet is much smaller than the diameter of the shafts of the calender, so the orthogonal coordinate system is used;
2. the transition of the melt from the initial thickness of the workpiece to the final occurs at the same linear velocity (the melt does not slip on the shaft);
3. the thermal conductivity of HDPE is much less than the thermal conductivity of the shaft material, so the temperature of the sheet at the point of contact with the shaft is equal to the temperature of the shaft;
4. reduction of sheet thickness in the second gap does not occur;
5. energy dissipation in the gaps does not affect the temperature fields in the melt;
6. heat transfer along the sheet due to thermal conductivity is absent;
7. the width of the sheet is much larger than the thickness, so the model of the cooling process is simplified to one-dimensional, without heat transfer across the sheet.

For the surface of the sheet, which is cooled by air by free convection, the method of control volume (heat balance method) was used for the boundary layer with a thickness of half a step of the grid along the thickness of the sheet. Numerical experiments were performed for the following conditions: HDPE performance 500 kg / h; initial melt temperature 235 °C; diameter of calender shafts 0,25 m; sheet thickness 1.0; 2.0; 3.0; 5.0 mm. Sheet width 1.0 m. The temperature of the first shaft 125 °C, shaft temperatures №2 and №3 were selected under the condition of the average melt temperature at the outlet of the calender 125 °C, ambient air temperature 20 °C, heat transfer coefficient from the sheet and the shaft to air 25 W / (m²K).

An example of the results of numerical integration by the Runge – Kutta method (temperature fields and average melt temperature) is shown in the figures.

The theoretical analysis of heat exchange processes during calendaring of sheets from high density polyethylene melt is carried out, the technological parameters of calendaring and their influence on the main quality parameters are analyzed.

For the conditions of the numerical experiment, it was found that when calendaring sheets with HDPE with a thickness of 1.0 to 2.0 mm will have to choose a high-temperature coolant, which greatly complicates the system of thermal stabilization of the shafts. A 1 mm thick sheet will not have gloss due to the high temperature of the shafts, and the temperature inhomogeneity of the shaft surface due to the high heat flux density can lead to the formation of a central strip on the surface of the sheet without gloss. Calendaring of sheets with HDPE with a thickness of 5 mm or more for the conditions of numerical experiment causes difficulties due to the possible "blasting" of the sheet up (behind the hot shaft).

Conclusions. It is established that when calendaring sheets of smaller thickness, the heat load on the middle shaft increases, and it may be necessary to use high-temperature coolants. The optimal temperature of the calender shafts is in a narrow range, so when designing new equipment, thermal calculation is important.

Keywords: calendaring, heat transfer, polyethylene, sheet.

References

1. Bernhard Je (1962). Pererabotka termoplastichnyh materialov. / Goshimizdat. Moscow. 747 s., USSR.
2. Woo M. W., Wong P., Tang Y., Triacca V., Gloor P. E., Hrymak A. N. and Hamielec A. E. (1995). Melting behavior and thermal properties of high density polyethylene // Polym Eng Sci. Vol. 35, No. 2. pp. 151-156. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.760350205>.
3. Lykov A. V. (1967). Teorija teploprovodnosti. / Vysshaja shkola. Moscow. 600 s.,
4. Miheev M. A., Miheeva I.M. (1977). Osnovy teploperedachi. / «Jenergija». Moscow. 344 s., USSR.
5. Shen Y., Li Z., Ren M. and Seol S. (2010). "Modeling and Simulation for Cooling System of Thermoforming" / Second International Conference on Information Technology and Computer Science. 24-25 July 2010. Kiev, Ukraine. pp. 218-220. doi: 10.1109/ITCS.2010.60.
6. Lee Y. S., Kang T. J. and Lee J. K. (1991). A study on heat transfer through plain woven fabric. An approach through finite difference method / Journal of the Korean Fiber Society. Vol. 28, No. 9, P. 707-714.
7. Lukach Ju.E., Voronin L.G., Ruzhinskaja L.I. i dr. (1988). Avtomatizirovannoe proektirovanie valkovykh mashin dlja pererabotki polimerov. / Tjenika. Kiev. P. 208, USSR.
8. Arutjunov V.A., Buhmirov V.V., Krupennikov S.A. (1990). Matematicheskoe modelirovanie teplovoj raboty promyshlennykh pechej. / Metallurgija. Uchebnik dlja VUZov. Moscow. P. 239. USSR.