

Энгельсский технологический институт (филиал)  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.»

Кафедра «Технологии и оборудование химических, нефтегазовых и пище-  
вых производств»

## **НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ПКМ**

Методические указания  
к практическим занятиям  
по дисциплине «Химия и технология переработки полимеров»  
направление подготовки 18.03.01 «Химическая технология»

## ВВЕДЕНИЕ

Целью преподавания дисциплины специализации «Химия и технология ПКМ» является формирование у студентов научно-технологического мышления и приобретение знаний для производственно-технологической деятельности.

Для закрепления теоретических знаний и овладения навыками решения конкретных инженерных задач практические занятия в соответствии с программой курса включают следующие темы:

- расчет технологических параметров процесса прессования;
- расчет технологических параметров процесса литья под давлением;
- расчет технологических параметров формования изделий из листовых заготовок методом вакуум- и пневмоформования;
- материальные расчеты.

### 1. РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ

Основными технологическими параметрами прессования являются температура и время предварительного нагрева пресс-материала в генераторе ТВЧ, температура и удельное давление прессования, время выдержки давлением.

Для расчета времени нагревания (в с) материала до необходимой температуры используют уравнение нестационарной теплопроводности [1]:

$$\tau_n = \delta^2 Fo / (4\alpha).$$

Критерий Фурье  $Fo$  является функцией относительной температуры и зависит от формы изделия (пластина, цилиндр или шар):

$$Fo = \varphi(\theta); \theta = (t_{пл} - t_2) / (t_{пл} - t_1).$$

При этом между критерием Фурье и безразмерной температурой  $\theta$  выявлено следующее соотношение:

|          |      |      |      |       |       |      |      |
|----------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| $F_0$    | 0,38 | 0,50 | 0,55 | 0,595 | 0,605 | 0,62 | 0,70 |
| $\theta$ | 0,20 | 0,10 | 0,08 | 0,06  | 0,05  | 0,04 | 0,03 |

Здесь  $\tau_{пл}$  – температура нагревательных плит;  $t_1$  и  $t_2$  – температуры таблеток до и после подогрева;  $\delta$  – толщина стенки изделия, м;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности,  $m^2/s$ .

Пример 1.1. Рассчитать время нагрева из пресс-материала 03-010-02 в генераторе ТВЧ марки ВЧД-1,6/40 НП.

Исходные данные:  $c=1700$  Дж/(кг x K),  $\rho=1400$  кг/м<sup>3</sup>.  $T_2=110^\circ C$ ,  $H_n=0,01$  м,  $U=5$  кВ,  $\delta=0,003$  м,  $\epsilon_r=5$ ,  $f_k=41 \cdot 10^6$  Гц,  $\epsilon \tan \delta = 0,3$ ;  $K = 0,55$ .

Р е ш е н и е. Расчет проводим по следующим формулам [1]:

$$\tau_n = \frac{18c \cdot \rho(T_2 - T_1)H_n^2 \cdot 10^9}{K_E^2 \eta n^\varepsilon \operatorname{tg} \delta r_\kappa U^2}.$$

здесь  $c$  – удельная теплоемкость, кДж/(кг · К);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $T_1, T_2$  – начальная и конечная температуры таблетки;  $K, K_E$  – коэффициент, учитывающий влияние на напряженность электрического поля воздушного зазора между полимером и электродом;  $\eta_T = 0,4 \div 0,5$  – термический КПД, служащий для учета потерь теплоты в окружающую среду, т.е. КПД генератора ТВЧ;  $\varepsilon_T$  – диэлектрическая проницаемость прессматериала, Ф/м;  $f_k$  – частота колебаний, Гц;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $U$  – подводимое напряжение, В ( $U = 5 \div 10$  кВ);  $H_n$  – толщина слоя полимера (пластины, таблетки) мм.

Коэффициент  $K_E$ :

$$K_E = 1 - \alpha \frac{\delta_\varepsilon}{H_n} \sqrt{\varepsilon_r \exp(-K \frac{\delta_\varepsilon}{H_n})},$$

где  $\delta_\varepsilon$  – величина воздушного зазора между электродом и таблеткой, мм;  $\alpha$  и  $K$  – постоянные (для фенопластов  $\alpha=1,25$ ;  $K=2,23$ ).

$$K_E = 1 - 1,25 \frac{0,003}{0,01} \sqrt{5 \exp(-0,55 \frac{0,003}{0,01})} = 0,289;$$

$$\tau_n = \frac{18 \cdot 1700 \cdot 1400(110 - 20) \cdot 0,01^2 \cdot 10^9}{0,289^2 \cdot 0,5 \cdot 0,3 \cdot 0,41 \cdot 10^6 \cdot 5000^2} = 30 \text{ с}$$

Время выдержки изделия при прессовании приблизительно можно определить как произведение толщины стенки на скорость отверждения:

$$\tau_{\text{выд}} = h_{\text{ст}} \cdot v_{\text{отв}}.$$

Величина  $v_{\text{отв}}$  берется из справочных таблиц. Так, новолачные прессматериалы имеют наибольшую скорость отверждения 5 – 20 с/мм (с обязательным применением предварительного подогрева).

Более точно время выдержки подсчитывают по формуле

$$\tau_{\text{выд}} = \tau_n + \tau_{\text{отв}},$$

где  $\tau_n$  – время нагрева пресс-материала в форме с учетом предварительного подогрева, с;  $\tau_{\text{отв}}$  – время отверждения, зависящее от марки пресс-материала и температуры, с (табл. 1).

Время нагрева материала уменьшается с повышением температуры предварительного подогрева. Оно зависит также от толщины стенки изделия, его формы, температуропроводности пресс-материала:

$$\tau_n = (900/K_2) (\delta^2/\alpha) \ln [K_1(t_\phi - t_{\text{п.п}})/(t_\phi - t_n)],$$

где  $\delta$  – толщина стенки изделия, м;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности пресс-материала, м<sup>2</sup>/ч (табл. 1);  $t_\phi$  – температура формы, °С;  $t_{\text{п.п}}$  – температура предварительного подогрева пресс-материала, °С;  $t = t_\phi - 20^\circ\text{C}$  – температура изделия;  $K_1$  – коэффициент, зависящий от конфигурации из-

деля ( $K_1=\varphi_x$ );  $K_2$  – коэффициент, зависящий от скорости прогрева материала (для фенопластов  $K_2=0,8\div 0,85$ , для аминопластов  $K_2=0,9$ ).

Таблица 1

Значения  $\tau_o$ ,  $\tau_{отв}$ ,  $\alpha$  и  $\gamma_1$  [1, 3]

| Масса пресс-материала | Время вязкотекучего состояния $\tau_o$ , с | Время отверждения по пластометру $\tau_{отв}$ , с | Коэффициент температуропроводности $\alpha \cdot 10^3$ , м <sup>2</sup> /ч | Температурный коэффициент, зависящий от типа пресс-материала, $\gamma_1$ , К <sup>-1</sup> или 1/°С |
|-----------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 01-040-02             | 35-45                                      | 120-130                                           | 0,4-0,6                                                                    | 0,03                                                                                                |
| 03-010-02             | 26-36                                      | 50-80                                             | 0,4-0,6                                                                    | 0,03                                                                                                |
| СП1-343-03            | 80-105                                     | 140-160                                           | 0,4-0,6                                                                    | 0,02                                                                                                |
| СП3-342-02            | 80-100                                     | 140-160                                           | 0,4-0,6                                                                    | 0,02                                                                                                |
| Э2-230-02             | 30-60                                      | 140-160                                           | 0,4-0,6                                                                    | 0,025                                                                                               |
| Э1-340-02             | 80-100                                     | 140-160                                           | 0,4-0,6                                                                    | 0,02                                                                                                |
| У1-301-02             | -                                          | 50-70                                             | 0,4-0,44                                                                   | -                                                                                                   |
| У4-080-02             | -                                          | 90-100                                            | 0,45-0,65                                                                  | 0,03                                                                                                |
| АГ-4 (В и С)          | -                                          | 60-80                                             | 0,7-0,9                                                                    | -                                                                                                   |
| Аминопласт            | 55-65                                      | 80-130                                            | 0,4                                                                        | 0,028                                                                                               |

Пример 1.2. Рассчитать время выдержки под давлением при прессовании изделия «Крышка» из пресс-материала 0,3-010-02. Исходные данные:  $\varphi_x = 1,54$ ;  $R_x = 2$  мм;  $\alpha = 0,8$ ;  $\beta = 0,5$ ;  $\tau_{отв} = 60$  с.

Р е ш е н и е. Расчёт производим по формуле

$$\tau_{выд} = \beta(\varphi_x / \varphi_{пл})(R_x / R_{пл})^2 \tau_{пр} + \alpha(\tau_{отв} - 19),$$

где  $\tau_{выд}$  – время выдержки под давлением с учётом предварительного подогрева, с;  $\tau_{пр}=19$  с – время прогрева образца в пластометре при 170°С, без предварительного подогрева (для аминопластов 10 с);  $\tau_{отв}$  – время отверждения материала, определённое на пластометре (Канавца), с;  $\varphi_x=1,5$  – постоянная пластометра;  $R_x$  – толщина изделия, мм;  $R_{пл}=3$  мм – толщина образца, мм;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от температуры прессования;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий влияние предварительного подогрева материала (при  $T=160^\circ\text{C}$   $\alpha=1,2$   $\beta=0,6$ ;  $T=170^\circ\text{C}$   $\alpha=0,8$   $\beta=0,42$ ;  $T=190^\circ\text{C}$   $\alpha=0,5$   $\beta=0,32$ ).

$$\tau_{выд} = 0,5 (1,54) (2/3)^2 \cdot 19 + 0,8 (60 - 90) = 37 \text{ с.}$$

Пример 1.3. Рассчитать время отверждения при прессовании изделия из пресс-материала Э2-330-02, толщина стенки изделия 8 мм.

Р е ш е н и е. Расчёт ведем по формуле

$$\tau_{дсл} = \frac{1}{A_2} \frac{h^2}{4a_1} \ln \left( A_1 \frac{T_c - T_u}{T_c - T_0} \right) + \frac{1}{A_2} \frac{h^2}{4a_2} \ln \left( \frac{T_c - T_0}{T_c - T_u} \right) + \left( \frac{1hm\Delta T - 1h(T_0^1 - T_0)}{k} \right),$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – коэффициенты, учитывающие конфигурацию изделия (пластина, брусок, шар) соответствующие форме стенки (для расчётов принимают  $A_1=1,27$ ,  $A_2=1,47$ );  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты температуропроводности неотверждённого и отверженного пресс-материалов,  $\text{м}^2/\text{с}$  ( $a_1=(1,5+2,0)a_2$ );  $h$  – наибольшая толщина стенки изделия,  $\text{м}$ ;  $T_c$  – температура стенки формы,  $\text{К}$ ;  $T_n$  – начальная температура пресс-материала,  $\text{К}$ ;  $T_0$  – температура прессматериала, при которой начинается процесс отверждения ( $T_0=363\div 373 \text{ К}$ ), но наиболее интенсивно процесс отверждения идёт при температуре  $T_0=T_0+(4\div 5) \text{ К}$ ;  $T_{\text{ц}}$  – температура в центре изделия ( $T_{\text{ц}}=T_c-(4\div 5) \text{ К}$ );  $\Delta T$  – изменение температуры при проведении химической реакции в адиабатическом режиме;  $m=0,8\div 0,9$  – степень отверждения пресс-материала;  $k$  – константа скорости реакции отверждения (табл. 2).

Таблица 2

Расчётные параметры

| Прессматериал | $a_1 \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$ | $a_2 \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$ | $\text{К} \cdot 10^3, \text{с}^{-1}$ | $\Delta T, \text{К}$ |
|---------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| 03-010-02     | 20                                    | 10                                    | 12,5                                 | -                    |
| Э2-330-02     | 18                                    | 9                                     | 4,3                                  | 8                    |
| АГ-4В         | 15,2                                  | 9,9                                   | 10,1                                 | 17                   |
| ДСВ           | 22                                    | 15,3                                  | 8,1                                  | 10                   |
| ПСК-5Н        | 16                                    | 8                                     | 10,5                                 | -                    |

$$\tau_{\text{выд}} = \frac{1}{2,47} \frac{(8 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 18 \cdot 10^{-8}} \ln(1,27 \frac{463-293}{463-373}) + \frac{1}{2,47} \frac{(8 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 9 \cdot 10^{-8}} \ln(1,27 \frac{463-373}{463-458}) +$$

$$(\ln 0,8 \cdot 8 - \ln 5) / (4,3 \cdot 10^{-3}) = 295,5 \text{ с}.$$

## 2. РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

### 1. Оптимальный удельный объем и плотность изделий.

Масса изделия, его плотность могут быть повышены увеличением давления формования, а также за счет снижения температуры впрыскиваемого материала. При повышении температуры переработки расплав будет расширяться и, следовательно, при впрыске в форму займет больше места, а значит, изделие будет получаться менее плотным.

Зависимость между давлением, температурой и удельным объемом (величиной, обратной плотности) на стадии формования и уплотнения расплава полимера может быть выражена видоизмененным уравнением Ван-дер-Ваальса [1]:

$$(P + \pi) (1/\rho - \omega) = 10^{-3} R'T;$$

$$(P + \pi) (v - \omega) = 10^{-3} R'T,$$

где  $P$  – давление, МПа;  $v$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;  $T$  – средняя температура, К;  $\rho$  – плотность при температуре переработки, кг/м<sup>3</sup>;  $\pi$  – коэффициент, характеризующий силу межмолекулярного взаимодействия, МПа;  $\omega$  – коэффициент, характеризующий величину пространства, занимаемого молекулами, м<sup>3</sup>/кг.

$$R' = R/M,$$

где  $R'$  – коэффициент, характеризующий молекулярную структуру полимера, кДж/(кг·К);  $R=8,31$  кДж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная;  $M$  – мольная масса структурной единицы полимера, кг/кмоль (табл. 3).

$$v = [10^{-3}R'T/(P+\pi)] + \omega.$$

Таблица 3

Константы уравнения состояния

| Материалы                    | $M$ ,<br>кг/кмоль | $\pi$ ,<br>МПа | $\omega$ , м <sup>3</sup> /кг | $R'$ ,<br>кДж/(кг·К) |
|------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------------|----------------------|
| Полиэтилен ВД                | 28,1              | 324            | $0,875 \cdot 10^{-3}$         | 0,297                |
| Полиэтилен НД                | 28,1              | 677            | $1,11 \cdot 10^{-3}$          | 0,297                |
| Полипропилен                 | 41                | 160            | $0,620 \cdot 10^{-3}$         | 0,197                |
| Полистирол                   | 104               | 18             | $0,822 \cdot 10^{-3}$         | 0,0798               |
| СФ (сополимер формальдегида) | -                 | 566            | $0,559 \cdot 10^{-3}$         | 0,277                |
| Полиамид 6,10                | 282               | 107,9          | $0,738 \cdot 10^{-3}$         | 0,0295               |
| Полиамид 6                   | 113               | 150            | $0,722 \cdot 10^{-3}$         | 0,0733               |
| Полиметилметакрилат          | 100               | 213            | $0,734 \cdot 10^{-3}$         | 0,083                |
| Полиамид 12                  | 197               | 71,7           | $0,78 \cdot 10^{-3}$          | 0,0421               |
| Поликарбонат                 | 254               | 67             | $0,61 \cdot 10^{-3}$          | 0,0327               |

Пример 2.1. Определить удельный объем, массу и плотность изделия из ПЭНП при температуре переработки и комнатной температуре. Объем формы  $50 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>.

Р е ш е н и е: Берем среднее давление в форме  $P=30$  МПа,  $T=473$  К,  $R'$  – из табл.2. Тогда

$$v = \frac{10^{-3} \cdot 0,297 \cdot 473}{30 + 324} + 0,875 \cdot 10^{-3} = 1,27 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$v = 1/\rho; \quad v_\rho = \frac{1}{1,27 \cdot 10^{0,3}} = 787 \text{ кг/м}^3.$$

Примем обозначения:  $G_u$  и  $v_u$  – масса и объем изделия;  $\rho_p$  и  $G_p$  – плотность и масса расплава в форме.

$$G_u = G_p = \frac{v_\phi}{v} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{1,27 \cdot 10^{-3}} = 39 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

При комнатной температуре и атмосферном давлении

$$\nu = \frac{10^{-3} \cdot 0,297 \cdot 293}{325} + 0,875 \cdot 10^{-3} = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$\rho_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{1,14 \cdot 10^{-3}} = 877 \text{ кг} / \text{м}^3; \quad \nu_u = \frac{G_u}{\rho_{20^{\circ}\text{C}}} = \frac{39 \cdot 10^{-3}}{877} = 44,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

## 2. Время цикла литья под давлением изделий.

Расчет продолжительности цикла ( $\tau_{\text{ц}}$ ) литья под давлением изделий и пластикационной способности ( $q_{\text{пл}}$ ) литьевой машины проводят следующим образом [1]:

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{м}} + \tau_{\text{т}} + \tau_{\text{п}},$$

где  $\tau_{\text{м}}$  – машинное время, с;  $\tau_{\text{т}}$  – технологическое время, с;

$$\tau_{\text{т}} = \tau_{\text{выд}} + \tau_{\text{охл. б/д}};$$

$\tau_{\text{выд}}$  – продолжительность выдержки полимера в форме под внешним давлением, с;  $\tau_{\text{охл. б/д}}$  – продолжительность охлаждения изделия в форме без внешнего давления, с;  $\tau_{\text{п}}$  – продолжительность паузы между циклами, с.

Технологическое время ( $\tau_{\text{т}}$ ) показывает продолжительность охлаждения до заданной температуры в центре изделия  $T_{\text{и}}$ , при которой возможно извлечение готового изделия. При  $f=B/h>2,5$  для плоского изделия

$$\tau_{\text{т}} = \ln[1,27 (T_{\text{м}} - T_{\text{ф}}) / (T_{\text{и}} - T_{\text{ф}}) h / \pi^2 \alpha];$$

при  $f < 2,5$  для плоского изделия

$$\tau_{\text{т}} = \ln[1,27 (T_{\text{м}} - T_{\text{ф}}) / (T_{\text{и}} - T_{\text{ф}}) h^2 f^2 / \pi^2 \alpha (1 + f^2)];$$

для цилиндрического изделия

$$\tau_{\text{т}} = \ln[1,6 (T_{\text{м}} - T_{\text{ф}}) / (T_{\text{и}} - T_{\text{ф}}) r^2 / (5,76 \alpha)],$$

где  $B$  – ширина изделия;  $h$  – толщина стенки изделия;  $r$  – толщина стенки цилиндрического изделия;  $T_{\text{м}}$  – температура впрыскиваемого в формулирующую полость материала;  $T_{\text{ф}}$  – температура формы;  $T_{\text{и}} \approx T_{\text{ф}} + (10 \div 30)$  – для тонкостенных изделий ( $h \leq 3$  мм),  $T_{\text{и}} = T_{\text{ф}} + 50$  – для толстостенных изделий ( $h \geq 5$  мм);  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности полимерного материала при температуре переработки,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Машинное время

$$\tau_{\text{м}} = \tau_{\text{см}} + \tau_{\text{впр}} + \tau_{\text{разм}},$$

где  $\tau_{\text{см}}$ ,  $\tau_{\text{разм}}$ ,  $\tau_{\text{впр}}$  – время смыкания и размыкания формы, время впрыска.

Тогда

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{см}} + \tau_{\text{впр}} + \tau_{\text{выд}} + \tau_{\text{охл. б/д}} + \tau_{\text{разм}} + \tau_{\text{п}}.$$

Продолжительность плакировки полимера

$$\tau_{\text{пл}} = \tau_{\text{охл. б/д}} + \tau_{\text{см}} + \tau_{\text{разм}}.$$

Обозначив  $C_1 = \tau_{\text{выд}} / \tau_{\text{т}}$  и  $C_2 = (\tau_{\text{см}} + \tau_{\text{разм}}) / \tau_{\text{т}}$  и учитывая, что  $\tau_{\text{охл. б/д}} = \tau_{\text{т}} - \tau_{\text{выд}}$ , получим:

$$\tau_{\text{пл}} = \tau_{\text{т}} = \tau_{\text{выд}} + \tau_{\text{см}} + \tau_{\text{разм}} = \tau_{\text{т}} - C_1 \tau_{\text{т}} + C_2 \tau_{\text{т}} = \tau_{\text{т}}(1 - C_1 + C_2); \tau_{\text{охл.б/д}} = \tau_{\text{т}}(1 - C_1).$$

Пластиковая способность литьевой машины  $q_{\text{пл}}$  (в кг/ч) [1]:

$$q_{\text{пл}} = 3600 \nu \rho / [\tau_{\text{т}}(1 - C_1 + C_2)],$$

где  $\nu$  – объем отливки, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность полимера, кг/м<sup>3</sup>.

Значения коэффициентов  $C_1$ ,  $C_2$  приведены в табл. 4.

Таблица 4

#### Пример пластиковой способности

| Параметры<br>и коэффициенты                                                                    | Объем впрыска за цикл $\nu \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> |         |         |         |         |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|------|------|
|                                                                                                | 16                                                      | 32      | 63      | 125     | 250     | 500  | 1000 |
| $C_1$                                                                                          | 0,3-0,5                                                 | 0,3-0,5 | 0,3-0,5 | 0,3-0,5 | 0,3-0,4 | 0,3  | 0,3  |
| $C_2$                                                                                          | 0,15                                                    | 0,15    | 0,15    | 0,15    | 0,15    | 0,14 | 0,11 |
| $\tau_{\text{т}}$ , с                                                                          | 21                                                      | 27,5    | 27,5    | 30      | 40      | 55   | 80   |
| Расчетная<br>минимально<br>необходимая<br>пластиковая<br>способность<br>$q_{\text{пл}}$ , кг/ч | 5                                                       | 7       | 14      | 25      | 33      | 43   | 60   |

Пластиковой производственностью литьевой машины называют то количество материала (в кг), которое шнек способен непрерывно пластицировать в течение 1 ч:

$$q_{\text{пл}} = 3600 \nu_{\text{и}} \rho n K' / (K \tau_{\text{пл}})$$

здесь  $\nu_{\text{и}}$  – объем изделия, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $n$  – число оформляющих гнезд;  $K' = 1,1 \div 1,3$  – коэффициент, учитывающий литниковую систему;  $K$  – коэффициент, учитывающий вязкость перерабатываемого материала (для полистирола  $K=0,8$ , для более вязких материалов  $K=0,7$ , для менее вязких  $K=0,9$ ).

Производительность литьевых машин  $Q$  (в кг/ч) можно рассчитать по формуле

$$Q = 3,6 m n / \tau_{\text{ц}},$$

где  $m$  – масса изделия, г;  $n$  – число гнезд;  $\tau_{\text{ц}}$  – время цикла, с.

Если взять среднюю производительность литьевой машины по полистиролу (см. табл. 5), то с помощью поправочного коэффициента  $K_{\text{п}}$ , учитывающего изменение пластиковой способности машины, можно определить производительность при переработке других материалов.

Для поливинилхлорида и полиолефинов  $K_3=1$ , для полиамида, поликарбоната и полиформальдегида  $K_3=0,7$ , для термореактивных материалов  $K_3=0,6$ .

Таблица 5

## Производительность литейных машин

| Параметр                                                | Объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6, \text{ м}^3$ |        |         |         |         |         |         |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                                         | 16                                                | 32     | 63      | 125     | 250     | 500     | 1000    |
| Среднее время охлаждения для ПС $\tau_t, \text{ с}$     | 21                                                | 27,5   | 27,5    | 30      | 40      | 55      | 80      |
| Принятая в расчете продолжительность холостого цикла, с | 4                                                 | 5,15   | 7       | 7,2     | 9       | 15      | 18      |
| Расчетная производительность, кг/ч                      | 1,8                                               | 2,7    | 4,9     | 9,1     | 14      | 19,6    | 27,8    |
| Расчетная годовая производительность, т                 | 9,8                                               | 15     | 28      | 51,4    | 78,2    | 110,3   | 156,3   |
| Время впрыска, с                                        | 0,4÷0,5                                           | 0,4÷10 | 0,5÷1,2 | 0,8÷1,5 | 0,8÷1,8 | 1,0÷2,0 | 1,5÷2,5 |

Пример 2.2. Рассчитать производительность литейной машины с  $V_H=63 \text{ см}^3$ . Исходные данные: изделие «Втулка» из ПЭНП с  $v_H=43 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ,  $m=39,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ , толщиной стенки  $r=2,5 \text{ мм}$ . Температура материала на впрыске, у сопла  $T_M=200^\circ\text{C}$ ;  $T_\phi=50^\circ\text{C}$ ;  $T_H=70^\circ\text{C}$ ,  $n=1$ .

Р е ш е н и е.  $Q=3,6 \text{ мн}/\tau_{\text{ц}}$ ;  $1/\tau_{\text{ц}}=1/\tau_{\text{см}}+1/\tau_{\text{впр}}+1/\tau_t+1/\tau_{\text{разм}}+1/\tau_n$ ;  $\tau_{\text{см}}+\tau_{\text{разм}}=\tau_{\text{хол}}$ ;  $\tau_{\text{хол}}=7 \text{ с}$ ;  $\tau_{\text{впр}}=1 \text{ с}$ ;  $\tau_n=3 \text{ с}$ .

$$\tau_t = \ln[1,6 (T_M - T_\phi) / (T_H - T_\phi)] r^2 / (5,76 \alpha);$$

$$\tau_t = \ln[1,6(200-50)/(70-50)](2,5 \cdot 10^{-3})^2 / (5,76 \cdot 0,102 \cdot 10^{-6}) = 26,8 \text{ с};$$

$$\tau_{\text{ц}} = 7 + 1 + 3 + 26,8 = 37,8 \text{ с}; Q = 3,6 \cdot 39,5 \cdot 1/37,8 = 3,7 \text{ кг/ч}.$$

Для роторных литейных машин время цикла

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{впр}} + \tau_{\text{выд}} + \tau_{\text{поз}} + \tau_n,$$

где  $\tau_{\text{выд}}$  — время выдержки материала в форме под внешним давлением, с;

$\tau_{\text{поз}}$  — время перемещения формы в следующую позицию, с;

$$\tau_t = \tau_{\text{выд}} + \tau_{\text{охл.б/д}}; \quad \tau_{\text{поз}} = 1/(nk);$$

$$\tau_{\text{поз}} = \tau_{\text{охл.б/д}} / (k - 1) - (\tau_{\text{впр}} + \tau_{\text{выд}} + \tau_n) (k - 2) / (k - 1);$$

$\tau_{\text{охл.б/д}}$  — время охлаждения (отверждения) материала в форме без давления, с;  $k$  — число позиций;  $\tau_n \approx 1 \text{ с}$  — время пауз между операциями;  $n$  — частота вращения ротора.

Пример 2.3. Рассчитать производительность шестипозиционной роторной литейной машины. Исходные данные:  $m=35 \text{ г}$ ;  $\tau_{\text{впр}}=1,2 \text{ с}$ ;  $\tau_t=46 \text{ с}$ ;  $\tau_{\text{выд}}=6 \text{ с}$ ;  $\tau_{\text{охл.б/д}}=40 \text{ с}$ .

Р е ш е н и е.  $\tau_{\text{пов}}=40/(6-1)-(1,2+6+1) (6-2)/(6-1)=1,44$  с;  
 $\tau_{\text{ц}}=1,2+6+1,44+1=9,64$  с;  $Q=3,6 \text{ м}/\tau_{\text{ц}}=3,6 \cdot 35/9,64=13$  кг/ч.

Производительность однопозиционной литьевой машины для такой же детали будет

$$\tau_{\text{ц}}=\tau_{\text{ход}}+\tau_{\text{впр}}+\tau_{\text{т}}+\tau_{\text{п}}=7+1+46+1=55 \text{ с};$$

$$Q=3,6 \cdot 35/55=2,3 \text{ кг/ч}.$$

### 3. РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ ВАКУУМ- И ПНЕВМОФОРМОВАНИЯ

На качество изделий и производительность процесса существенно влияет правильный выбор размера листовых заготовок из термопластов, температуры и продолжительности ее нагрева, температуры формы и продолжительности охлаждения изделия.

Типовые режимы переработки листовых и пленочных термопластов и технические характеристики оборудования приведены в табл. 6. 7 [1].

Таблица 6

Рекомендуемый температурный режим переработки

| Материал                     | Температура, °С   |                          |                                         |
|------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------------------|
|                              | нагрева заготовки | формообразующей оснастки | вспомогательного формующего инструмента |
| 1                            | 2                 | 3                        | 4                                       |
| АБС-пластики                 | 140-160           | 40-50                    | 75-115                                  |
| Винипласт                    | 90-160            | 35-50                    | 60-150                                  |
| Поливинилхлорид жесткий      | 100-160           | 40-50                    | 60-150                                  |
| Поликарбонат                 | 190-230           | 45-55                    | -                                       |
| Полиметилметакрилат          | 120-200           | 40-60                    | 170                                     |
| Полипропилен                 | 150-200           | 50-90                    | 130-160                                 |
| Полистирол ударопрочный      | 110-150           | 50-65                    | 30-120                                  |
| Полисульфон                  | 220-270           | 140-165                  | -                                       |
| Полиэтилен высокой плотности | 120-135           | 50-70                    | 150                                     |
| Полиэтилен низкой плотности  | 90-135            | 50-70                    | 150                                     |

Таблица 7

**Технические характеристики однопозиционных машин  
для формования изделий из листовых и пленочных термопластов**

| Марка машины | Размер прижимной рамы, мм | Наибольшая глубина формования, мм | Усилие механизмов подъема стола формователя, кН | Мощность нагревателя, кВт | Производительность вакуум-насоса, м <sup>3</sup> /ч | Производительность компрессора давлением 0,8 МПа, м <sup>3</sup> /ч |
|--------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| VP-321       | 740x540                   | 100                               | -                                               | 8,0                       | 10                                                  | 9                                                                   |
| VP-Рекорд    | от 1200x800 до 200x200    | 400                               | 30                                              | 12,8                      | 30                                                  | 16                                                                  |
| VP-1-940     | от 800x800 до 200x200     | 400                               | 30                                              | 12,5                      | 30                                                  | -                                                                   |
| VP-Бэби      | от 700x500 до 200x200     | 360                               | 18                                              | 6,0                       | 30                                                  | 9                                                                   |
| VP-Лилипут   | от 550x400 до 200x260     | 160                               | 9                                               | 4,0                       | -                                                   | 6                                                                   |

**Пример 3.1.** Рассчитать необходимые размеры листовой заготовки из ударопрочного полистирола марки УПМ-503 при изготовлении упаковочной тары с размерами 120x60 мм. Исходные данные: усадка вдоль листа  $\gamma_{\parallel}=18\%$ , усадка в перпендикулярном (поперечном) направлении  $\gamma_{\perp}=100\%$ ,  $z=15$  мм,  $z_1=10$  мм, число гнезд в продольном направлении листа  $n_{\parallel}=4$ , в поперечном  $n_{\perp}=6$ .

**Р е ш е н и е.** Длину листа для машины VP-321 с размерами зажимной рамы 740x540 мм (табл. 6) рассчитывают по формуле:

$$L = [n_{\parallel}l + 2z + (n_{\parallel} - 1)z_1] (1 + Y/100),$$

где  $L$  – размер листовой заготовки см;  $n_{\parallel}$  – число изделий, расположенных вдоль искомой стороны заготовки;  $l$  – размер изделия, см;  $z$  – припуск на зажим ( $z = 1 \div 10,0$  см в зависимости от размеров и конфигурации изделия, а также от конструкции зажимного устройства);  $z_1$  – расстояние между гнездами;  $Y$  – усадка заготовки при нагреве.

$$L = (4 \cdot 120 + 2 \cdot 15 + 3 \cdot 10) (1 + 18/100) = 637 \text{ мм};$$

ширина листа

$$L_1 = (6 \cdot 60 + 2 \cdot 15 + 5 \cdot 10) (1 + 10/100) = 484 \text{ мм};$$

площадь поверхности:

Время нагрева листовой заготовки  $\tau_n$  (в с) можно приближенно рассчитывать по формуле

$$\tau_n = E/g = S\delta\rho c(T_k - T_n) / \{C_s \varepsilon \phi S_n [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]\},$$

где  $E$  – количество лучистой теплоты, которое должна получить полимерная заготовка, чтобы нагреться до требуемой температуры;  $g$  – интенсивность излучения нагревателя,  $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}^4)$ ;  $S$  – площадь листовой заготовки,  $\text{м}^2$ ;  $\delta$  – толщина заготовки,  $\text{м}$ ;  $\rho$  – плотность полимерного листа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c$  – среднее значение удельной теплоёмкости в интервале температур разогрева  $T_k - T_n$ ;  $T_n, T_k$  – начальная и конечная температура листовой заготовки,  $\text{К}$ ;  $C_s = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}^4)$  – константа излучения абсолютно чёрного тела;  $\varepsilon = 0,8 \div 0,9$  – приведённая степень черноты для параллельных поверхностей пластика и радиационного нагревателя;  $\phi$  – коэффициент использования лучистого потока, зависящий от соотношения размеров заготовки и нагревателя, а также от расстояния между ними (принимают  $\phi = 0,45 \div 0,65$ );  $S_n$  – общая площадь нагревателя,  $\text{м}^2$ ;  $T_1$  – температура на поверхности нагревателя,  $\text{К}$ ;  $T_2$  – средняя температура листовой заготовки за цикл нагрева,  $\text{К}$ .

**Пример 3.2.** Рассчитать время нагрева листовой заготовки из полиэтилена низкой плотности. Исходные данные: толщина листа  $\delta = 3 \text{ мм}$ , площадь  $S = 0,3 \text{ м}^2$ . Поверхность нагревателя имеет  $T_1 = 700 \text{ К}$ . Температура нагрева заготовки  $T_k = 130^\circ\text{C}$  или  $403 \text{ К}$ ;  $S_n = 0,33 \text{ м}^2$ ;  $T_2 = (403 + 293)/2 = 348 \text{ К}$ .

**Р е ш е н и е.** Рассчитываем  $c$  при температурах  $20; 60; 110$  и  $130^\circ\text{C}$ :

$$c = (1,4 + 2,2 + 5,8 + 1,8) / 4 = 2,8 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

При тех же температурах среднее значение плотности равно

$$\rho = (920 + 900 + 850 + 825) / 4 = 874 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Тогда

$$\tau_n = 0,3 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 874 \cdot 2,8 \cdot 110 / \{(5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,90 \cdot 0,6 \cdot 0,33 [7^4 - (3,48)^4])\} = 105,8 \text{ с}.$$

*Время охлаждения изделия* зависит от температуры формы, толщины стенки изделия и температуропроводности материала.

Для обеспечения жесткости изделия и исключения его деформации после извлечения из формы считают, что температура в конце выдержки при охлаждении должна быть не выше температуры стеклования ( $T_{изд} \leq T_c$ ) для аморфных полимеров и не выше теплостойкости по Мартенсу ( $T_{изд} \leq T_m$ ) для кристаллических полимеров.

При двустороннем охлаждении время  $\tau_{охл}$  (в с) рассчитывается по уравнению

$$\tau_{охл} = \frac{2,3\delta^2}{\pi^2 \alpha} \lg(1,27 \frac{T_l - T_{охл}}{T_{изд} - T_{\phi}}).$$

При одностороннем отводе теплоты время охлаждения увеличивается в четыре раза:

$$\tau_{охл} = \frac{9,2\delta^2}{\pi^2\alpha} \lg\left(\frac{4}{\pi} \frac{T_{л} - T_{охл}}{T_{изд} - T_{ф}}\right).$$

где  $\delta$  – наибольшая толщина стенки изделия, м;  $T_{л}$  – средняя температура листовой заготовки, К;  $T_{охл}$  – температура охлаждаемой поверхности изделия, К;  $T_{изд}$  – температура на внутренней поверхности изделия в конце охлаждения, К;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Температуру охлаждаемой поверхности можно определить по уравнению

$$T_{охл} = (T_{л} \sqrt{\lambda_{л} c_{л} \rho_{л}} + T_{ф} + \sqrt{\lambda_{ф} c_{ф} \rho_{ф}}) / (\sqrt{\lambda_{л} c_{л} \rho_{л}} + \sqrt{\lambda_{ф} c_{ф} \rho_{ф}}).$$

Температуру формы можно приблизительно рассчитать по уравнению  $T_{ф} = T_{изд} - 20$  или взять из справочной таблицы. Под  $T_{ф}$  подразумевают не только температуру рабочей поверхности оформляющего инструмента, но и температуру окружающего воздуха, в уравнение подставляют наибольшее из них значение.

**Пример 3.3.** Определить время одностороннего охлаждения изделия из ПЭНП. Исходные данные:  $T_{л} = 130^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ф} = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{изд} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $\delta = 1,8$  мм,  $\alpha = 1,08 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. По справочным данным:  $\lambda_{ПЭНП} = 0,4 \cdot 10^{-3}$  кВт/(м · К),  $C_{ПЭНП} = 0,5$  кДж/(кг · К),  $\delta_{ф} = 0,72 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup>.

**Р е ш е н и е.** Рассчитываем  $T_{охл}$ :

$$T_{охл} = \frac{(130\sqrt{4 \cdot 10^{-4} \cdot 2,8 \cdot 874} + 40\sqrt{470 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 \cdot 0,72 \cdot 10^{-4}})}{\sqrt{(4 \cdot 10^{-4} \cdot 2,8 \cdot 874} + \sqrt{470 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 \cdot 0,72 \cdot 10^{-4}})} = 46,4^{\circ}\text{C}.$$

Следовательно,

$$\tau_{охл} = \frac{9,2(1,8 \cdot 10^{-3})^2}{3,14^2 \cdot 1,06 \cdot 10^{-7}} \lg(1,27 \frac{130 - 46}{60 - 40}) = 21 \text{ с}.$$

*Расчет производительности вакуум-формовочной машины.* Продолжительность технологического цикла, в течение которого из листовой заготовки оформляется готовое изделие на однопозиционной машине, определяется выражением

$$\tau_{ц} = \tau_{з} + \tau_{н} + \tau_{ф} + \tau_{охл} + \tau_{м} + \tau_{р}$$

здесь  $\tau_{з}$  – длительность операций загрузки и закрепления листа, с;  $\tau_{н}$  – время нагрева, с;  $\tau_{ф}$  – время формования, с;  $\tau_{охл}$  – время охлаждения, с;  $\tau_{м}$  – время механической обработки, если она производится на той же машине, с;  $\tau_{р}$  – время разгрузки, с.

Производительность термоформовочных машин (в кг/с) может быть рассчитана: 1) по исходному сырью

$$Q_1 = B\rho S_3\delta_3/\tau_{ц},$$

где  $B = 0,75 \div 0,92$  – коэффициент использования оборудования по времени (в зависимости от организации производства на данном предприятии и

надежности работы машины);  $\rho$  – плотность термопласта,  $\text{кг/м}^3$ ;  $S_3$  – площадь заготовки,  $\text{м}^2$ ;  $\delta_3$  – толщина заготовки,  $\text{м}$ ;

2) по готовой продукции

$$Q_2 = B\rho (S_3\delta_3 - S_{\text{от}}\delta_{\text{от}})/\tau_{\text{ц}},$$

где  $S_{\text{от}}$  – площадь отходов термопласта,  $\text{м}^2$ ;  $\delta_{\text{о}}$  – средняя толщина отходов,  $\text{м}$ .

Зная массу готового изделия, производительность  $Q$  (в  $\text{кг/ч}$ ) рассчитывают по формуле

$$Q = 3,6 \, m n / \tau_{\text{ц}},$$

где  $m$  – масса изделия,  $\text{г}$ ;  $n$  – число оформленных изделий с одной заготовки, шт.;  $\tau_{\text{ц}}$  – время цикла,  $\text{с}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

### Основная

1. Барсукова Л.Г. Физико-химия и технология полимеров, полимерных композитов [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Барсукова Л.Г., Вострикова Г.Ю., Глазков С.С.— Электрон. текстовые данные.— Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2014.— 146 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/30852>.
2. Процессы и оборудование производства волокнистых и пленочных материалов / И.Н.Жмыхов [и др.]. – Минск: «Высшая школа», 2013. – 587с.
3. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб.пособие / М.Л.Кербер и [др.]. - СПб.: Профессия, 2014.- 592с. (1 экз.).
4. Крыжановский В.К. Технические свойства пластмасс / В.К.Крыжановский. – СПб.: Профессия, 2014. – 248 с. (1 экз.).
5. Композиты на основе полиолефинов / Под ред. Д.Нвабунмы, Т.Кю. - СПб: Научные основы и технологии, 2014. – 74 с. (2 экз.).
6. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. – СПб.: Научные основы и технологии, 2013. – 720 с. (2 экз.).
7. <http://techn.sstu.ru/new/SubjectFGOS/Default.aspx?kod=1034>

### Дополнительная

8. Шембель А.С. Сборник задач и проблемных ситуаций по технологии переработки пластмасс / А.С. Шембель, О.М. Антипина. Л.: Химия, 1990. – 272 с.
9. Пискарёв А.А. Нормирование расхода пластмасс в производствах их переработки / А.А. Пискарёв. М.: Химия, 1989. – 96 с.
10. Производства изделий их полимерных материалов: учеб. пособие / В.К. Крыжановский, М.А. Кербер, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко. – СПб: Профессия, 2004. – 464 с.
11. Оленев Б.А. Проектирование производств по переработке пластических масс / Б.А. Оленев, Е.М. Мордкович, В.Ф. Калошин. – М.: Химия, 1982. – 256 с.