

УДК 678.021.001.5

І.О. Мікульонок

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ СТРЕНГ ПІД ЧАС ГРАНУЛЮВАННЯ ТЕРМОПЛАСТІВ****Вступ**

Формування виробів зазвичай здійснюють з попередньо одержаних гранул. Найбільш поширеними методами гранулювання є гарячий і холодний [1]. При недостатньому охолодженні можливе злипання гранул під час їх пакування. Крім того, для кристалічних полімерів структури матеріалу, що формується під час гранулювання та залежить від режиму охолодження, визначає і структуру (кристалічну або аморфну) одержуваних із них виробів, а тому дослідження процесів охолодження має важливе значення для проектування технологічного й допоміжного обладнання [2, 3]. Особливе ж значення цей процес має для термопластів із використанням вторинної сировини, властивості продукції з яких ще більше залежать від режиму термообробки [4].

Процеси охолодження гранул або стренг описують рівняннями нестационарної теплопровідності, для розв'язання якого зазвичай застосовують граничні умови першого [3] або третього [5] роду, тобто вважають відомими температуру поверхні полімеру, яку беруть такою, що дорівнює температурі охолоджувального середовища, або коефіцієнт тепловіддачі до цього середовища. Теоретичне розв'язання задач нестационарної теплопровідності для тіл простої форми є класичною задачею математичної фізики і наводиться в багатьох наукових і навчальних працях. У той же час теоретичні розв'язки цього рівняння не враховують залежності теплофізичних властивостей від температури, що призводить до значних похибок, оскільки полімер охолоджується від в'язкоплинного стану до твердого і при цьому істотно змінюються його властивості. Крім того, внаслідок малих розмірів гранул і діаметра стренг визначення коефіцієнта тепловіддачі досить ускладнене.

Таким чином, для ефективного й коректного аналізу процесів охолодження гранул і стренг були розроблені математичні моделі цих процесів, в яких усунуто потребу визначення коефіцієнтів тепловіддачі і враховано залежність

теплофізичних властивостей від температури [1, 6]. Водночас експериментальна перевірка адекватності розроблених моделей не проводилася.

**Постановка задачі**

Метою статті є експериментальна перевірка математичної моделі процесу охолодження стренг під час гранулювання термопластичних матеріалів екструзійним методом.

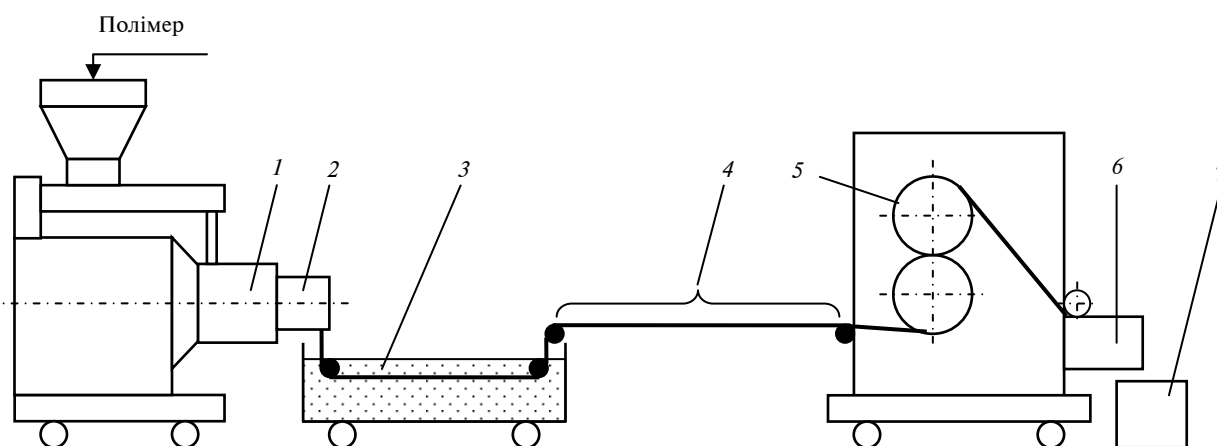
**Опис експериментальної установки і методики проведення експерименту**

Під час гранулювання однією з причин отримання продукції низької якості, зокрема утворення в тарному мішку агломератів і грудок гранул, не придатних без додаткового оброблення для подальшого живлення полімерпереробного обладнання, насамперед екструзійного, є взаємне злипання між собою нагрітих гранул. Це відбувається через поступове вирівнювання температури гранул по радіусу в умовах, коли внаслідок взаємного контакту великої кількості гранул матеріалу з низькою теплопровідністю майже відсутній їх теплообмін із навколишнім повітрям. Крім того, після закупорювання заповненого гранулами тарного мішка наявна на гранулах волога не випаровується в навколишнє середовище, а залишається на поверхні гранул, що також знижує їх якість і часто передбачає необхідність додаткового підсушування гранул перед їх використанням.

Таким чином, відносно низька температура поверхні гранул і стренг під час їх гранулювання є необхідною, але не достатньою умовою одержання якісних гранул. Тому потрібно враховувати в першу чергу середню температуру гранул і стренг після їх охолодження.

Виконані за розробленою методикою [1, 6] результати числового моделювання процесу охолодження стренг були перевірені під час гранулювання відходів виробництва ПЕВТ марки 10803-020 ГОСТ 16337-77 на екструзійній лабораторній лінії кафедри МАХНВ (рисунок, таблиця).

Оскільки дослідження процесу охолодження гранул пов'язано з певними труднощами (насамперед через складність визначення середньої температури гранул), то відповідні дослідження здійснювали лише для стренг. При цьому оскільки безпосереднє визначення температури стренги в часі (по довжині ділянки охолодження) внаслідок її малого діаметра



Екструзійна лабораторна лінія для гранулювання термопластів: 1 – дисково-черв'ячний екструдер; 2 – формувальна стренгова головка; 3 – ванна водяного охолодження; 4 – ділянка повітряного охолодження; 5, 6, 7 – відповідно тяговий, гранулювальний і приймальний пристрої

**Таблиця.** Технічна характеристика екструзійної лабораторної лінії

Параметр	Характеристика
Продуктивність, кг/год	До 200
Параметри каналів формувальної стренгової головки	
діаметр, мм	6
кількість, шт.	24
Розмір одержуваних гранул, мм	3–5
Електропостачання – мережа трифазного струму:	
напруга, В	380/220
частота, Гц	50
Водопостачання:	
тиск, МПа	0,2...0,6
об'ємна витрата при температурі 20 °С, м <sup>3</sup> /год, не більше	2
Потужність, кВт:	
електродвигунів	42,3
нагрівників	10,2
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), м	5600×860×2000
Маса суха, кг	3440

також ускладнено, то адекватність розробленої математичної моделі було перевірено через середню температуру стренги на холодному кінці лінії (у зоні приймального пристрою).

Приймальний пристрій екструзійної лабораторної лінії (див. рисунок) під час проведення дослідів було виконано у вигляді теплоізольованої ємності, заповнюваної певною кількістю води.

Порівняння теоретичних та експериментальних значень середньої температури стренги здійснювали за такою методикою.

Спочатку розглядали порядок визначення теоретичного значення середньої температури. Залежність розподілу температури по радіусу стренги на вході в приймальний пристрій розраховували за методикою, наведеною в працях [1, 6], залежно від початкової температури стренги (покладали, що вона дорівнювала середній температурі розплаву на виході з формувальної екструзійної головки), температури води у ванні охолодження і довжини ділянки водяного охолодження, температури навколишнього повітря і довжини ділянки повітряного охолодження, швидкості руху і діаметра стренги.

Розподіл температури стренги по її поперечному перерізу визначали для  $m$  точок, перша з яких відповідала центру стренги, а остання – її поверхні. Оскільки питомий об'єм матеріалу стренги (або частина площі її поперечного перерізу), що відповідає обчисленій температурі на певному радіусі, збільшується від центра стренги до її периферії, то середню теоретичну температуру стренги в певному поперечному перерізі визначали в такій послідовності.

1. Площа центральної кругової ділянки поперечного перерізу стренги, що відповідає максимальній температурі (середній між  $T_1$  і  $T_2$ ), становила

$$F_1 = \frac{\pi}{4} (2dr)^2,$$

де  $dr$  – крок розрахунку по радіусу стренги ( $dr = d/[2(m-1)]$ ).

2. Площа першої (від центра стренги) кільцевої ділянки поперечного перерізу стренги становила

$$F_2 = \frac{\pi}{4} [(4dr)^2 - (2dr)^2].$$

3. Площа кожної наступної кільцевої ділянки поперечного перерізу стренги визначалася за формулою

$$F_i = \frac{\pi}{4} [(2i dr)^2 - (2(i-1) dr)^2]$$

або

$$F_i = \pi dr^2 (2i - 1). \quad (1)$$

При цьому залежність (1) справедлива для будь-якого значення  $i$ .

4. Беручи до уваги, що площа поперечного перерізу стренги становить  $F = \pi[(m-1)dr]^2$ , значення середньої теоретичної температури стренги в певному поперечному перерізі отримуємо у вигляді

$$T_{\text{п}} = \frac{1}{2(m-1)^2} \sum_{i=1}^{m-1} (T_i + T_{i+1})(2i-1). \quad (2)$$

Тепер розглянемо методику визначення експериментального значення середньої температури стренги.

1. Теплота, закумуляована водою, що міститься в приймальній пристрої, обчислювалася за формулою

$$Q_{\text{в}} = M_{\text{в}} c_{\text{в}} T_{\text{в}}, \quad (3)$$

де  $M_{\text{в}}$  – маса води в приймальній пристрої (масу визначали на вагах ВНЦ-2М, діапазон вимірювань 0–2000 г, границя допустимої похибки 1 г у діапазоні зважування від 10 до 1000 г);  $c_{\text{в}}$  – масова теплоємність води при температурі  $T_{\text{в}}$  (температуру визначали за допомогою термоелектричного перетворювача ТХК-259 (НСХ  $L$ , діапазон вимірювання 0–400 °С), у комплекті з автоматичним потенціометром типу А-565-001-01 з класом точності 0,15/0,05, діапазоном вимірювання від –50 до +800 °С і ступенем дискретизації цифрового відліку 0,1 °С).

2. Теплота, закумуляована полімерними гранулами, що потрапили в приймальний пристрій, обчислювалася у вигляді

$$Q_{\text{п}} = M_{\text{п}} c_{\text{п}} T_{\text{п}}, \quad (4)$$

де  $M_{\text{п}}$  – маса полімерних гранул у приймальній пристрої (масу визначали на вагах ВНЦ-2М

після їх вилучення з приймального пристрою і висушування на лабораторній дослідній установці кафедри МАХНВ);  $c_{\text{п}}$  – масова теплоємність матеріалу гранул при температурі  $T_{\text{п}}$ .

3. Теплота, закумуляована системою вода–гранули в приймальній пристрої, становила

$$Q_{\text{в-п}} = Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}}. \quad (5)$$

4. Маса системи вода–гранули визначалася за формулою

$$M_{\text{в-п}} = M_{\text{в}} + M_{\text{п}}. \quad (6)$$

5. Масову теплоємність системи вода–гранули  $c_{\text{в-п}}$  обчислювали за залежністю

$$c_{\text{тпм}} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i c_i,$$

де  $\bar{x}_i$  і  $c_i$  – масова частка й масова теплоємність  $i$ -го компонента термопластичного матеріалу [7].

6. Середня температура системи вода–гранули становила

$$T_{\text{в-п}} = \frac{Q_{\text{в-п}}}{M_{\text{в-п}} c_{\text{в-п}}}. \quad (7)$$

Відповідно до наведеної методики експериментальне значення середньої температури стренги здійснювали в такому порядку.

Після експериментального визначення величин  $T_{\text{в-п}}$ ,  $M_{\text{в}}$ ,  $M_{\text{п}}$ ,  $M_{\text{в-п}}$  за формулою (6), а також обчислення при температурі  $T_{\text{в-п}}$  значення  $c_{\text{в-п}}$  визначали температуру системи вода–гранули (за залежністю (7)). Потім за формулою (3) обчислювали теплоту, закумуляовану водою, а за залежністю (5) – теплоту, закумуляовану полімерними гранулами  $Q_{\text{п}}$ . Після цього за залежністю (4) знаходили експериментальне значення середньої температури стренг  $T_{\text{п}}$  (при необхідності здійснювали уточнення значення масової теплоємності матеріалу стренг залежно від обчисленої температури і методом послідовних наближень остаточно визначали значення температури  $T_{\text{п}}$ ).

Визначене таким чином експериментальне значення середньої температури стренг  $T_{\text{п}}$  порівнювали з теоретично розрахованим за формулою (2).

#### Аналіз проведення експерименту

Нижче наведено приклад порівняння результатів теоретичних та експериментальних

досліджень середньої температури стренги на холодному кінці лінії.

Було проаналізовано процес охолодження стренги діаметром 4 мм із вторинного ПЕВТ марки 15803-020. Початкова температура стренги на виході з формувальної стренгової головки (див. рисунок) становила 170 °С. Маса води в приймальному пристрої дорівнювала 1,5 кг, її температура – 20,8 °С, маса полімерних гранул у приймальному пристрої – 0,53 кг, а температура системи вода–полімерні гранули – 24,1 °С.

У результаті обчислення за методикою, наведеною в [1, 6], наприкінці ділянки охолодження для 11 точок по радіусу стренги (крок розрахунку по радіусу становить  $dr = 0,2$  мм) отримано такий розподіл температури, °С: 59; 58,5; 57; 55; 52; 48; 44; 39; 34; 29; 23. Середня теоретична температура стренги, обчислена за залежністю (2), становить 39,6 °С (для порівняння середнє арифметичне значення температури дорівнює 45,3 °С).

Далі обчислювалось експериментальне значення середньої температури стренг.

Маса системи вода–полімерні гранули становить  $M_{в-п} = M_{в} + M_{п} = 1,5 + 0,53 = 2,03$  кг. Маса теплоємність матеріалу гранул при температурі системи вода–полімерні гранули дорівнює 2268 Дж/(кг·К) [7], тоді теплоємність системи становить  $c_{в-п} = c_{в} M_{в} / M_{в-п} + c_{п} M_{п} / M_{в-п} = 4190 \times 1,5 / 2,03 + 2268 \times 0,53 / 2,03 = 3688$  Дж/(кг·К), а теплота, закумуляована цією системою,  $Q_{в-п} = M_{в-п} c_{в-п} T_{в-п} = 2,03 \cdot 3688 \cdot 24,1 = 180428$  Дж.

Теплота, закумуляована водою, становила  $Q_{в} = M_{в} c_{в} T_{в} = 1,5 \cdot 4190 \cdot 20,8 = 130728$  Дж, а теплота, закумуляована полімерними гранулами,

$$Q_{п} = Q_{в-п} - Q_{в} = 180443 - 130728 = 49700 \text{ Дж.}$$

Тоді експериментальне значення середньої температури стренг у першому наближенні:  $T_{п} = Q_{п} / (M_{п} c_{п}) = 49700 / (0,53 \cdot 2268) = 41,3$  °С.

Після уточнення значення масової теплоємності матеріалу стренг залежно від обчисленої температури остаточно визначали експериментальне значення середньої температури стренг, яке дорівнювало 36,5 °С, що відрізняється від теоретичного значення (39,6 °С) на 7,8 %.

Порівняння експериментальних і розрахункових даних показує їх задовільну збіжність (розбіжність не перевищувала 15 %), що підтверджує адекватність розробленої математичної моделі процесу охолодження гранул термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини реальному процесу.

При цьому числове моделювання дало можливість обґрунтувати доцільність влаштування повітряної ділянки на виході з ванни водяного охолодження, а також використання саме таких параметрів процесу як водяного, так і повітряного охолодження.

## Висновки

Порівняння теоретичних та експериментальних даних середньої температури екструдованих полімерних стренг дає змогу зробити висновок про адекватність розробленої математичної моделі процесу охолодження стренг під час гранулювання термопластичних матеріалів. Таким чином, розроблені модель і методика розрахунку зазначеного процесу можуть бути рекомендовані для застосування під час проектування, модернізації та експлуатації екструзійного обладнання.

И.О. Микулёнок

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ СТРЕНГ ПРИ ГРАНУЛИРОВАНИИ ТЕРМОПЛАСТОВ

Проведены экспериментальные исследования процесса охлаждения получаемых на экструзионной установке полимерных стренг, а также сравнение полученных результатов с результатами численного моделирования. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает их удовлетворительную сходимость, что подтверждает адекватность разработанной математической модели процесса охлаждения стренг термопластичных материалов реальному процессу.

I.O. Mikulionok

RESEARCH OF STRANDS COOLING PROCESS DURING GRANULATION OF THERMOPLASTICS

We study the cooling process obtained on the extrusion unit of polymeric strands. We also compare the obtained results with the results of numerical modeling. The comparison of experimental and calculation data shows their satisfactory convergence that confirms adequacy of the developed mathematical model of the strands cooling process during granulation of thermoplastics to the real process.

1. *Мікульонок І.О., Радченко Л.Б.* Переробка вторинної сировини екструзією. – К.: ІВЦ «Видавництво “Політехніка”», 2006. – 184 с.
2. *Калинчев Э.Л., Саковцева М.Б.* Научно-технические основы и опыт создания технологических линий стадии конфекционирования конструкционных полимеров. Ч. 1 // Пластические массы. – 2003. – № 11. – С. 27–33.
3. *Основы технологии переработки пластмасс: Учебник для вузов / С.В. Власов, Э.Л. Калинин, Л.Б. Кандырин и др.; Под ред. В.Н. Кулезнёва и В.К. Гусева.* – М.: Химия, 2004. – 596 с.
4. *Вторичная переработка пластмасс / Под ред. Ф. Ла Мантия; Пер. с англ. под ред. Г.Е. Заикова.* – СПб.: Профессия, 2007. – 400 с.
5. *Кузьяев И.М., Сытар В.И., Кулинич В.К.* Моделирование процессов охлаждения гранул при пневмоэкструзионном гранулировании полимеров // Вопр. химии и хим. технологии. – 2004. – № 1. – С. 191–197.
6. *Мікульонок І.О., Радченко Л.Б., Радченко Н.Л., Швед Н.П.* Исследование теплообмена в процессах гранулирования полимеров // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – № 2. – С. 61–68.
7. *Иванченко А.И., Пахаренко В.А., Привалко В.П. и др.* Теплофизические и реологические характеристики полимеров: Справочник. – К.: Наук. думка, 1977. – 244 с.

Рекомендована Радою  
інженерно-хімічного факультету  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
20 листопада 2009 року