

**УДК 665.9**

**С. О. ПРИСТАЙЛОВ**, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПИ», Киев;  
**С. А. ВЛАСЮК**, студент, НТУУ «КПИ», Киев

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ И ФАКТОРОВ ПРОЦЕССА СУШКИ ПЭТФ-ГРАНУЛЯТА**

Разработана математическая модель процесса сушки ПЭТФ-гранулята до заданного влагосодержания, что является необходимым условием для стабильности дальнейшего технологического процесса.

**Ключевые слова:** ПЭТФ-гранулят, сушка гранул, многофакторный эксперимент, смеситель типа пьяная бочка, изготовление ПЭТФ-тары.

**Введение.** На сегодняшний день накоплен определенный объем научно-технической информации о возможности стабильного проведения процесса перевода гранулированного полимера в состояние расплава [1] (вязкотекучее состояние) при оптимизации режимов его сушки [2]. Необходимо учитывать, что: лишь при влагосодержания полимера менее 0,01% может быть получен достаточно стабильный во времени расплав [3], продолжительность плавления каждой частицы полимера должна быть одинаковой [4], что обусловлено идентичностью размеров и структуры гранул [5].

**Формирование задачи исследований.** Была поставлена задача разработать математическую модель процесса сушки ПЭТФ-гранулята до необходимого влагосодержания (0,01-0,005%) в заданных пределах.

**Экспериментальная установка.** Опыты по изучению оптимальных условий процесса сушки ПЭТФ-гранулята проводились на экспериментальной вакуум-сушилке типа «пьяная бочка», изображенной на рис. 1.

Сушилка смонтирована на профильной стальной раме. Барабан сушилки изготовлен из нержавеющей стали и имеет двойную рубашку по всей поверхности. Теплоноситель - минеральное масло АМТ-100. Благодаря изоляции поверхность барабана не нагревается выше 45°C. Внутри барабана установлена термopара для контроля температуры среды внутри сушилки и патрубков для создания вакуума в барабане сушилки. Барабан сушилки приводится во вращение с помощью

электродвигателя через двухступенчатый редуктор. Частота вращения - 20 об/мин.

#### **Методика проведения исследований**

При изучении такого процесса, как сушка гранулята, наиболее существенными факторами [6], влияющими на влагосодержание высушиваемого материала, является

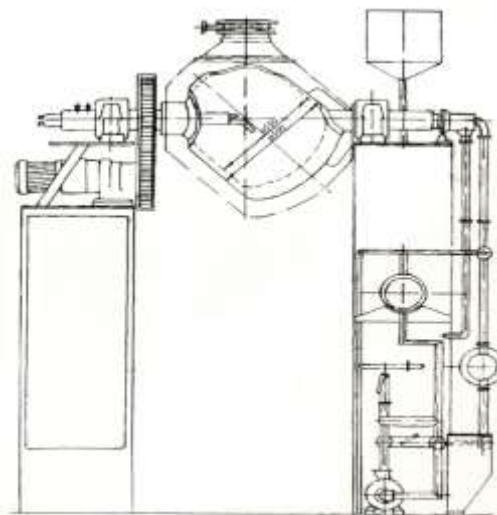


Рис. 1 - Смеситель типа пьяная бочка, состоящий из емкости для сушки гранулята вместимостью 100 дм<sup>3</sup>, вакуумной линии, системы обогрева и щита управления

диаметр гранул последнего, время сушки и температура, при которой проходит технологический процесс.

Серия опытов по сушке ПЭТФ-гранулята проводилась по составленной матрице планирования с равномерным дублированием экспериментов. Всего было произведено 8 серий опытов. Каждый опыт дублировался 4 раза, следовательно, дублирование является равномерным. Итого было проведено 32 опыта.

Варьируемыми факторами были взяты: диаметр гранул ( $d$ ), температура сушки ( $T$ ) и время ( $\tau$ ), необходимое для достижения допустимого уровня влагосодержания. Границы варьирования параметров: диаметр ( $d$ ) - 2,98 ... 4,16 мм, интервал варьирования 0,59 мм, температура ( $T$ ) - 140 ... 180°C, интервал варьирования 20°C; время ( $\tau$ ) - 175 ... 415мин, интервал варьирования 120мин.

### Построение регрессионной модели в виде степенной функции

#### 1. Расчет коэффициентов регрессии

Уравнения регрессии в виде степенной функции относительно полного трёхфакторного эксперимента записывается следующим образом:

$$\hat{y} = a_0 \cdot (a_1)^{X_1} \cdot (a_2)^{X_2} \cdot (a_3)^{X_3} \cdot (a_{12})^{X_1 \cdot X_2} \cdot (a_{13})^{X_1 \cdot X_3} \cdot (a_{23})^{X_2 \cdot X_3} \cdot (a_{123})^{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3}, \quad (1)$$

где  $a_1, a_2, a_3, a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{123}$  – коэффициенты.

После логарифмирования обеих частей уравнения (1) получим:

$$\ln(\hat{y}) = \ln(a_0) + X_1 \cdot \ln(a_1) + X_2 \cdot \ln(a_2) + X_3 \cdot \ln(a_3) + X_1 \cdot X_2 \cdot \ln(a_{12}) + X_1 \cdot X_3 \cdot \ln(a_{13}) + X_2 \cdot X_3 \cdot \ln(a_{23}) + X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot \ln(a_{123}). \quad (2)$$

Введем следующие обозначения:

$$\ln(\hat{y}) = Z; \quad \ln(a_0) = b_0; \quad \ln(a_1) = b_1; \quad \ln(a_2) = b_2; \quad \ln(a_3) = b_3; \\ \ln(a_{12}) = b_{12}; \quad \ln(a_{13}) = b_{13}; \quad \ln(a_{23}) = b_{23}; \quad \ln(a_{123}) = b_{123}.$$

Тогда уравнение (2) принимает вид:

$$Z = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3. \quad (3)$$

После нахождения в уравнении (3) неизвестных коэффициентов  $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$  следует провести обратную замену переменных:

$$\hat{y} = e^Z \quad (4)$$

Коэффициенты в уравнении (3) рассчитываются по зависимости:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{i_u} \cdot Z_u}{N}, \quad (5)$$

где  $Z_u$  – новая переменная,  $Z_u = \ln(\bar{y}_u)$ ,  $\bar{y}_u$  – средние арифметические значения функции отклика.

Расширенная матрица планирования для расчета коэффициентов в уравнении (3) имеет вид, показанный в табл. 1.

Таблица 1 - Расширенная матрица плана  $2^3$  для регрессионной модели в виде степенной функции

Номер опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4 = X_1 X_2$	$X_5 = X_1 X_3$	$X_6 = X_2 X_3$	$X_7 = X_1 X_2 X_3$	$\bar{y}_u, \%$	$Z_u = \ln(\bar{y}_u)$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	$32,7 \cdot 10^{-3}$	-3,42
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	$47,1 \cdot 10^{-3}$	-3,055
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	$17,9 \cdot 10^{-3}$	-4,022
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	$22,0 \cdot 10^{-3}$	-3,817
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	$7,7 \cdot 10^{-3}$	-4,867
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	$11,7 \cdot 10^{-3}$	-4,448
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	$5,6 \cdot 10^{-3}$	-5,185
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$5,3 \cdot 10^{-3}$	-5,24

Рассчитаем коэффициенты в уравнении (3) по зависимости (5) с учетом знаков  $X_i$  в столбцах табл. 1:

$$b_0 = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8}{8} = \frac{-3,42 - 3,055 - 4,022 - 3,817 - 4,867 - 4,448 - 5,185 - 5,24}{8} = -4,257;$$

$$b_1 = \frac{-Z_1 + Z_2 - Z_3 + Z_4 - Z_5 + Z_6 - Z_7 + Z_8}{8} = \frac{3,42 - 3,055 + 4,022 - 3,817 + 4,867 - 4,448 + 5,185 - 5,24}{8} = 0,117;$$

$$b_2 = \frac{-Z_1 - Z_2 + Z_3 + Z_4 - Z_5 - Z_6 + Z_7 + Z_8}{8} = \frac{3,42 + 3,055 - 4,022 - 3,817 + 4,867 + 4,448 - 5,185 - 5,24}{8} = -0,309;$$

$$b_3 = \frac{-Z_1 - Z_2 - Z_3 - Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8}{8} = \frac{3,42 + 3,055 + 4,022 + 3,817 - 4,867 - 4,448 - 5,185 - 5,24}{8} = -0,678;$$

$$b_{12} = \frac{Z_1 - Z_2 - Z_3 + Z_4 + Z_5 - Z_6 - Z_7 + Z_8}{8} = \frac{-3,42 + 3,055 + 4,022 - 3,817 - 4,867 + 4,448 + 5,185 - 5,24}{8} = -0,079;$$

$$b_{13} = \frac{Z_1 - Z_2 + Z_3 - Z_4 - Z_5 + Z_6 - Z_7 + Z_8}{8} = \frac{-3,42 + 3,055 - 4,022 + 3,817 + 4,867 - 4,448 + 5,185 - 5,24}{8} = -0,026;$$

$$b_{23} = \frac{Z_1 + Z_2 - Z_3 - Z_4 - Z_5 - Z_6 + Z_7 + Z_8}{8} = \frac{-3,42 - 3,055 + 4,022 + 3,817 + 4,867 + 4,448 - 5,185 - 5,24}{8} = 0,032;$$

$$b_{123} = \frac{-Z_1 + Z_2 + Z_3 - Z_4 + Z_5 - Z_6 - Z_7 + Z_8}{8} = \frac{3,42 - 3,055 - 4,022 + 3,817 - 4,867 + 4,448 + 5,185 - 5,24}{8} = -0,039.$$

Таким образом, получены следующие значения коэффициентов в уравнении (3) (табл. 2):

Таблица 2 - Значения коэффициентов в уравнении (3)

$b_0 (X_0)$	$b_1 (X_1)$	$b_2 (X_2)$	$b_3 (X_3)$	$b_{12} = b_4$ ( $X_1 \cdot X_2$ )	$b_{13} = b_5$ ( $X_1 \cdot X_3$ )	$b_{23} = b_6$ ( $X_2 \cdot X_3$ )	$b_{123} = b_7$ ( $X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$ )
-4,257	0,117	-0,309	-0,678	-0,079	-0,026	0,032	-0,039

В уравнении (3) использована замена переменных, при которой изменяются исходные значения функции отклика:  $Z_u = \ln(\bar{y}_u)$ . Несмотря на это, оценить статистическую значимость коэффициентов, входящих в данное уравнение, по методике, которая используется для расчета неполной квадратичной модели, невозможно. Для того, чтобы корректно вычислить дисперсию неадекватности, из уравнения (3) следует исключить малейший по абсолютному значению коэффициент. Таким согласно данным табл. 2 является коэффициент  $b_{13}$ . Его и исключаем из математической модели. Тогда уравнение (3) принимает вид:

$$Z = -4,257 + 0,117 \cdot X_1 - 0,309 \cdot X_2 - 0,678 \cdot X_3 - 0,079 \cdot X_1 X_2 + 0,032 \cdot X_2 X_3 - 0,039 X_1 X_2 X_3 \quad (6)$$

## 2. Проверка адекватности модели

Для оценки адекватности математической модели эксперимента используют вариацию аппроксимации. Вариация аппроксимации не зависит от дисперсии эксперимента, а определяется исключительно величиной дисперсии неадекватности:

$$V_a = \frac{\sqrt{S_{\text{неад}}^2} \cdot 100\%}{\bar{y}}, \quad (7)$$

где  $\bar{y}$  - среднее арифметическое значение функции отклика всех опытов.

Если вариация аппроксимации не превышает 10%, регрессионная модель признается адекватной эксперимент. Если вариация аппроксимации превышает 10%, построена математическая модель неадекватно описывает эксперимент.

В данном примере:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{u=1}^8 \bar{y}_u}{N} = \frac{150 \cdot 10^{-3}}{8} = 18,75 \cdot 10^{-3};$$

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

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

Поскольку вариация аппроксимации не превышает 10%, математическую модель следует признать адекватной эксперименту.

## 3. Переход к натуральным значениям в уравнении регрессии

Для перехода от кодированных значений факторов к их истинным (натуральным) значениям в уравнениях (4) и (6) следует провести замены переменных (8):

$$X_1 = \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta x_1}; \quad X_2 = \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta x_2}; \quad X_3 = \frac{X_3 - X_{30}}{\Delta x_3}, \quad (8)$$

где  $X_1, X_2, X_3$  – кодированные значения факторов, которые могут варьироваться от -1 до +1 (факторами являются диаметр гранул, температура процесса сушки и время прохождения процесса).

$X_1, X_2, X_3$  - соответственно диаметр гранул, температура процесса сушки и время прохождения процесса сушки, в единицах измерения:  $X_1 = 4,16...2,98$  мм (d),  $X_2 = 140...180$  °C (T),  $X_3 = 175...415$  мин (τ);

$X_{10}$ ,  $X_{20}$ ,  $X_{30}$  – основной уровень, относительно которого проводится варьирования заданных параметров:  $X_{10} = 3,57 \text{ мм} = 3,57 \cdot 10^{-3} \text{ м (d)}$ ,  $X_{20} = 160^\circ\text{C (T)}$ ,  $X_{30} = 295 \text{ мин} = 17700 \text{ с (}\tau\text{)}$ ;

$\Delta X_1$ ,  $\Delta X_2$ ,  $\Delta X_3$  – интервал варьирования заданных параметров:  $\Delta X_1 = 0,59 \text{ мм} = 0,59 \cdot 10^{-3} \text{ м (d)}$ ,  $\Delta X_2 = 20^\circ\text{C (T)}$ ,  $\Delta X_3 = 120 \text{ мин} = 7200 \text{ с (}\tau\text{)}$ .

После замены переменных уравнения (4) и (6) принимают вид:

$$Z = -4,257 + 0,117 \cdot X_1 - 0,309 \cdot X_2 - 0,678 \cdot X_3 - 0,079 \cdot X_1 X_2 + 0,032 \cdot X_2 X_3 - 0,039 X_1 X_2 X_3 \rightarrow$$

$$\begin{aligned} \rightarrow Z = & -4,257 + 0,117 \cdot \left( \frac{X_1 - 3,57 \cdot 10^{-3}}{0,59 \cdot 10^{-3}} \right) - 0,309 \cdot \left( \frac{X_2 - 160}{20} \right) - 0,678 \\ & \cdot \left( \frac{X_3 - 17700}{7200} \right) - 0,079 \cdot \left( \frac{X_1 - 3,57 \cdot 10^{-3}}{0,59 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{X_2 - 160}{20} \right) + 0,032 \\ & \cdot \left( \frac{X_2 - 160}{20} \cdot \frac{X_3 - 17700}{7200} \right) - 0,039 \\ & \cdot \left( \frac{X_1 - 3,57 \cdot 10^{-3}}{0,59 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{X_2 - 160}{20} \cdot \frac{X_3 - 17700}{7200} \right); \end{aligned}$$

$$\hat{y} = e^z.$$

Итак, математическая модель, адекватная процессу сушки ПЭТ-гранулята в зависимости от диаметра гранул, температуры и времени сушки, в виде степенной функции может быть представлена следующим образом:

$$Y_{\text{пр}}^{\text{стр}} = \exp \left( \begin{aligned} & -4,257 + 0,117 \cdot \left( \frac{d - 3,57 \cdot 10^{-3}}{0,59 \cdot 10^{-3}} \right) - 0,309 \cdot \left( \frac{T - 160}{20} \right) - 0,678 \cdot \\ & \left( \frac{\tau - 17700}{7200} \right) - 0,079 \cdot \left( \frac{d - 3,57 \cdot 10^{-3}}{0,59 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{T - 160}{20} \right) + \\ & 0,032 \cdot \left( \frac{T - 160}{20} \cdot \frac{\tau - 17700}{7200} \right) - 0,039 \cdot \left( \frac{d - 3,57 \cdot 10^{-3}}{0,59 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{T - 160}{20} \cdot \frac{\tau - 17700}{7200} \right) \end{aligned} \right)$$

**Список литературы:** 1. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности [Текст] / М. В. Лыков - М. Химия, 1970, 429 с. 2. Лыков А. В. Теория сушки [Текст] / А. В. Лыков - Изд. 2-ое, М., Энергия, 1968, 470 с. 3. Ребиндер П. А. Всесоюзное научно-техническое совещание по интенсификации процессов и улучшению качества материалов при сушке в основных отраслях промышленности и сельского хозяйства [Текст] / П. А. Ребиндер - М. Профиздат, 1956, с. 10-12. 4. Сажин Б. С., Сажин В. Б. Научные основы техники сушки [Текст] / В. Б. Сажин, Б. С. Сажин - М., Наука, 1997, 447 с. 5. Сажин Б. С. Основы техники сушки [Текст] / Б. С. Сажин - М., Химия, 1984. 6. Сажин Б. С., Шадрина Н. Е. Выбор и расчет сушильных установок на основе комплексного анализа влажных материалов как объектов сушки [Текст] / Н. Е. Шадрина, Б. С. Сажин - М., Изд. МТИ, 1979, 93 с.

Надійшла до редколегії 20.04.2013

УДК 665.9

**Исследование влияния условий и факторов процесса сушки ПЭТФ-гранулята/ С. О. Пристайлов, С. А. Власюк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП», – 2013. – № 26 (999). – С. 124-128. – Бібліогр.: 6 назв.**

Розроблено математичну модель процесу сушіння ПЕТ-грануляту до заданого вологовмісту, що є необхідною умовою для стабільності подальшого технологічного процесу.

**Ключові слова:** ПЕТ-гранулят, сушка гранул, багатофакторний експеримент, змішувач типу п'яна бочка, виготовлення ПЕТ-тари.

A mathematical model of the drying of PET granulate to a specified moisture content, which is essential for the stability of the subsequent process, has been developed.

**Keywords:** PET granules, drying granules, multivariate experiment, mixer drunk barrel type, PET containers manufacture.