

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 θ выявлено следующее соотношение:

F_0	0,38	0,50	0,55	0,595	0,605	0,62	0,70
θ	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; δ – толщина стенки изделия, м; α – 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 $\times$ К), $\rho=1400$ кг/м³. $T_2=110^\circ C$, $H_n=0,01$ 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); ρ – плотность, кг/м³; 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; $\eta_\tau = 0,4 \div 0,5$ – термический КПД, служащий для учета потерь теплоты в окружающую среду, т.е. КПД генератора ТВЧ; ε_r – 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 δ_ε – величина воздушного зазора между электродом и таблеткой, мм; α 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 пресс-материалы 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 τ_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 δ – толщина стенки изделия, м; α – коэффициент температуропроводности пресс-материала, м²/ч (табл. 1); t_ϕ – 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 τ_o , $\tau_{отв}$, α и γ_1 [1, 3]

Масса пресс-материала	Время вязкотекучего состояния τ_o , с	Время отверждения по пластометру $\tau_{отв}$, с	Коэффициент температуропроводности $\alpha \cdot 10^3$, м ² /ч	Температурный коэффициент, зависящий от типа пресс-материала, γ_1 , К ⁻¹ 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; α – коэффициент, зависящий от температуры прессования; β – 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, м ; T_c – температура стенки формы, К ; T_n – начальная температура пресс-материала, 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 ($T_{\text{ц}}=T_c-(4\div 5) \text{ К}$); ΔT – 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; ν – удельный объем, м³/кг; T – средняя температура, К; ρ – плотность при температуре переработки, кг/м³; π – коэффициент, характеризующий силу межмолекулярного взаимодействия, МПа; ω – коэффициент, характеризующий величину пространства, занимаемого молекулами, м³/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).

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

Таблица 3

Константы уравнения состояния

Материалы	M , кг/кмоль	π , МПа	ω , м ³ /кг	R' , 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 $50 \cdot 10^{-6}$ м³.

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

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

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

Примем обозначения: $G_{\text{и}}$ и $\nu_{\text{и}}$ – масса и объем изделия; ρ_p и G_p – плотность и масса расплава в форме.

$$G_{\text{и}} = G_p = \frac{\nu_\phi}{\nu} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{1,27 \cdot 10^{-3}} = 39 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

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); α – 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:

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

Пластикационная 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 ν – объем отливки, м³; ρ – плотность полимера, кг/м³.

Значения коэффициентов C_1 , C_2 приведены в табл. 4.

Таблица 4

Пример пластикационной способности

Параметры и коэффициенты	Объем впрыска за цикл $\nu \cdot 10^6$, м ³						
	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 минимально необходимая пластикационная способность $q_{\text{пл}}$, кг/ч	5	7	14	25	33	43	60

Пластикационной производительностью 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, м³; ρ – плотность материала, кг/м³; 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 пластикационной 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. $\tau_{\text{пов}}=40/(6-1)-(1,2+6+1) (6-2)/(6-1)=1,44 \text{ с};$
 $\tau_{\text{ц}}=1,2+6+1,44+1=9,64 \text{ с}; \quad Q=3,6 \text{ м}/\tau_{\text{ц}}=3,6 \cdot 35/9,64=13 \text{ кг/ч}.$

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 ³ /ч	Производительность компрессора давлением 0,8 МПа, м ³ /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 τ_n (в с) можно приближенно рассчитывать по формуле

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

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, м^2 ; δ – толщина заготовки, м ; ρ – 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, 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; φ – коэффициент использования лучистого потока, зависящий от соотношения размеров заготовки и нагревателя, а также от расстояния между ними (принимают $\varphi = 0,45 \div 0,65$); S_n – общая площадь нагревателя, м^2 ; T_1 – температура на поверхности нагревателя, К ; T_2 – средняя температура листовой заготовки за цикл нагрева, 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 $T_k = 130^\circ\text{С}$ или 403 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°С :

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

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 δ – 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; α – коэффициент температуропроводности, м²/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, $\alpha = 1,08 \cdot 10^{-7}$ м²/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/м³.

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); ρ – плотность термопласта, кг/м^3 ; S_3 – площадь заготовки, м^2 ; δ_3 – толщина заготовки, 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, м^2 ; $\delta_{\text{от}}$ – средняя толщина отходов, м .

Зная массу готового изделия, производительность Q (в кг/ч) рассчитывают по формуле

$$Q = 3,6 \, m n / \tau_{\text{ц}},$$

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