

Надолинський О. В.,
Коваленко І. В.

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ-ГРАНУЛЯТУ

У статті представлені результати досліджень з вивчення оптимальних умов процесу сушіння ПЕТ-грануляту. Наведені результати експерименту ізотермічної сушки гранул. Розроблено математичну модель процесу сушіння грануляту до заданого вологовмісту, що є необхідною умовою для стабільності подальшого технологічного процесу. Встановлено оптимальний режим сушіння (температура та час процесу), що сприятиме заощадженню енергетичних та матеріальних ресурсів.

Ключові слова: поліетилентерефталат, ПЕТ-тара, сушіння гранул, математична модель, вологовміст, сушарка.

1. Вступ

Поліетилентерефталат (ПЕТ) є одним з наймасовіших полімерних матеріалів, що використовуються для побутових і технічних цілей. Один з найперспективніших напрямів сьогодні в області упаковки в Україні – тара з поліетилентерефталату. Ця тенденція на вітчизняному ринку повністю відповідає загальносвітовим тенденціям розвитку ринку тари та упаковки. Практично в усіх розвинених країнах виробництво і попит на пластикову тару останнім часом значно збільшується. Шістдесятирічна історія розвитку виробництва полімерних матеріалів на основі ПЕТ включає розробку як методів «прямої» переробки розплавів полімеру безпосередньо після синтезу, так і через стадію одержання «крихти», «грануляту» [1].

Сьогодні ПЕТ використовується у виробництві різних видів упаковок для продуктів і напоїв, косметики і фармацевтичних засобів, ПЕТ матеріали незамінні при виготовленні аудіо, відео і рентгенівських плівок, автомобільних шин, пляшок для напоїв, плівок з високими бар'єрними властивостями, волокон для тканин. Широкий ряд застосувань можливий завдяки винятковому балансу можливостей ПЕТ і того, що в готовому виробі ступінь кристалічності і рівень орієнтації можна контролювати.

Більше 80 % виробів на основі цього полімеру виготовляється з використанням стадії гранулювання. Цей варіант технології дозволяє розділити власне синтез ПЕТ і його цільову переробку у виробі і тим самим забезпечити можливість техніко-економічної оптимізації відповідної продукції. Однак нестабільні умови охолодження і різний розмір крихти, що утворюється, обумовлюють значні технологічні складнощі, що ускладнюють отримання необхідного для формування гомогенного розплаву цього полімеру.

Одним з найвпливовіших факторів при виробництві матеріалів з цього полімеру є сушіння його гранул, адже при мінімальному вмісті вологи в гранулах ПЕТ можливо подальше його виробництво з мінімальним браком продукції. Також встановлення оптимального режиму сушіння грануляту приведе до зниження енергетичних та матеріальних витрат на підприємстві.

2. Постановка задачі

Було поставлено завдання провести експериментальне вивчення закономірностей теплообмінних процесів, що протікають під час сушки ПЕТ-грануляту (процесу, що є визначальним для якості виготовляємої тари на подальших етапах). Розробити математичну модель процесу сушіння до необхідного вмісту вологи.

Метою статті є отримання на основі експериментальних даних відносно параметрів проходження процесу сушіння грануляту ПЕТ рекомендації по оптимальному режиму сушіння, що сприятиме заощадженню енергетичних та матеріальних ресурсів, а також забезпеченню стабільності протікання подальшого технологічного процесу виготовлення тари з поліетилентерефталату.

3. Аналіз літературних даних

Встановлено, що близько 65 % всієї бракованої тари зумовлюють помилки в неправильній сушці сировини, що призводить до виникнення залишкових хімічних реакцій гідролізу ПЕТ вже за температури 150 °С (як на стадії сушки, так і на стадії плавлення) і, як наслідок, гідродеструкції матеріалу [2]. У свою чергу це призводить до втрати механічних властивостей тари (ударної міцності, опору деформації, повзучості і т. д.). Такі приховані дефекти виявляються тільки з часом і вже на стадії виготовлення готової тари і навіть на стадії її заповнення. Волога також прискорює протікання кристалізаційних процесів [3, 4], що ускладнює одержання гомогенного розплаву (дуже важливим є одержання гомогенного, однакового за властивостями висушеного грануляту).

При вивченні такого процесу, як сушіння грануляту, найбільш суттєвими факторами, що впливають на вологовміст матеріалу, є діаметр гранул останнього, час сушіння і температура, при якій проходить технологічний процес [5]. Сушіння гранульованого ПЕТ проводиться в апаратах як безперервної, так і періодичної дії. При виробництві та переробці гранульованих полімерних матеріалів однією зі стадій є глибоке сушіння до вологовмісту (0,01–0,05 % (мас)), причому зазначену величину вологовмісту повинні мати всі одиничні гранули полімеру. Поява великої неоднорідності по вологовмісту

окремих гранул негативно позначається на якості виробів з полімеру (знижується якість поверхні, знижується міцність і т. д.). Настільки низький вологовміст досягається тільки при тривалому часу сушіння в умовах, близьких до ізотермічних. Як прикладом устаткування для якісного сушіння гранул служать шахтні сушарки [6], конвективні сушарки [7] тощо.

Аналіз літературних даних свідчить про недостатню вивченість процесу сушіння грануляту. Зокрема, недостатньо розглянуто фактори, що впливають на сушіння полімеру, час проходження самого процесу та температури сушіння.

4. Методика проведення дослідів

Досліди з вивчення оптимальних умов процесу сушіння ПЕТ-грануляту проводилися на експериментальній вакуум-сушарці типу «п'яна бочка» (рис. 1).

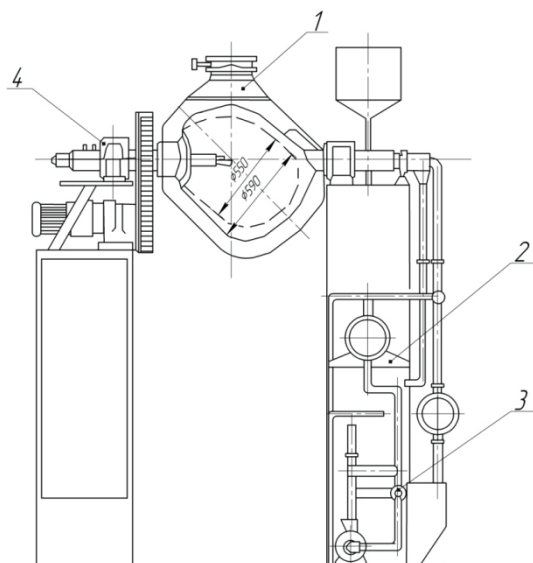


Рис. 1. Змішувач типу «п'яна бочка»: 1 — смішувач для сушіння грануляту місткістю 100 дм³; 2 — вакуумна лінія; 3 — система обігріву; 4 — щит управління

Сушарка змонтована на профільній сталевій рамі. Барабан сушарки виготовлений з нержавіючої сталі і має подвійний кожух по всій поверхні [8]. Теплоносій — мінеральне масло АМТ-100. Завдяки ізоляції поверхня барабана не нагрівається вище 45 °С. У середині барабана встановлена термопара для контролю температури середовища всередині сушарки і патрубок для створення вакууму в барабані сушарки. Барабан сушарки приводиться в обертання за допомогою електродвигуна через двоступінчастий редуктор. Частота обертання — 20 об/хв.

На експериментальній сушильній установці типу «п'яна бочка» було проведено ряд дослідів (8 серій дослідів з 4-кратним дублюванням, отже всього 32 дослідів) з наступними варійованими величинами: діаметром гранул (d), температурою сушки (T) та часом (τ), що потрібен для досягнення необхідного рівня вологовмісту. Межі варіювання параметрів: діаметр (d) — 3,0...4,2 мм, інтервал варіювання 0,6 мм; температура (T) — 140...180 °С, інтервал варіювання 20 °С; час (τ) — 140...420 хв, інтервал варіювання 70 хв.

При досягненні заданої температури сушіння, а також через кожну годину в процесі сушіння, виконують зупинку сушарки та здійснюють відбір проби грануляту для визначення вологості за допомогою спеціальної металевої склянки. На початку і після завершення процесу сушіння виконували вимірювання розмірів гранул, насипної маси і вологості грануляту.

Результати вивчення ізотермічної сушки гранул ПЕТ, залежність вологовмісту гранул W від температури процесу сушіння T зображено графічно (рис. 2).

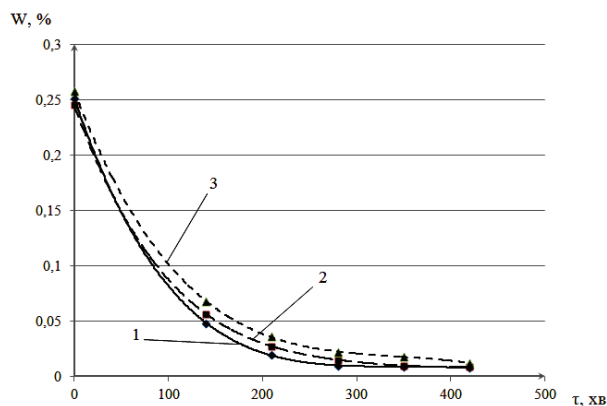


Рис. 2. Тривалість сушіння грануляту при температурі $T = 140$ °С: 1 — діаметр гранул $d = 3$ мм; 2 — діаметр гранул $d = 3,6$ мм; 3 — діаметр гранул $d = 4,2$ мм

Згідно з отриманими експериментальними даними, ми можемо побачити характер зменшення вологовмісту висушуваного грануляту — він є нелінійним, у інтервалі 0,25–0,03 % спостерігається різке зменшення рівня вологовмісту, а згодом швидкість сушки зменшується, наближуючись до нуля.

5. Побудова неповної квадратичної моделі

Модель досліджуваного процесу представимо у вигляді узагальненого рівняння [9]:

$$\hat{y} = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} X_i X_j + b_{123} X_1 X_2 X_3. \quad (1)$$

Стосовно трьохфакторного експерименту рівняння можна записати у вигляді:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3, \quad (2)$$

де X_1 , X_2 , X_3 — кодовані значення рівнів факторів діаметру гранул (d), температури (T) та часу сушіння (τ) відповідно. Кодовані значення рівнів факторів у рівняння можуть приймати значення +1 і -1.

Коефіцієнти рівняння регресії розраховуються за залежністю:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \cdot \bar{y}_u}{N}, \quad (3)$$

де u — номер дослідів; X_{iu} — кодовані значення рівнів варійованих факторів (незалежних змінних $X_1(d)$, $X_2(T)$, $X_3(\tau)$); \bar{y}_u — середні арифметичні значення функції відгуку (вологовмісту).

Розпишемо рівняння для всіх коефіцієнтів, що входять в регресійну модель:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \frac{\sum_{u=1}^N X_{0u} \cdot \bar{y}_u}{N}; & b_1 &= \frac{\sum_{u=1}^N X_{1u} \cdot \bar{y}_u}{N}; \\
 b_2 &= \frac{\sum_{u=1}^N X_{2u} \cdot \bar{y}_u}{N}; & b_3 &= \frac{\sum_{u=1}^N X_{3u} \cdot \bar{y}_u}{N}; \\
 b_{12} &= \frac{\sum_{u=1}^N (X_1 \cdot X_2)_u \cdot \bar{y}_u}{N}; & b_{13} &= \frac{\sum_{u=1}^N (X_1 \cdot X_3)_u \cdot \bar{y}_u}{N}; \\
 b_{23} &= \frac{\sum_{u=1}^N (X_2 \cdot X_3)_u \cdot \bar{y}_u}{N}; & b_{123} &= \frac{\sum_{u=1}^N (X_1 \cdot X_2 \cdot X_3)_u \cdot \bar{y}_u}{N}.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Для розрахунку коефіцієнтів регресії складемо розширену матрицю планування (табл. 1).

Розрахуємо коефіцієнти в рівнянні регресії по залежностям з урахуванням знаків X в стовпцях:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4 + \bar{y}_5 + \bar{y}_6 + \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} = \\
 &= \frac{(32,7 + 47,1 + 17,9 + 22,0 + 7,7 + 11,7 + 5,6 + 5,3) \cdot 10^{-3}}{8} = 18,75 \cdot 10^{-3}; \\
 b_1 &= \frac{-\bar{y}_1 + \bar{y}_2 - \bar{y}_3 + \bar{y}_4 - \bar{y}_5 + \bar{y}_6 - \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} = \\
 &= \frac{(-32,7 + 47,1 - 17,9 + 22,0 - 7,7 + 11,7 - 5,6 + 5,3) \cdot 10^{-3}}{8} = 2,775 \cdot 10^{-3}; \\
 b_2 &= \frac{-\bar{y}_1 - \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4 - \bar{y}_5 - \bar{y}_6 + \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} = \\
 &= \frac{(-32,7 - 47,1 + 17,9 + 22,0 - 7,7 - 11,7 + 5,6 + 5,3) \cdot 10^{-3}}{8} = -6,05 \cdot 10^{-3}; \\
 b_3 &= \frac{-\bar{y}_1 - \bar{y}_2 - \bar{y}_3 - \bar{y}_4 + \bar{y}_5 + \bar{y}_6 + \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} = \\
 &= \frac{(-32,7 - 47,1 - 17,9 - 22,0 + 7,7 + 11,7 + 5,6 + 5,3) \cdot 10^{-3}}{8} = -11,175 \cdot 10^{-3}; \\
 b_{12} &= \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2 - \bar{y}_3 + \bar{y}_4 + \bar{y}_5 - \bar{y}_6 - \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} = \\
 &= \frac{(32,7 - 47,1 - 17,9 + 22,0 + 7,7 - 11,7 - 5,6 + 5,3) \cdot 10^{-3}}{8} = -1,825 \cdot 10^{-3};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b_{13} &= \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2 + \bar{y}_3 - \bar{y}_4 - \bar{y}_5 + \bar{y}_6 - \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} = \\
 &= \frac{(32,7 - 47,1 + 17,9 - 22,0 - 7,7 + 11,7 - 5,6 + 5,3) \cdot 10^{-3}}{8} = -1,85 \cdot 10^{-3}; \\
 b_{23} &= \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 - \bar{y}_3 - \bar{y}_4 - \bar{y}_5 - \bar{y}_6 + \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} = \\
 &= \frac{(32,7 + 47,1 - 17,9 - 22,0 - 7,7 - 11,7 + 5,6 + 5,3) \cdot 10^{-3}}{8} = 3,925 \cdot 10^{-3}; \\
 b_{123} &= \frac{-\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 - \bar{y}_4 + \bar{y}_5 - \bar{y}_6 - \bar{y}_7 + \bar{y}_8}{8} = \\
 &= \frac{(-32,7 + 47,1 + 17,9 - 22,0 + 7,7 - 11,7 - 5,6 + 5,3) \cdot 10^{-3}}{8} = 0,75 \cdot 10^{-3}.
 \end{aligned}$$

Значення коефіцієнтів регресійного рівняння заносимо у табл. 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів у регресійному рівнянні

$b_0(X_0)$	$b_1(X_1)$	$b_2(X_2)$	$b_3(X_3)$
$18,72 \cdot 10^{-3}$	$2,775 \cdot 10^{-3}$	$-6,05 \cdot 10^{-3}$	$-11,175 \cdot 10^{-3}$
$b_{12} = b_4(X_1X_2)$	$b_{13} = b_5(X_1X_3)$	$b_{23} = b_6(X_2X_3)$	$b_{123} = b_7(X_1X_2X_3)$
$-1,825 \cdot 10^{-3}$	$-1,85 \cdot 10^{-3}$	$3,925 \cdot 10^{-3}$	$0,75 \cdot 10^{-3}$

Графічно можна відслідкувати вплив різних коефіцієнтів математичної моделі, показано на рис. 3.

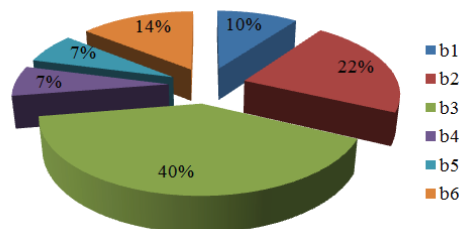


Рис. 3. Вплив коефіцієнтів математичної моделі на вологовміст грануляту, W, %

Якщо ввести позначення $b_{12} = b_4$; $b_{13} = b_5$; $b_{23} = b_6$; $b_{123} = b_7$ і врахувати позначення, прийняті в табл. 1, регресійне рівняння (2) запишеться у вигляді:

$$\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_6X_6 + b_7X_7.
 \tag{5}$$

Таблиця 1

Розширена матриця плану

Номер досліджу	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_4 = X_1X_2$	$X_5 = X_1X_3$	$X_6 = X_2X_3$	$X_7 = X_1X_2X_3$	$\bar{y}_u, \%$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	$32,7 \cdot 10^{-3}$
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	$47,1 \cdot 10^{-3}$
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	$17,9 \cdot 10^{-3}$
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	$22,0 \cdot 10^{-3}$
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	$7,7 \cdot 10^{-3}$
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	$11,7 \cdot 10^{-3}$
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	$5,6 \cdot 10^{-3}$
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$5,3 \cdot 10^{-3}$

6. Перевірка адекватності моделі

Для оцінки адекватності математичної моделі експерименту використовують варіацію апроксимації. Зіставлення розрахункових і експериментальних значень функції і знаходження дисперсії неадекватності [10].

При рівномірному дублюванні експериментів дисперсія неадекватності $S_{\text{неад}}^2$ визначається по залежності:

$$S_{\text{неад}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2}{f_1}; f_1 = N - k', \quad (6)$$

де \hat{y}_u і \bar{y}_u — значення функції відгуку в u -му досліді, відповідно розрахунку за рівнянням регресії і визначені експериментально; f_1 — число ступенів свободи; k' — число залишених коефіцієнтів в рівнянні регресії, включно b_0 ; N — число дослідів плану.

Таким чином, якщо з регресійної моделі виключений, хоча б один статистично незначний коефіцієнт (а це неминуче, якщо варіювані чинники дійсно є незалежними змінними), масив різниць $\hat{y}_u - \bar{y}_u$ буде містити інформацію про похибки в проорокуванні значень функції відгуку.

Регресійне рівняння (5) має 7 коефіцієнтів.

Тоді,

$$f_1 = 8 - 7 = 1; S_{\text{неад}}^2 = \frac{0,45 \cdot 10^{-5}}{1} = 0,45 \cdot 10^{-5}.$$

Гіпотеза про адекватність моделі експерименту перевіряється за критерієм Фішера. Розрахункове значення критерію Фішера знаходиться з рівняння:

$$F_{\text{розр}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2}. \quad (7)$$

Модель адекватна, якщо виконується умова:

$$F_{\text{розр}} < F_{\text{табл}}. \quad (8)$$

Поряд з критерієм Фішера для оцінки адекватності математичної моделі експерименту використовують варіацію апроксимації. Варіація апроксимації не залежить від дисперсії експерименту, а визначається виключно величиною дисперсії неадекватності:

$$V_a = \frac{\sqrt{S_{\text{неад}}^2} \cdot 100\%}{\bar{y}}, \quad (9)$$

де \bar{y} — середнє арифметичне значення функції відгуку всіх дослідів.

Якщо варіація апроксимації не перевищує 10 %, регресійна модель визнається адекватною експерименту незалежно від величини розрахункового критерію Фішера. Якщо варіація апроксимації перевищує 10 %, побудована математична модель неадекватно описує експеримент:

$$V_a = \frac{\sqrt{0,45 \cdot 10^{-5}} \cdot 100\%}{8} = 0,03\%.$$

Для переходу від кодованих значень факторів до їх істинних (натуральних) значень в рівняннях слід провести заміни змінних:

$$X_1 = \frac{x_1 - x_{10}}{\Delta x_1}; X_2 = \frac{x_2 - x_{20}}{\Delta x_2}; X_3 = \frac{x_3 - x_{30}}{\Delta x_3}, \quad (10)$$

де X_1, X_2, X_3 — кодовані значення факторів, які можуть варіюватися від -1 до $+1$ (чинниками є діаметр гранул, температура процесу сушіння і час проходження процесу); X_1, X_2, X_3 — відповідно діаметр гранул, температура процесу сушіння і час проходження процесу сушіння, в одиницях виміру:

$$X_1 = 3,0 \dots 4,2 \text{ мм } (d), X_2 = 140 \dots 180 \text{ }^\circ\text{C } (T),$$

$$X_3 = 140 \dots 420 \text{ хв } (\tau);$$

X_{10}, X_{20}, X_{30} — основний рівень, стосовно якого проводиться варіювання заданих параметрів:

$$X_{10} = 3,6 \text{ мм } (d), X_{20} = 160 \text{ }^\circ\text{C } (T),$$

$$X_{30} = 280 \text{ хв } = 16800 \text{ с } (\tau);$$

$\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3$ — інтервал варіювання заданих параметрів:

$$\Delta X_1 = 0,6 \text{ мм } = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м } (d), \Delta X_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C } (T),$$

$$\Delta X_3 = 120 \text{ хв } = 7200 \text{ с } (\tau).$$

Після заміни змінних рівняння і приймають вигляд:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 18,75 \cdot 10^{-3} + 2,775 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 - 6,05 \cdot 10^{-3} \cdot X_2 - \\ & - 11,175 \cdot 10^{-3} \cdot X_3 - 1,825 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 X_2 - 1,85 \cdot 10^{-3} \times \\ & \times X_1 X_3 + 3,925 \cdot 10^{-3} \cdot X_2 X_3 \rightarrow \hat{y} = 18,75 \cdot 10^{-3} + \\ & + 2,775 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{X_1 - 3,57 \cdot 10^{-3}}{0,6 \cdot 10^{-3}} \right) - 6,05 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{X_2 - 160}{20} \right) - \\ & - 11,175 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{X_3 - 16800}{7200} \right) - 1,825 \cdot 10^{-3} \times \\ & \times \left(\frac{X_1 - 3,57 \cdot 10^{-3}}{0,6 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{X_2 - 160}{20} \right) - \\ & - 1,85 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{X_1 - 3,57 \cdot 10^{-3}}{0,6 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{X_3 - 16800}{7200} \right) + \\ & + 3,925 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{X_2 - 160}{20} \cdot \frac{X_3 - 16800}{7200} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Отже, математична модель, адекватна процесу сушіння ПЕТ-грануляту в залежності від діаметра гранул, температури і часу сушіння, у вигляді лінійної функції може бути представлена наступним чином:

$$\begin{aligned} Y_p = & 18,75 \cdot 10^{-3} + 2,775 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{d - 3,57 \cdot 10^{-3}}{0,6 \cdot 10^{-3}} \right) - \\ & - 6,05 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T - 160}{20} \right) - 11,175 \cdot 10^{-3} \times \\ & \times \left(\frac{\tau - 16800}{7200} \right) - 1,825 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{d - 3,57 \cdot 10^{-3}}{0,6 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{T - 160}{20} \right) - \\ & - 1,85 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{d - 3,57 \cdot 10^{-3}}{0,6 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{\tau - 16800}{7200} \right) + \\ & + 3,925 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{T - 160}{20} \cdot \frac{\tau - 16800}{7200} \right), \end{aligned}$$

де d — діаметр гранул, м; T — температура процесу сушіння, $^\circ\text{C}$; τ — час проходження процесу сушіння, с.

7. Висновки

Результати проведених досліджень свідчать, що процес сушіння ПЕТ-грануляту має нелінійний характер, що може бути пов'язано із поєднанням зовнішньої та внутрішньої задачі вологопереносу. Сушіння грануляту реалізується в два етапи: перший обумовлений різким зниженням вологовмісту при розігріві системи до заданої температури, W знижується від вихідного вологовмісту до 0,06 % (мас) і нижче, а другий пов'язаний із протіканням власне масопереносу води в ПЕТ, тобто до кінцевого необхідного W . За проведеними експериментами та їх аналізом, ми дійшли висновку, що для досягнення необхідного вологовмісту при сушінні гранул різного діаметру достатньо 4-х годин, і з точки зору технологічного процесу для досягнення $0,01\% < W < 0,005\%$ час у 4 години і за температури 140 °С є доцільним для сушіння гранул будь-якого розміру, адже у такому випадку зникає ризик залишку недосушеного матеріалу. Очевидно, що на першому етапі відбувається видалення вологи з поверхневих шарів гранули, а другий визначається швидкістю дифузії води в полімерному субстраті. Недоліками даного експерименту є недосконалість установка для сушіння гранул, яку необхідно модернізувати для поліпшення режиму сушіння, а також необхідно попередньо відсортувати матеріал для різних партій грануляту.

Побудовано математичну модель процесу сушіння ПЕТ-грануляту на основі багатофакторного експерименту, показано вплив коефіцієнтів рівняння математичної моделі на вологовміст. Можемо побачити, що найбільший вплив має саме час проходження процесу сушіння, температура сушіння та діаметр гранул матеріалу.

Отже, запропонований режим сушіння грануляту ПЕТ сприятиме заощадженню енергетичних та матеріальних ресурсів для підприємств, пов'язаних з даною галуззю виробництва.

Література

1. Оссвальд, Т. Лиття пластмас під тиском [Текст] / под ред. Т. Оссвальда, Л.-Ш. Тунга, П. Дж. Гремманна; пер з англ. під ред. Е. Л. Калінчева. — СПб: Професія, 2006. — 712 с.
2. Таврогинская, М. Г. Влияние степени влажности и параметров сушки на свойства и переработку отходов ПЭТФ [Текст] / М. Г. Таврогинская, В. В. Тимошенко // Вестник УО «ВГТУ». — 2008. — Т. 22, № 14. — С. 204–212.
3. Van der Meer, D. W. Oriented Crystallization and Mechanical Properties of Polypropylene Nucleated on Fibrillated Polytetrafluoroethylene Scaffolds [Text] / D. W. Van der Meer, D. Milazzo, A. Sanguineti, G. J. Vancso // Polymer Engineering & Science. — 2005. — Vol. 45, Issue 4. — P. 458–468. — DOI: 10.1002/pen.20297.
4. Bernland, K. Nucleating Polymer Crystallization with Poly (tetrafluoroethylene) Nanofibrils [Text] / K. Bernland, P. Smith // Journal of Applied Polymer Science. — 2009. — Vol. 114, Issue 1. — P. 281–287. — DOI: 10.1002/app.30425
5. Callister, W. D. Fundamentals of Material Science and Engineering. An Integrated Approach [Text] / W. D. Callister, R. G. Rethwisch. — Ed. 3. — John Wiley & Sons, Inc., 2007. — 32 p.
6. Шахтная аэрожелобная сушилка [Текст]: пат. 2506508 Рос. Федерация: МПК F26B17/14 / Волхонов М. С., Курилов С. В. (РФ); заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Теплый ветер». — № 2011144972/06; заявл. 07.11.2011; опубл. 10.02.2014. — 5 с.
7. Сушилка для сыпучих материалов [Текст]: пат. 2282804 Рос. Федерация: МПК F26B15/06 / Налбандян А. В.; заявитель и патентообладатель Налбандян А. В. — № 2005128898/06; заявл. 15.09.2005; опубл. 27.08.2006. — 7 с.
8. Генкин, А. Э. Оборудование химических заводов [Текст] / А. Э. Генкин. — М.: Высшая школа, 1986. — 280 с.
9. Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии [Текст] / В. В. Кафаров. — М.: Химия, 1985. — 468 с.
10. Фролов, В. Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов [Текст] / В. Ф. Фролов. — Л.: «Химия», Ленинградское отделение, 1987. — 208 с.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СУШКИ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ-ГРАНУЛЯТА

В статье представлены результаты опытов по изучению оптимальных условий процесса сушки ПЭТ-гранулята. Приведены результаты эксперимента изотермической сушки гранул. Разработана математическая модель процесса сушки гранулята с заданным влагосодержанием, что является необходимым условием для стабильности дальнейшего технологического процесса. Установлен оптимальный режим сушки (температура и время процесса), что будет способствовать экономии энергетических и материальных ресурсов.

Ключевые слова: полиэтилентерефталат, ПЭТФ-упаковка, сушка гранул, математическая модель, влагосодержание, сушилка.

Надолинський Олександр Володимирович, кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: PsyLeaf@i.ua.

Коваленко Ігор Валентинович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: ivkov_pak@ukr.net.

Надолинский Александр Владимирович, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Коваленко Игорь Валентинович, кандидат технических наук, доцент, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Nadolynskiy Oleksandr, National Technical University of Ukraine «Kiyv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: PsyLeaf@i.ua. Kovalenko Ihor, National Technical University of Ukraine «Kiyv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: ivkov_pak@ukr.net