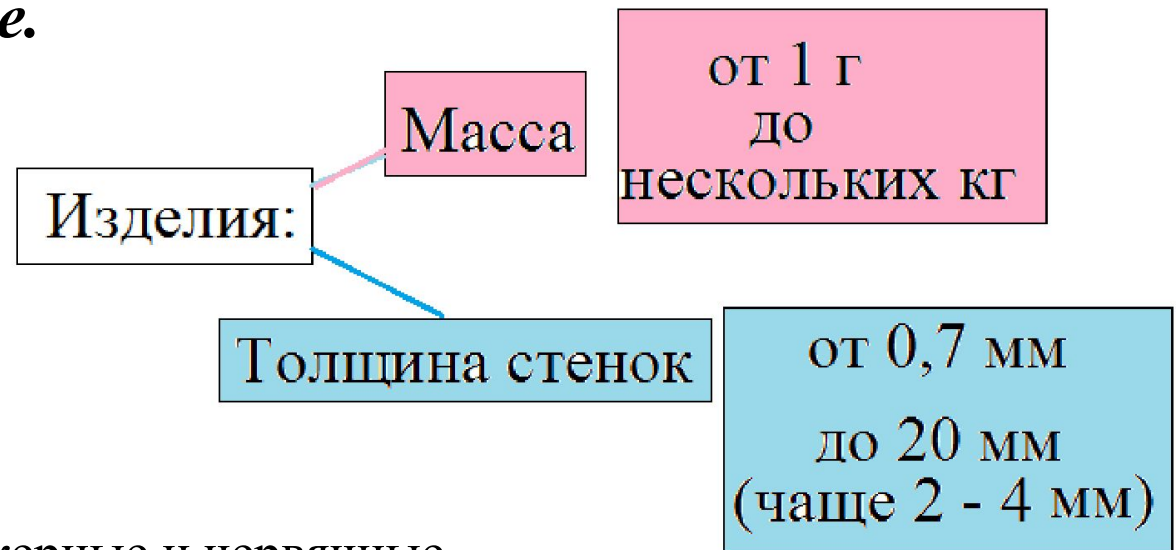
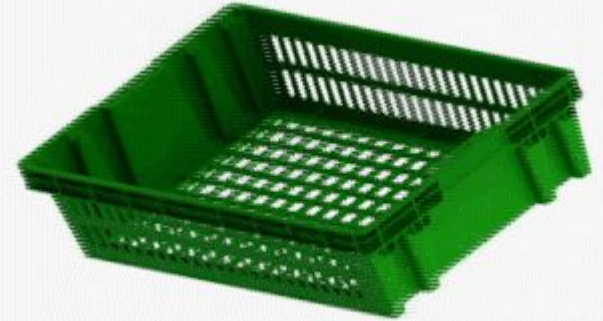


5.3 ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ТЕРМОПЛАСТОВ

Литье под давлением – метод формования изделий из полимерных материалов, заключающийся в *нагревании материала до вязкотекучего состояния и передавливании его в закрытую форму, где материал приобретает конфигурацию внутренней полости формы и переходит в твердое состояние.*



Оборудование: плунжерные и червячные литьевые машины



Основные стадии процесса литья под давлением

:

Получение сырья

Растваривание и хранение

Входной контроль сырья

Подготовка сырья к переработке

Стадия формования

Промежуточный контроль качества изделий

Обработка отформованных изделий

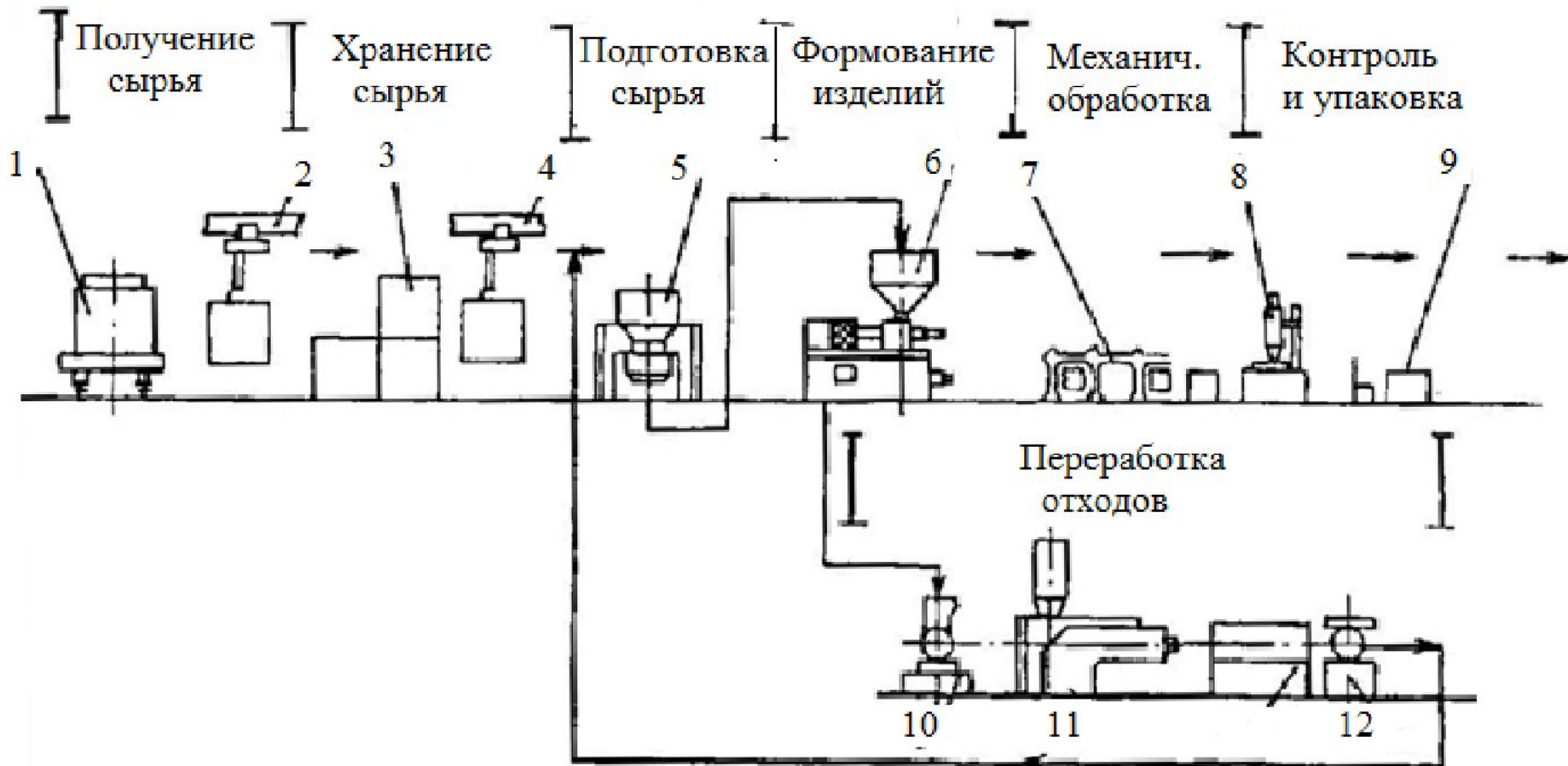
(термическая, механическая)

Контроль готовой продукции

Упаковка продукции

Хранение продукции

Технологическая схема производства литьевых изделий



Литьевая машина (ТПА)

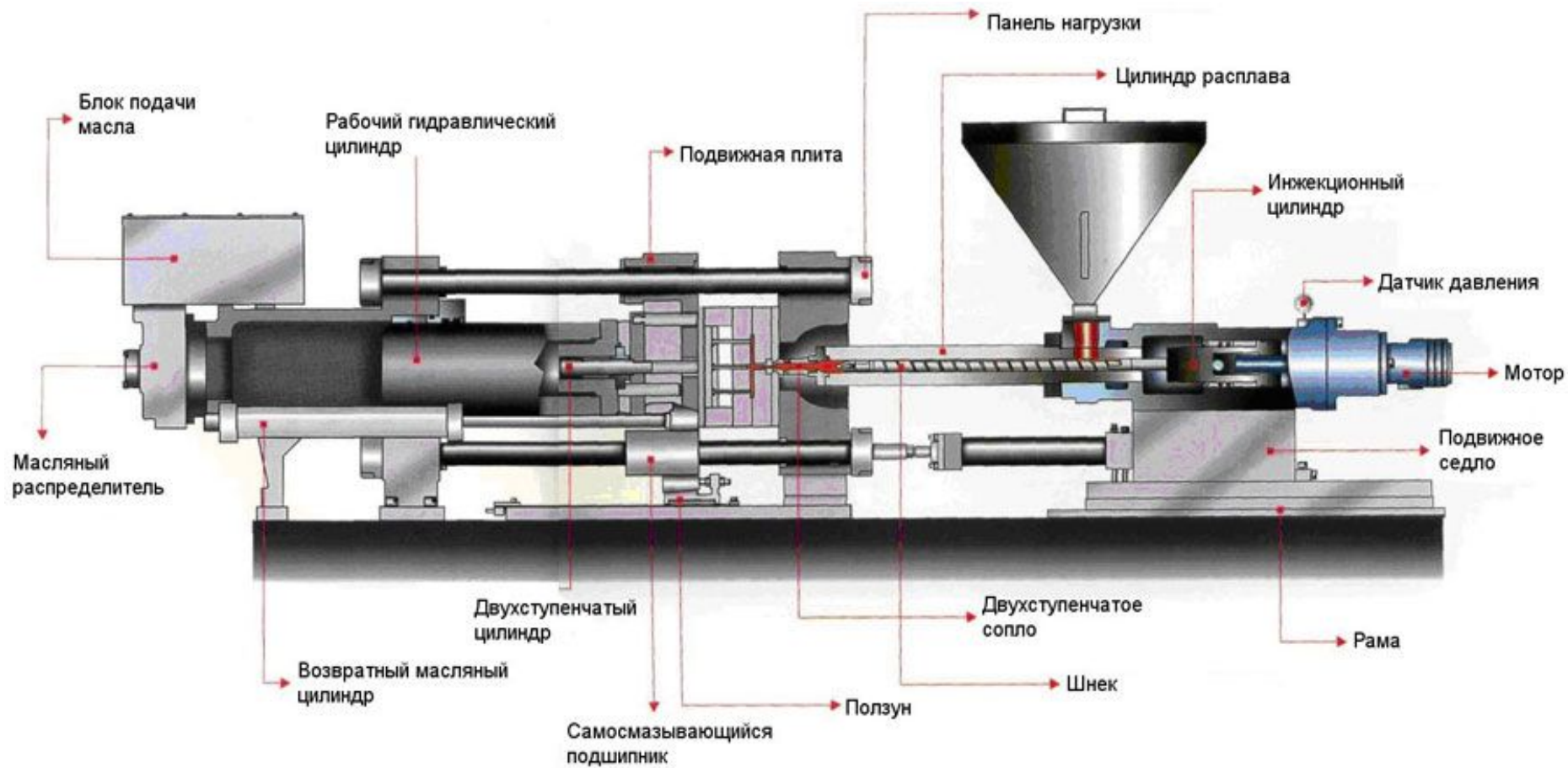


СХЕМА ПЛАСТИКАЦИОННОГО ЦИЛИНДРА

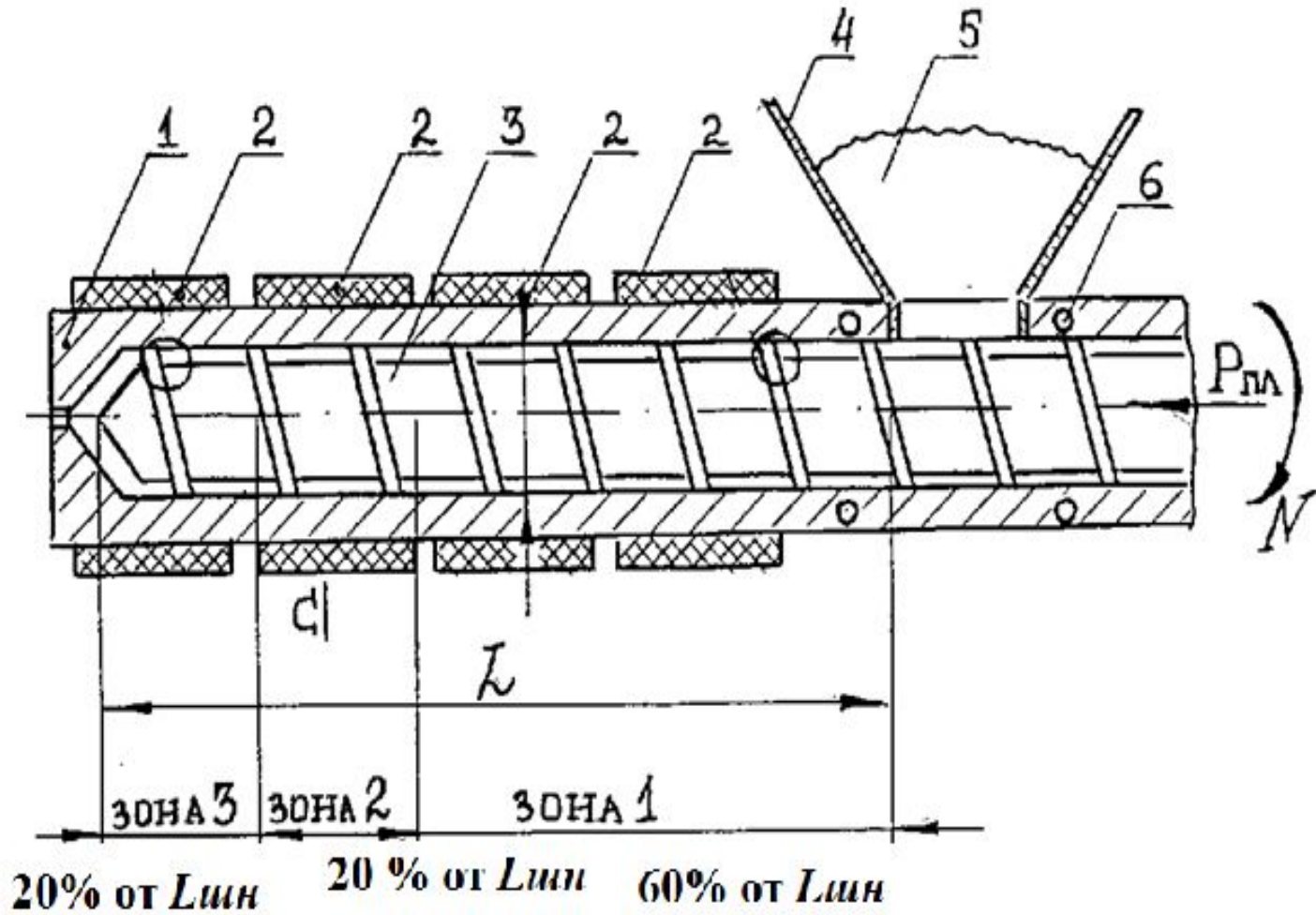
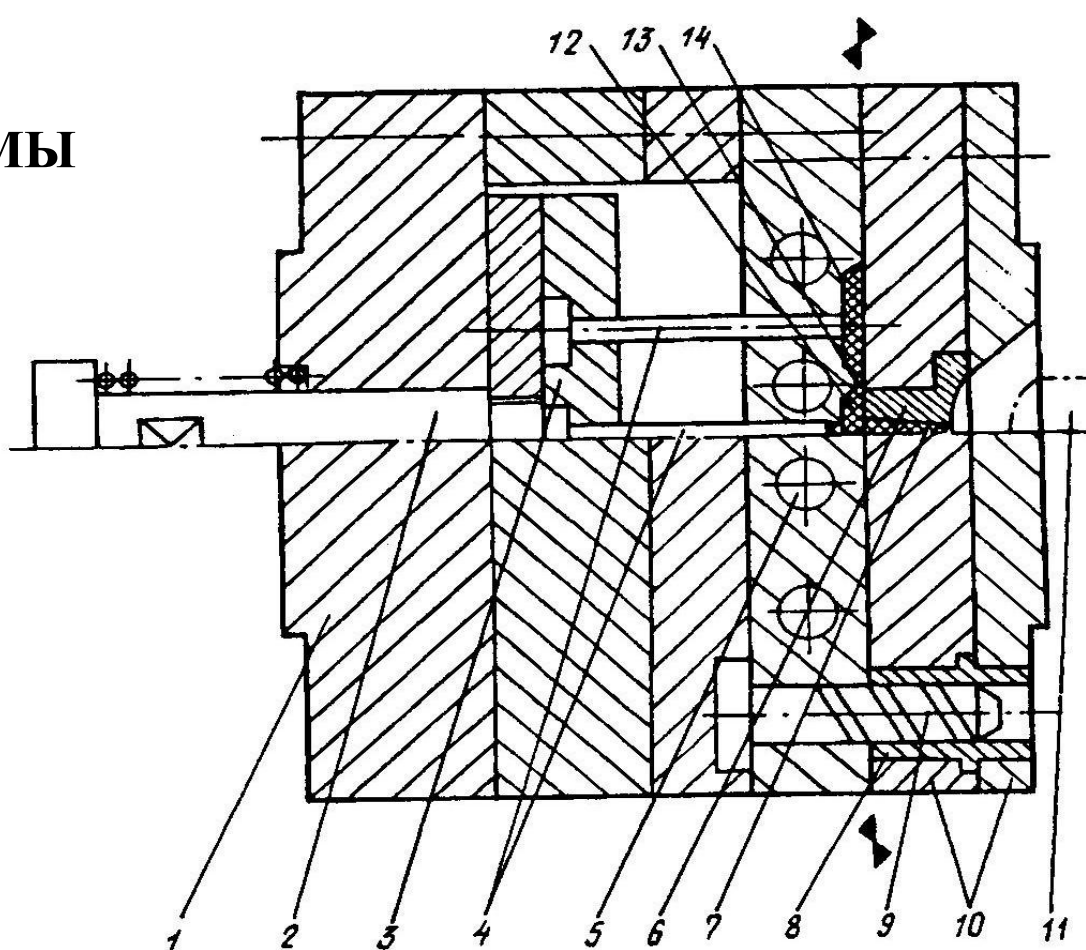


СХЕМА ЛИТЬЕВОЙ ФОРМЫ



1 – подвижная полуформа; 2 – толкатель; 3 – выталкивающая плита;
4 – выталкиватели; 5 – каналы термостатирования формы; 6 – литниковая втулка; 7 – центральный литник; 8 – центрирующая втулка; 9 – центрирующая колонка; 10 – неподвижная полуформа; 11 – сопло литейной машины;
12 – разводящий литник; 13 – впускной литник; 14 – формообразующая полость

Технологические параметры литья под давлением:

- Основание для выбора параметров - теплофизические и вязкостные свойства полимерного материала
- Температурные: T_l (T_1, T_2, \dots), T_f
- Силовые: $P_l, P_f, P_{пл}, F_{см}$
- Временные: $t_{впр}, t_{впд}, t_{охл}, t_{пл}, t_{цикл}, t_{маш}$
- Скоростные: $Q_{впр}, N_{шн}$
- Объемные: $V_{впр}$

ВЫБОР МАРКИ МАТЕРИАЛА

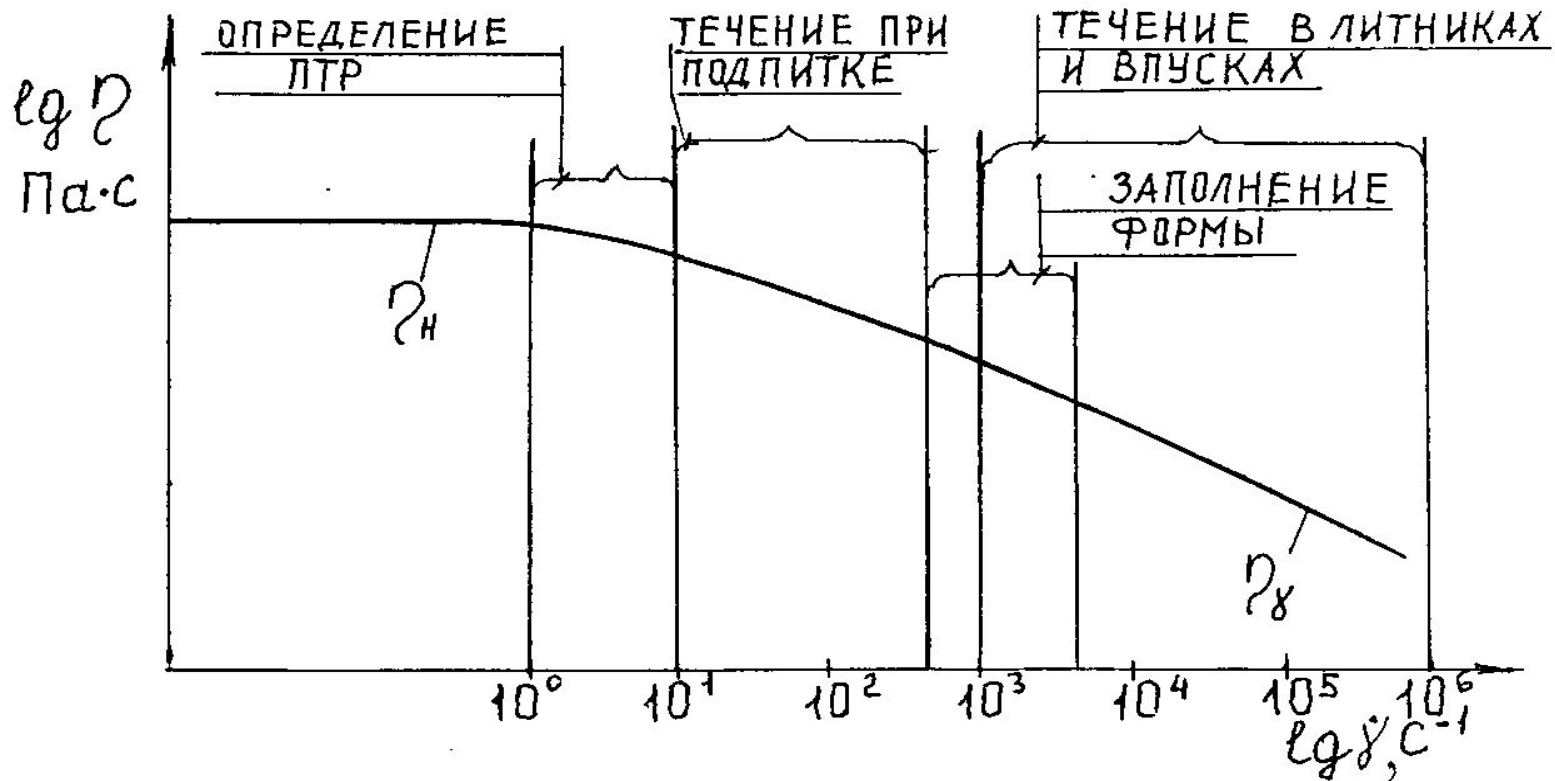


Уровни вязкости базовых марок полимеров (Па*с)

η_1	η_2	η_3	η_4	η_5	η_6	η_7
Самая низко-вязкая	Очень низко-вязкая	Низко-вязкая	Средне-вязкая	Высоко-вязкая	Очень высоко-вязкая	Самая высоко-вязкая
10^1	10^1-10^2	$10^2 - 10^3$	10^3-5*10^3	$5 *10^3 -10^4$	$10^4 -5*10^4$	$5*10^4 - 10^6$
	ПТР2	ПТР 3	ПТР 4	ПТР 5	ПТР 6	
Волокна					Выдувное формование	Прессование
		Покр тия			Каландрование	
	Литье под давлением					
	Экструзия					

ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ СЫРЬЯ

- Показатели вязкости расплава
- Вязкость ньютоновская, вязкость эффективная и ПТР



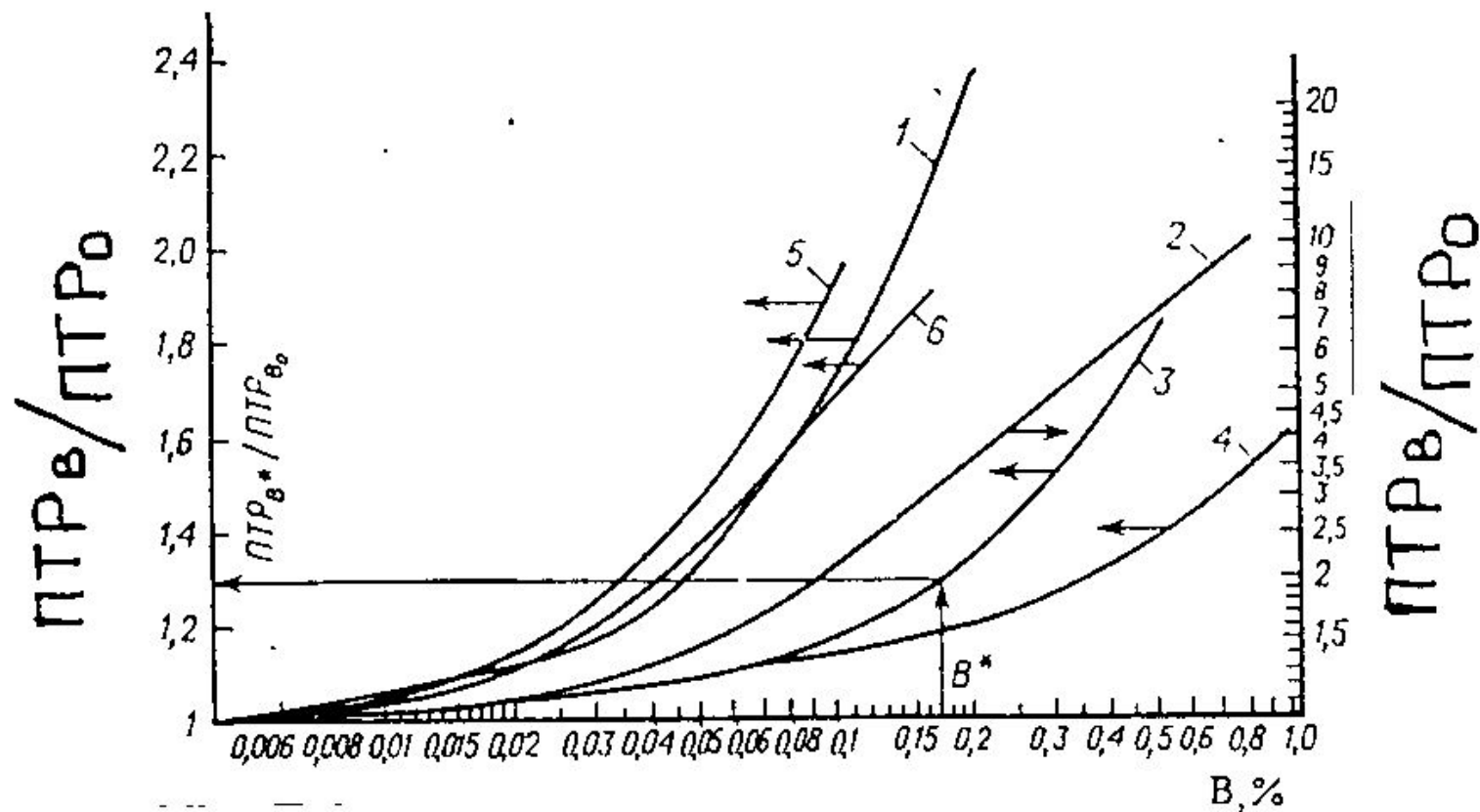
ПОКАЗАТЕЛЬ ТЕКУЧЕСТИ РАСПЛАВА (ПТР)

$$\text{ПТР} = \frac{M \times 600}{t} \text{ [г/ 10 мин]},$$

$$\text{ПТР} = f(1/\eta)$$

Корректировка технологических параметров литья по ПТР

ПТР	Вязкость	Формуемость	Рекомендации
Низкий	Высокая	Текучность понижена	Повышать температуру и давление литья
Высокий	Низкая	Текучность повышена	Понижать температуру и давление литья



Зависимость ПТР полимеров от содержания влаги

1- ПК, 2 - ПА-12, 3 - ПА-610, 4 - ПА-6, 5 - ПЭТФ, 6 - ПБТФ

Корректировка технологических параметров по термостабильности расплава

Показатель стабильности	Термостабильность	Рекомендации по технологическим режимам
К		
Более 30 мин	Хорошая	При необходимости можно повышать $T_{л}$, $N_{шн}$, $R_{пл}$, $Q_{впр}$, $T_{сушки}$, время сушки
20 - 30 мин	Удовлетворительная	Применяют средние $T_{л}$, $N_{шн}$, $R_{пл}$, $Q_{впр}$, $T_{сушки}$
Менее 20 мин	Низкая	Понижают $T_{л}$, $N_{шн}$, $R_{пл}$, $Q_{впр}$, $T_{сушки}$

Период термостабильности t_m должен быть больше времени $t_{преб}$

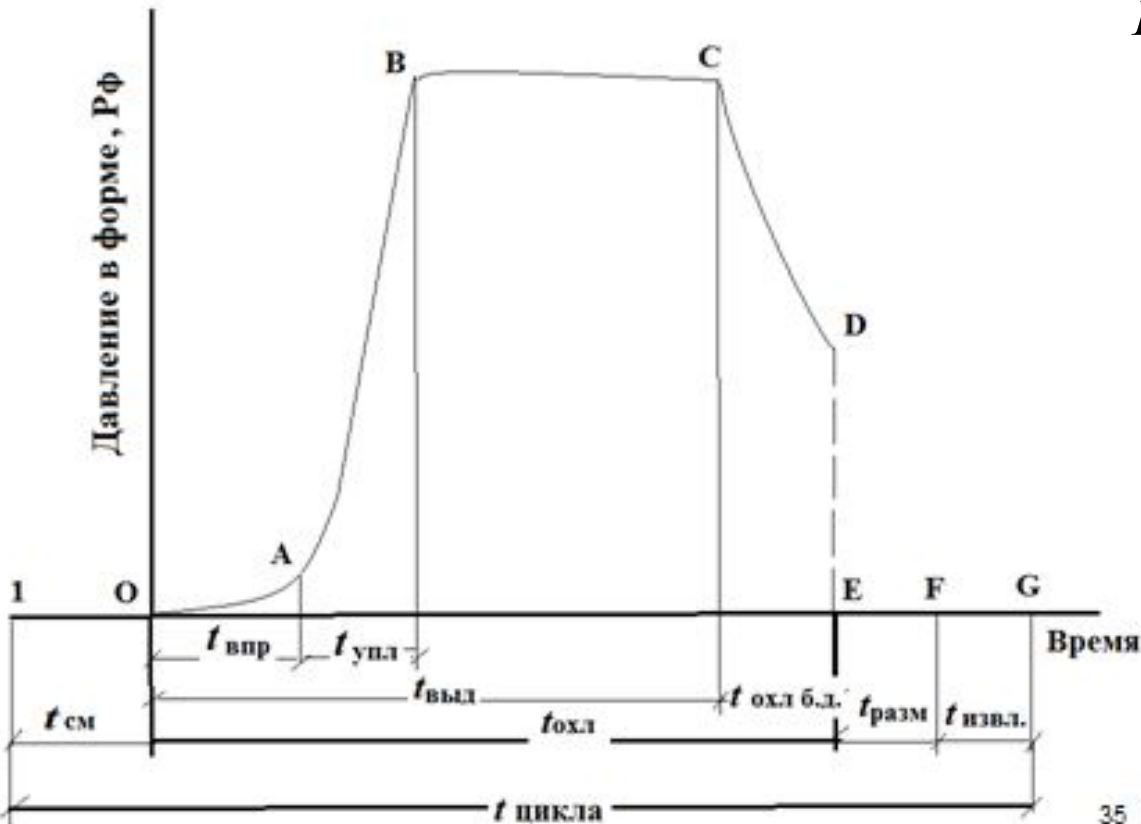
Время пребывания $t_{преб} = (G_M / G_{отл}) * t_{ц}$

$G_M = G_{псп} \times K$, где K - количество отливок в пластикационном цилиндре; $K = 3 - 5$

- Подготовка полимера к переработке
- Определяют влажность W , с которой полимер поступил на переработку и сравнивают с
- допустимой влажностью материала перед переработкой W , %
- Температура сушки, T_c , °C
- Продолжительность сушки, t_c (час)
- Допустимое время пребывания сухого материала вне герметичной тары, $t_{увл}$ (час)

СТАДИИ ЦИКЛА ФОРМОВАНИЯ ЛИТЬЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

ДИАГРАММА «ДАВЛЕНИЕ В ФОРМЕ – ВРЕМЯ»



1. Смыкание литъевой формы ($t_{см}$);
2. Набор дозы материала, нагрев и пластикация ($t_{пл}$);
3. Впрыск расплава материала в форму ($t_{впр}$);
4. Уплотнение расплава материала ($t_{упл}$);
5. Выдержка под давлением ($t_{выд}$);
6. Охлаждение без давления ($t_{охл б.д.} \equiv t_{пл}$);
7. Раскрытие формы ($t_{разм}$);
8. Извлечение изделия из формы ($t_{извл. изд.} \equiv t_{паузы}$)

Общая продолжительность цикла

- $t_{ц} (с) = t_{охл} + t_{маш} + t_{пауз}$
- $t_{ц}$ определяет производительность
- $t_{охл}$ составляет до 80% от $t_{ц}$
- $t_{охл}$ можно рассчитать по формуле:

$$t_{охл} = - (h^2/\alpha) \lg[0,787(T_{и} - T_{ф}) / (T_{р} - T_{ф})]$$

где h ; - половина толщины изделия, м;

α - коэффициент температуропроводности полимера, м²/с

$T_{и}$ - температура в центре изделия, в момент извлечения

$T_{м}$ и $T_{ф}$ - температура материала (литья) и формы,

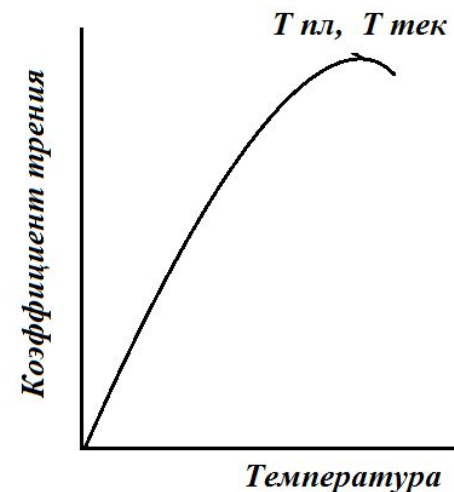
ЗАГРУЗКА СЫРЬЯ В ПЛАСТИКАЦИОННЫЙ ЦИЛИНДР

Гранулы или порошок: **Гранулы +** , **порошок -**

Размер гранул первичного материала или частиц вторичного (дробленного) материала (Φ) должен соответствовать глубине витка шнека h_1 в зоне загрузки (питания).

$(\Phi \geq (0,85 \div 1)h_1)$ | **ПЛОХО** $0,3 h_1 \geq \Phi \leq 0,85 h_1$ - **хорошо**
 $\Phi \leq 0,3h_1$

$K_{\text{тр о шнек}} < K_{\text{тр о цилиндр}}$



СТАДИЯ ПЛАСТИКАЦИИ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАСТИКАЦИИ

Температура плаستيкаионного (нагревательного) цилиндра по зонам (T_1, T_2, \dots, T_i , начиная от фланца), °C

Температура материала по зонам цилиндра отличается от температуры соответствующих зон цилиндра как в \oplus , так и в \ominus в зависимости от размещения термопары

Частота вращения шнека (N), об/мин

Давление плаستيкации (*противодавление, реактивное давление*) ($P_{пл}$), бар (атм, МПа) и его профиль

Задаваемый ход шнека при впрыске (H или S), мм

СТАДИЯ ПЛАСТИКАЦИИ

Время пластикации ($t_{пл}$), сек

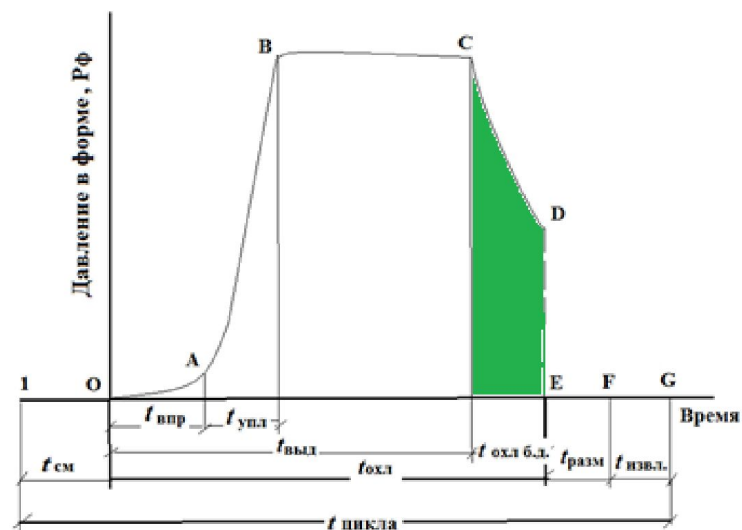
Пластиковая производительность ($Q_{пл}$), кг/час или г/сек

Время пластикации ($t_{пл}$):

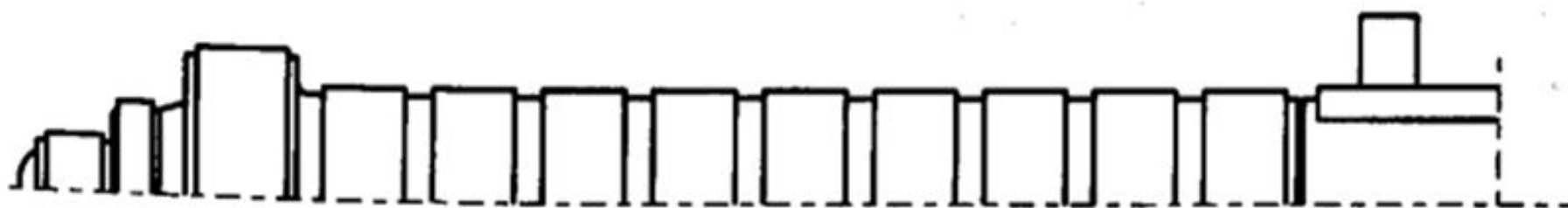
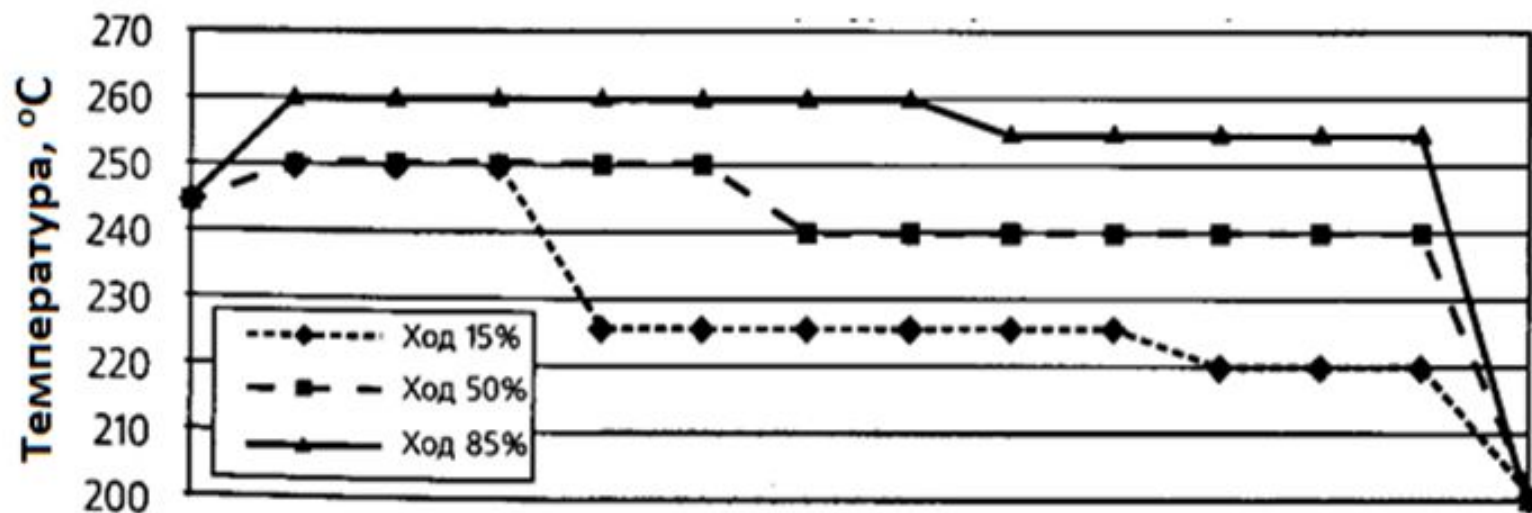
$$t_{пл} = t_{охл} - t_{впд}$$

$$Q_{пл} = m_{отл} / t_{пл} \quad [\text{г/с}]$$

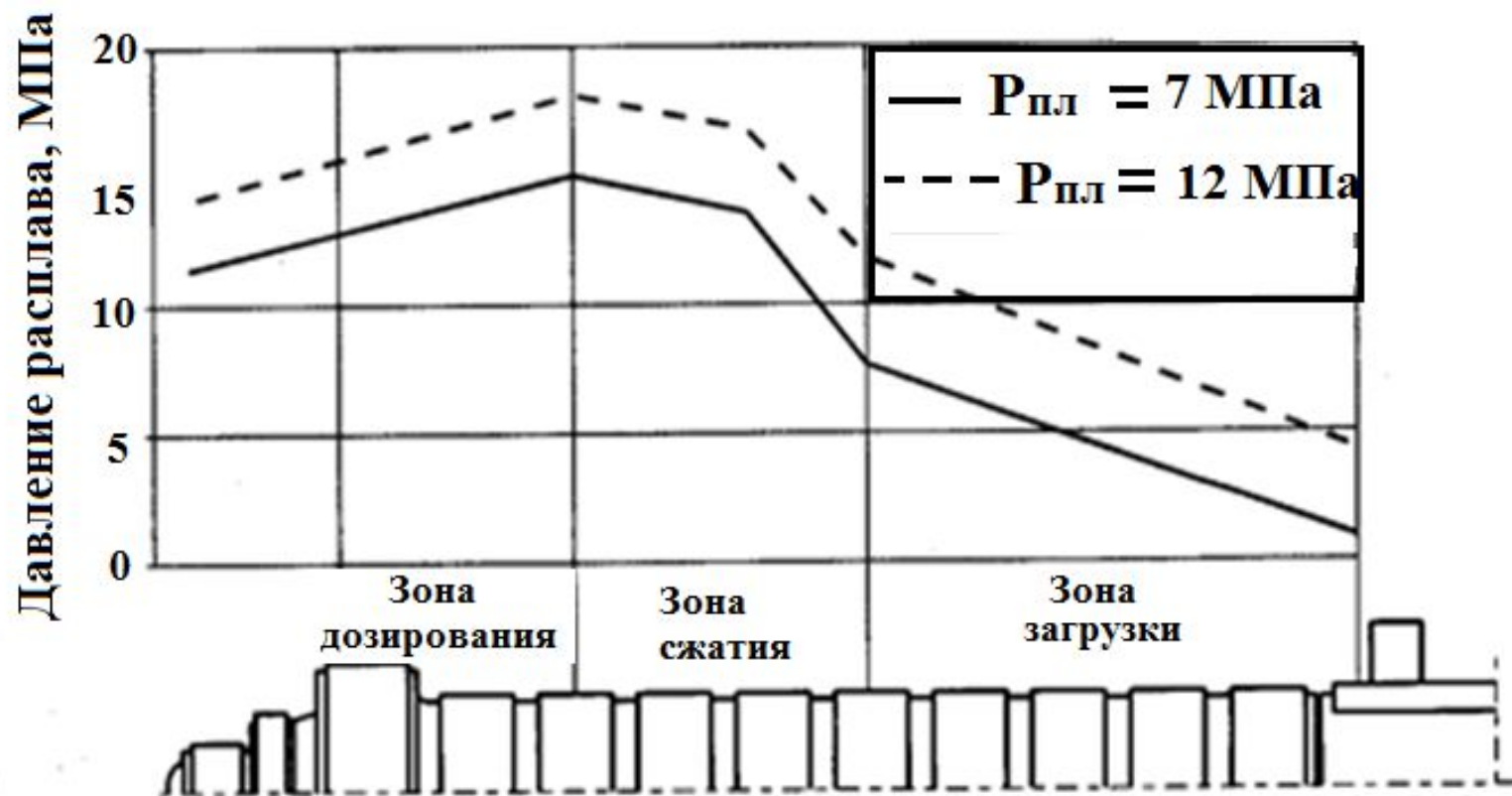
$$Q_{пл} = V_{отл} / t_{пл} \quad [\text{см}^3/\text{с}]$$



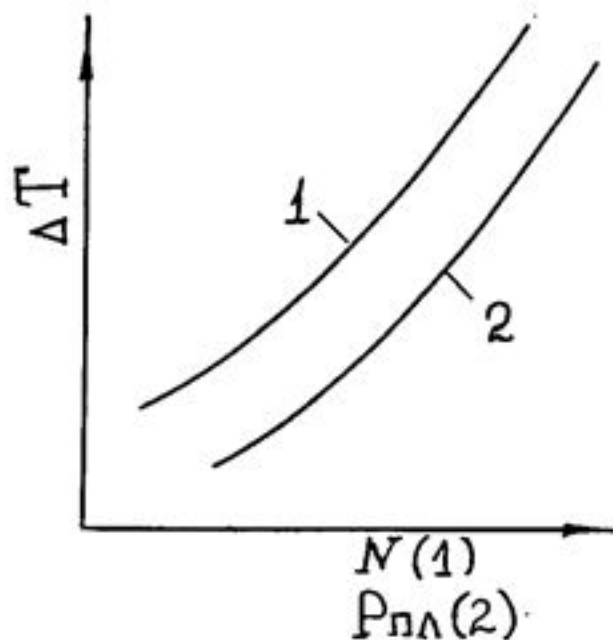
Профиль температур пластикационного цилиндра при максимальном и минимальном ходе шнека при наборе дозы



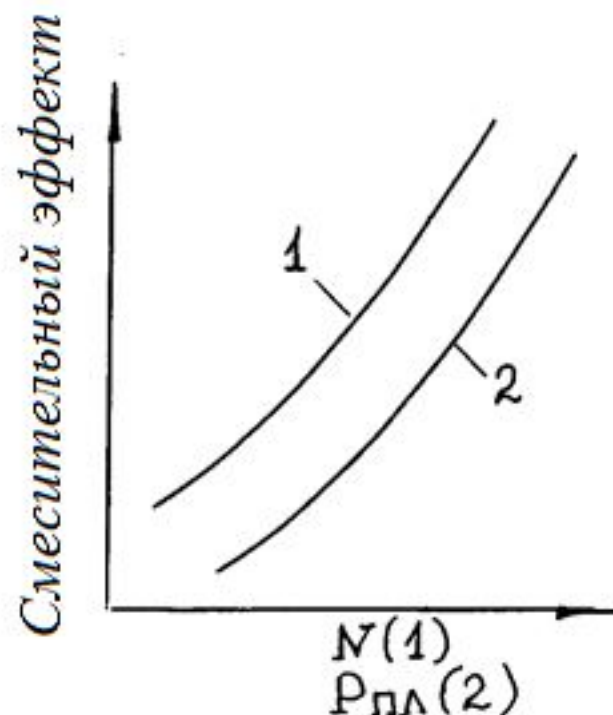
Давление расплава в пластикационном цилиндре во время набора дозы



Давление пластикации



Влияние на повышение температуры расплава при пластикации частоты вращения шнека N и давления пластикации $P_{пл}$.



Влияние на смесительный эффект при пластикации частоты вращения шнека N и давления пластикации $P_{пл}$.

ТЕМПЕРАТУРА РАСПЛАВА T_r (или T_m)

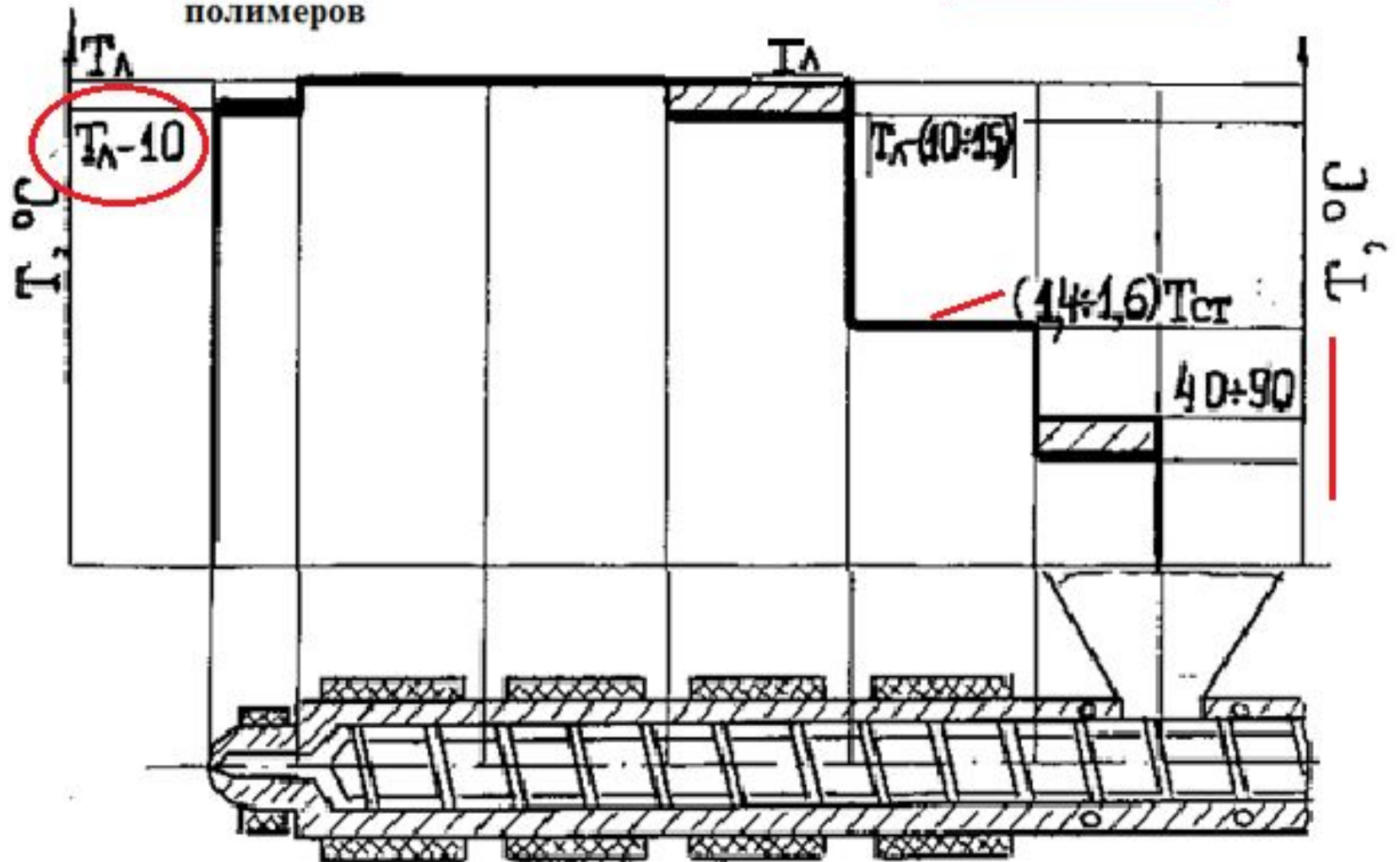
Для аморфных полимеров:

- $T_{\text{мин}} = T_{\text{тек}} + (15-20) \text{ } ^\circ\text{C}$ (Для ПС 195 $^\circ\text{C}$)
- $T_{\text{макс}} = T_{\text{дестр}} - (15-20) \text{ } ^\circ\text{C}$ (Для ПС 240 $^\circ\text{C}$)

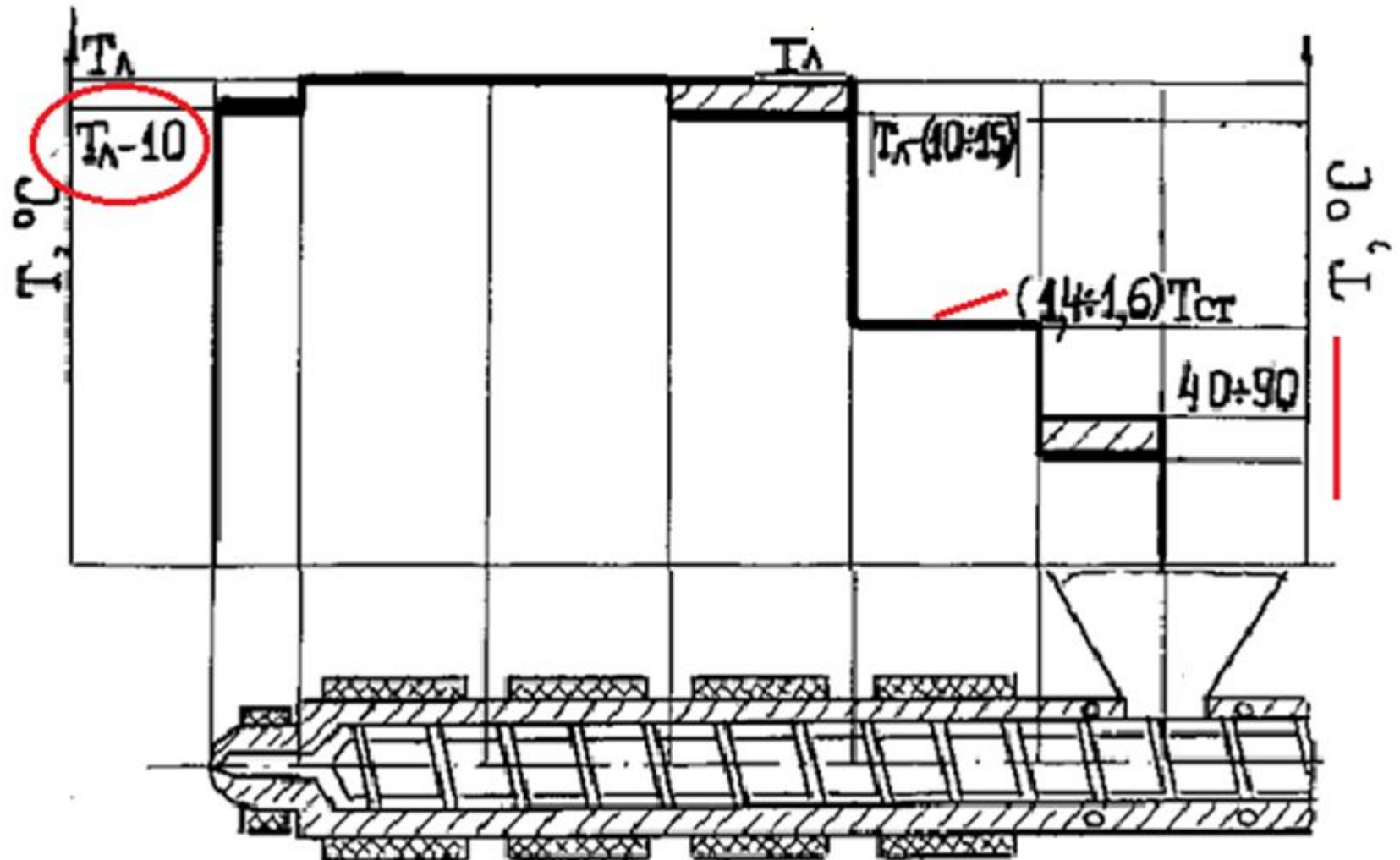
Для кристаллических полимеров:

- $T_{\text{мин}} = T_{\text{пл}} + (15-20) \text{ } ^\circ\text{C}$ (Для ПА-6 230 $^\circ\text{C}$)
- $T_{\text{макс}} = T_{\text{дестр}} - (15-20) \text{ } ^\circ\text{C}$ (Для ПС 280 $^\circ\text{C}$)

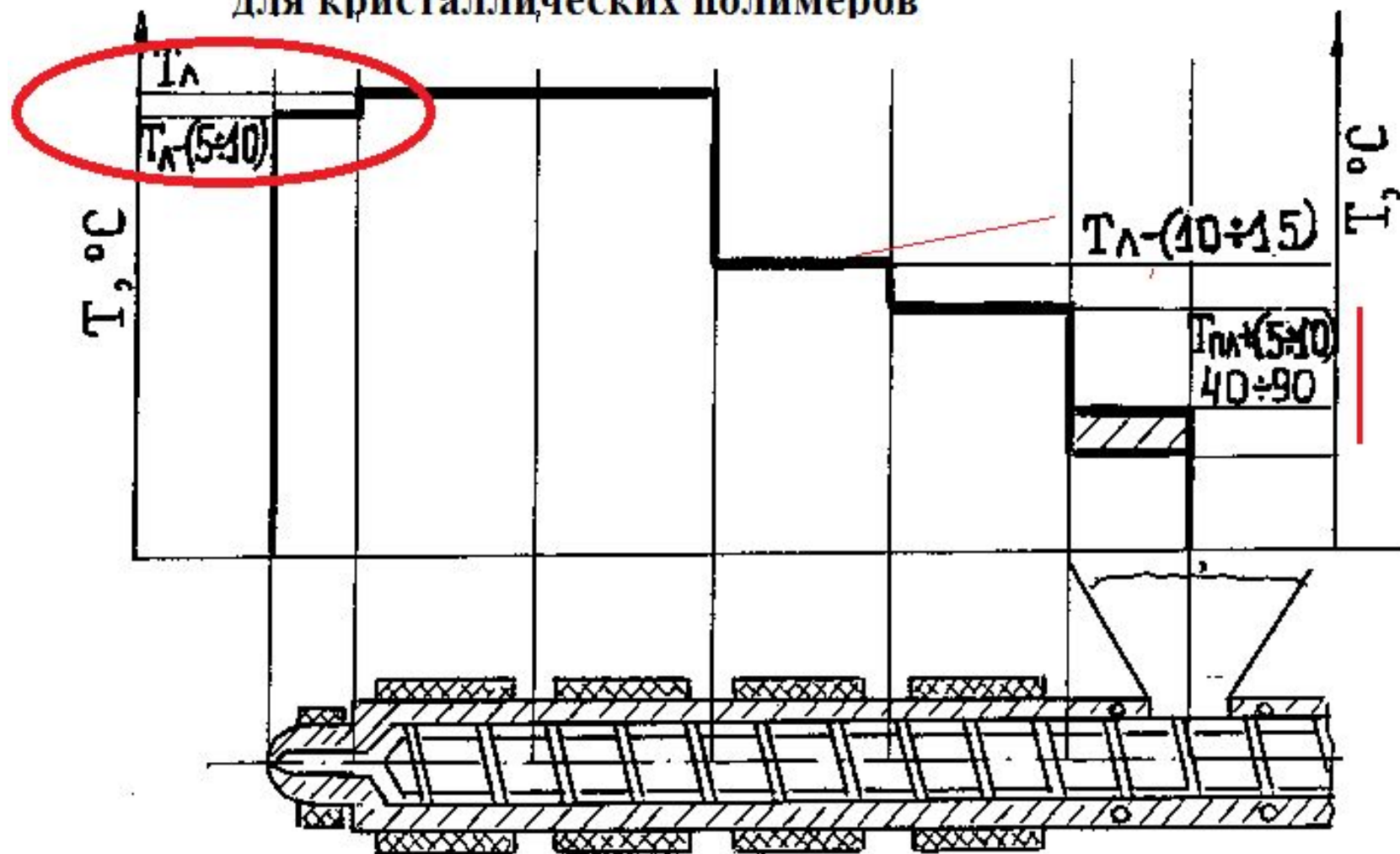
Распределение температур по зонам цилиндра для аморфных полимеров



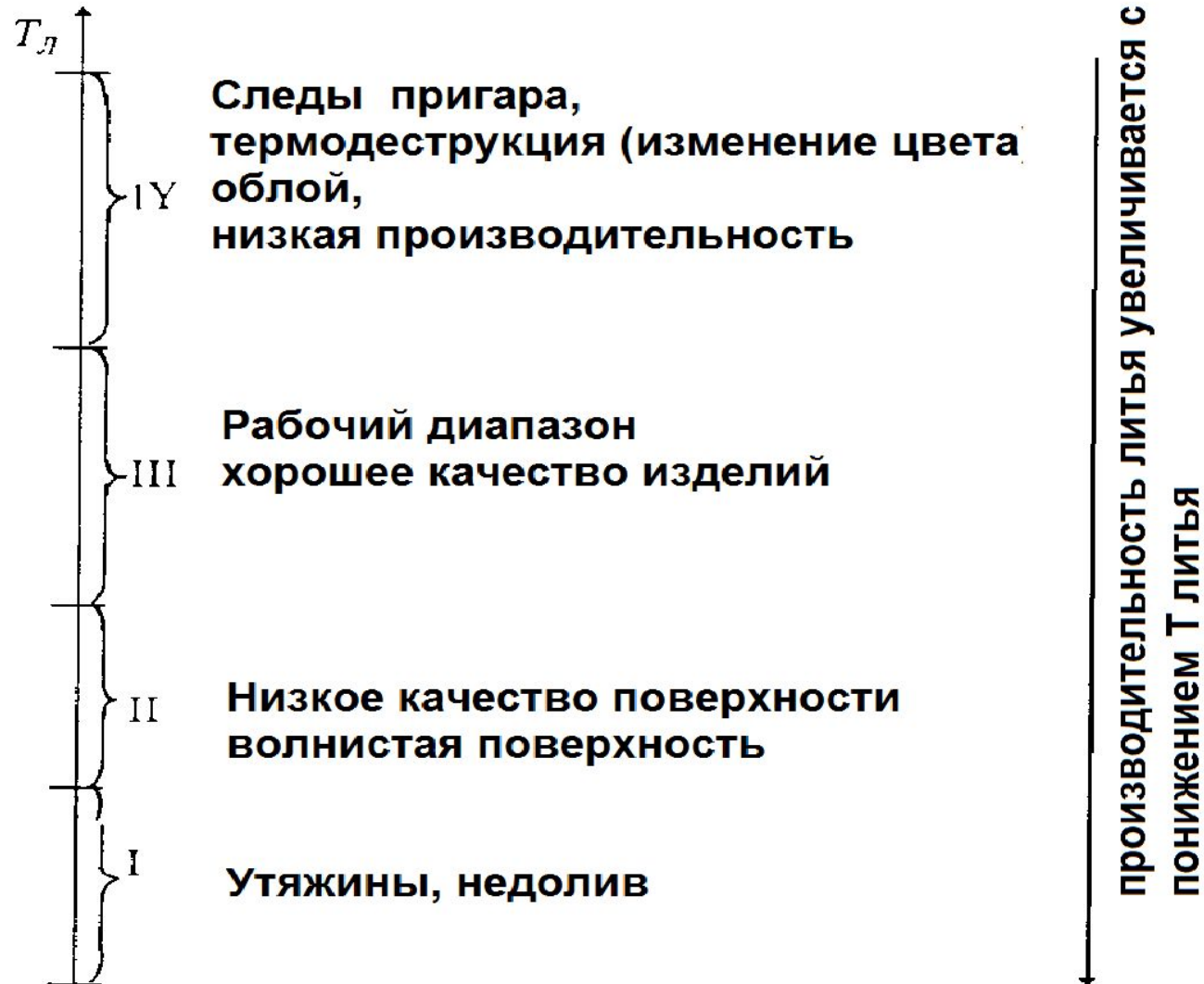
Распределение температур по зонам цилиндра для аморфных полимеров при $V_{отл} > 0,3 V$ цилиндра



Распределение температур по зонам цилиндра для кристаллических полимеров



Рабочий диапазон температур литья



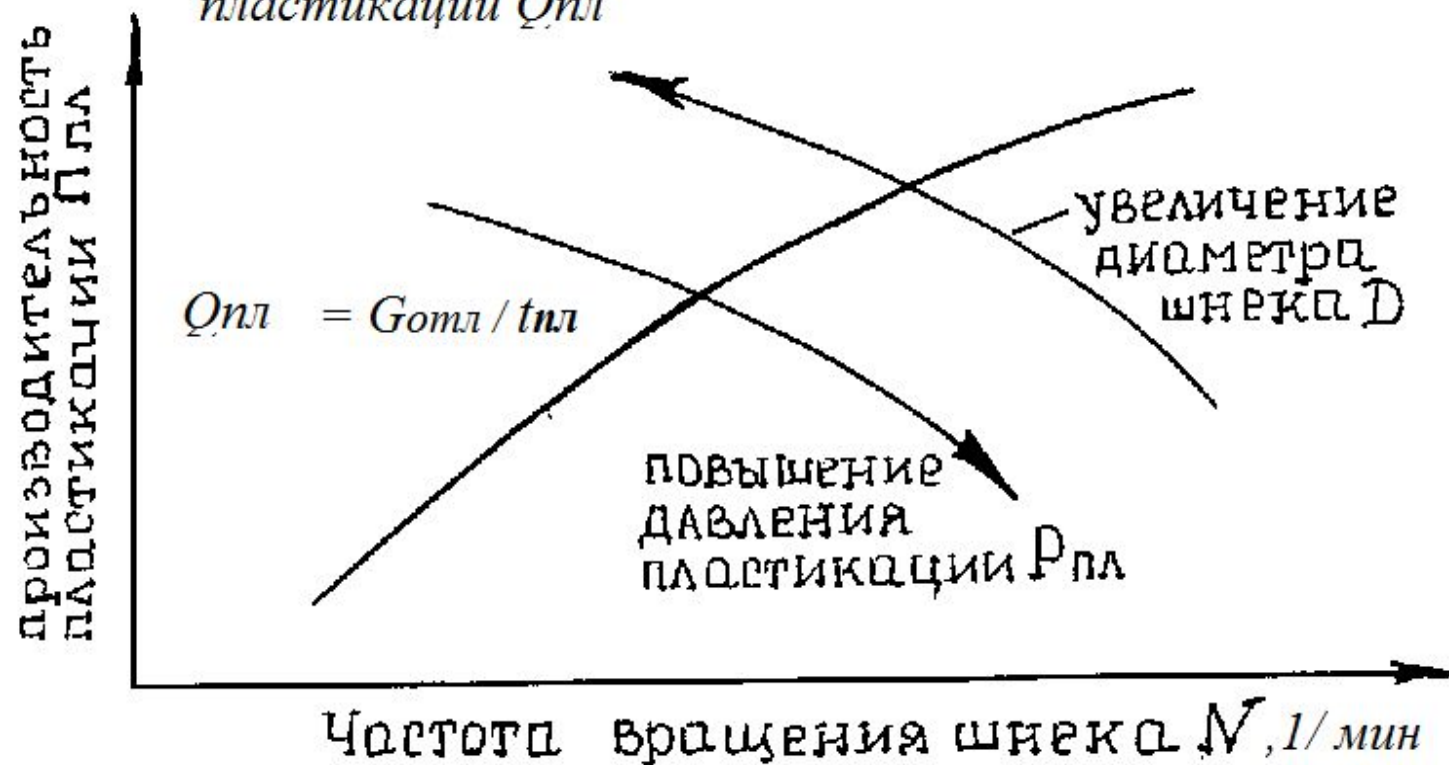
Частота вращения шнека

$$N = V \times 60\,000 / (\pi \times D), \text{ мин}^{-1}$$

где: D - диаметр шнека, мм

V - линейная скорость, м/мин.

Влияние N , $P_{\text{пл}}$, $D_{\text{ш}}$ на производительность
пластикации $Q_{\text{пл}}$



СТАДИЯ ЗАПОЛНЕНИЯ ФОРМЫ: Впрыск расплава + Заполнение формующей полости

Технологические параметры впрыска

Объем дозы расплава ($V_{\text{впр}}$), см^3 или вес дозы расплава, г

Объемная скорость впрыска (Q), $\text{см}^3/\text{с}$

Вес отливки G (в г) определяют по формуле:

$$G_{\text{отл}} = \rho^{23\text{C}} * V_{\text{изд}}^{23\text{C}} * n = \rho^{\text{Тр}} * V_{\text{изд}}^{\text{Тр}} * n$$

Вес отливки G и ход шнека H связаны прямо пропорциональной зависимостью: $G * K = H * S_{\text{ш}} * \rho^{\text{Тр}}$,

где $K = 1,2 - 1,25$, а $S_{\text{ш}}$ - площадь сечения наконечника шнека.

Ход шнека : $H = (G * K / (S_{\text{ш}} * \rho^{\text{Тр}}))$,

Ход шнека должен быть таким, чтобы после впрыска оставалась «подушка» = 3 - 5% подготовленного объема расплава

Температура формы ($T_{\text{ф}}$), °C

Давление литья ($P_{\text{л}}$), бар или МПа

Давление в формующей полости ($P_{\text{ф}}$), бар или МПа

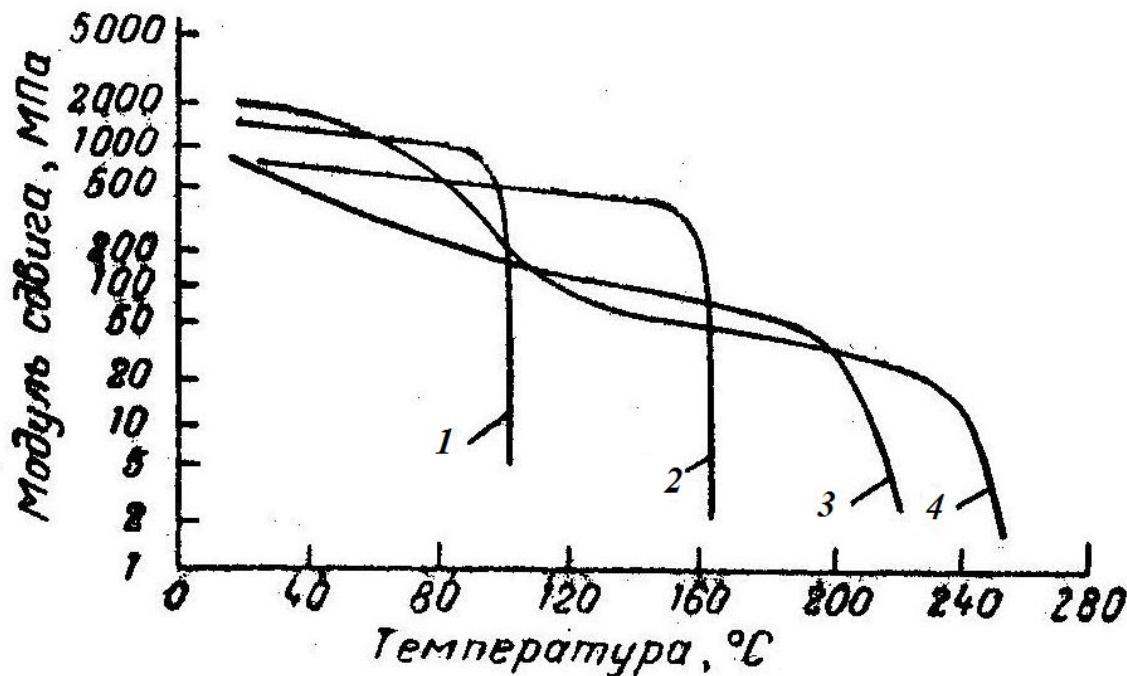
Температура формы (Тф)

Тф должна быть ниже, чем Тформоустойчивости материала изделия (по зависимости $E = f(T)$)

Для аморфных - Тф ниже, чем Тст. \approx на (30 – 40) °С;

Для кристаллических – Тф из условия:

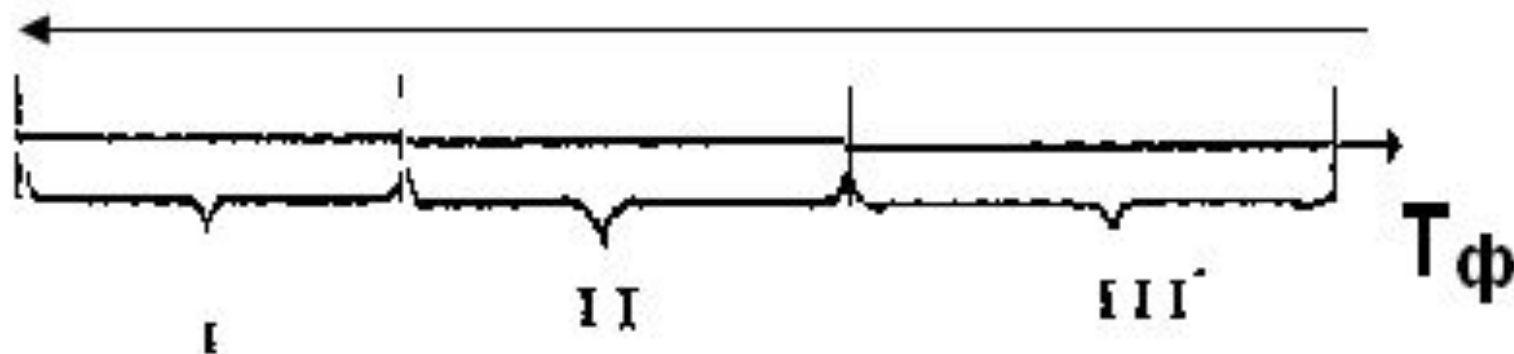
$$\text{макс. скор кр} \approx \frac{1}{2} (T_r + T_f)$$



Зависимость модуля сдвига термопластов от температуры:

1 — полистирол; 2 — поликарбонат; 3 — полнаамид 6; 4 — полиэтилентерефталат.

РОСТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

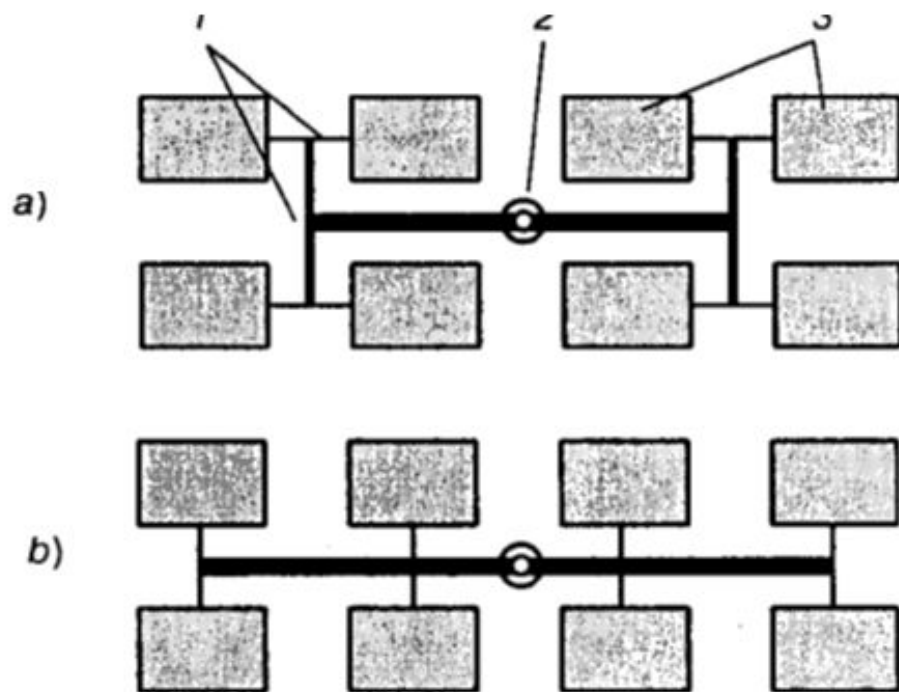


НЕДОЛИВЫ

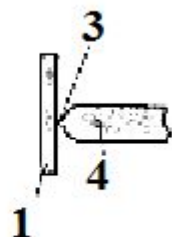
**ИЗДЕЛИЯ НЕВОЗМОЖНО ВЫНУТЬ ИЗ
ФОРМЫ (СЛИШКОМ МЯГКИЕ)**

**РАБОЧИЙ ДИАПАЗОН
(УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНАЯ ПЕРЕРАБОТКА,
ДОПУСТИМОЕ КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЙ)**

Схематическое изображение различных типов расположения литниковых каналов:

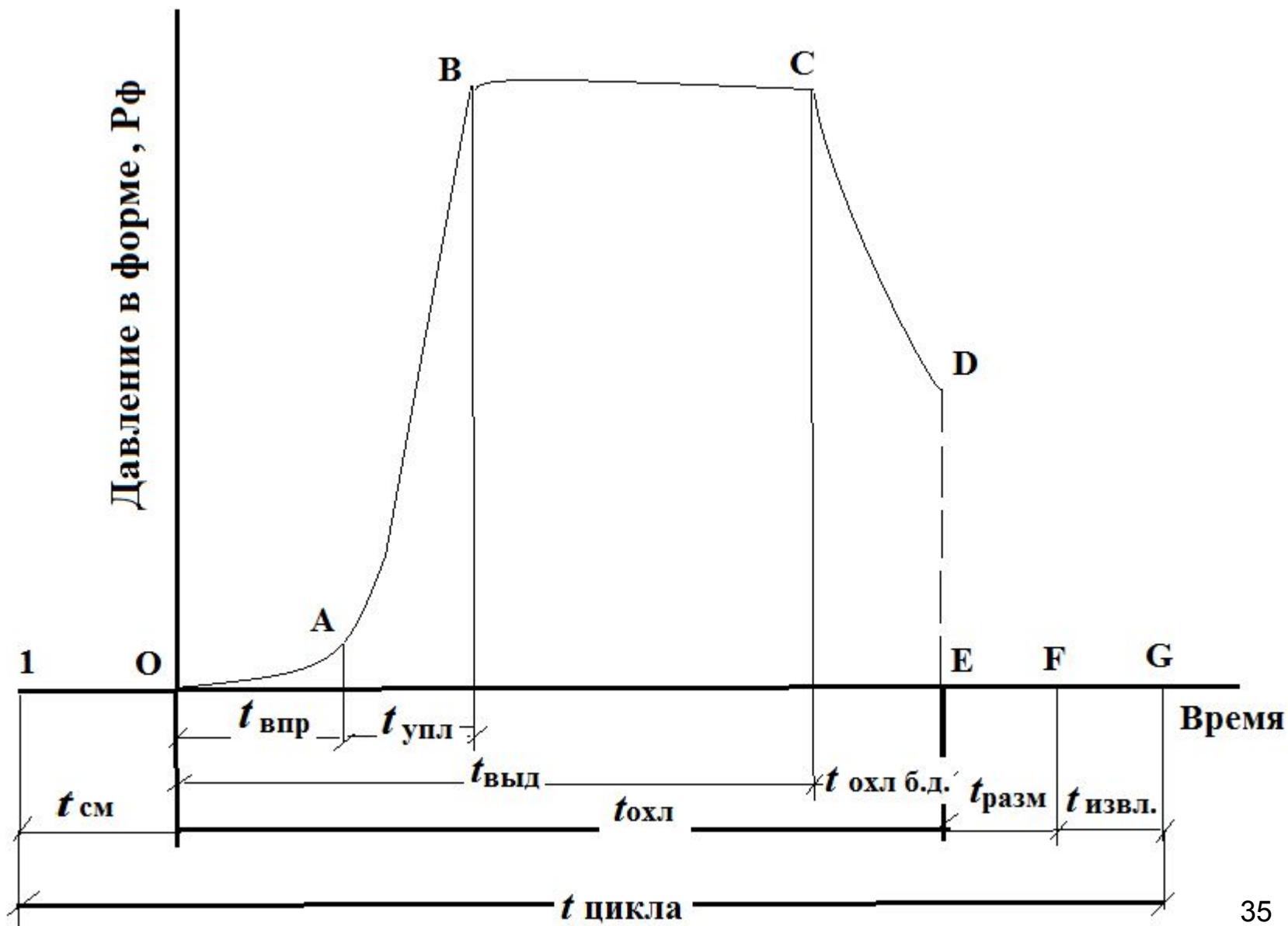


1 — разводящие литники; 2 — центральный литник; 3 — формирующие полости



1 - отливка, 2 - центральный литник, 3 - точечный впускной литник

ДИАГРАММА «ДАВЛЕНИЕ В ФОРМЕ – ВРЕМЯ»



СХЕМЫ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ФОРМЫ

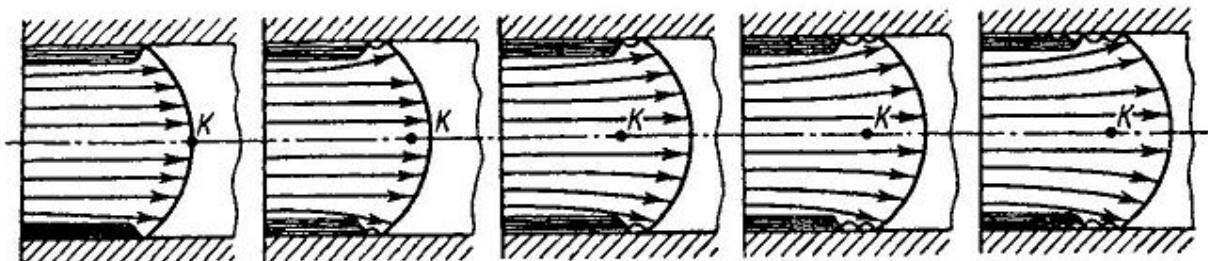


Схема движения полимера при заполнении формы во фронтальном режиме

Схема перемещения расплава при заполнении формы типа "диск"

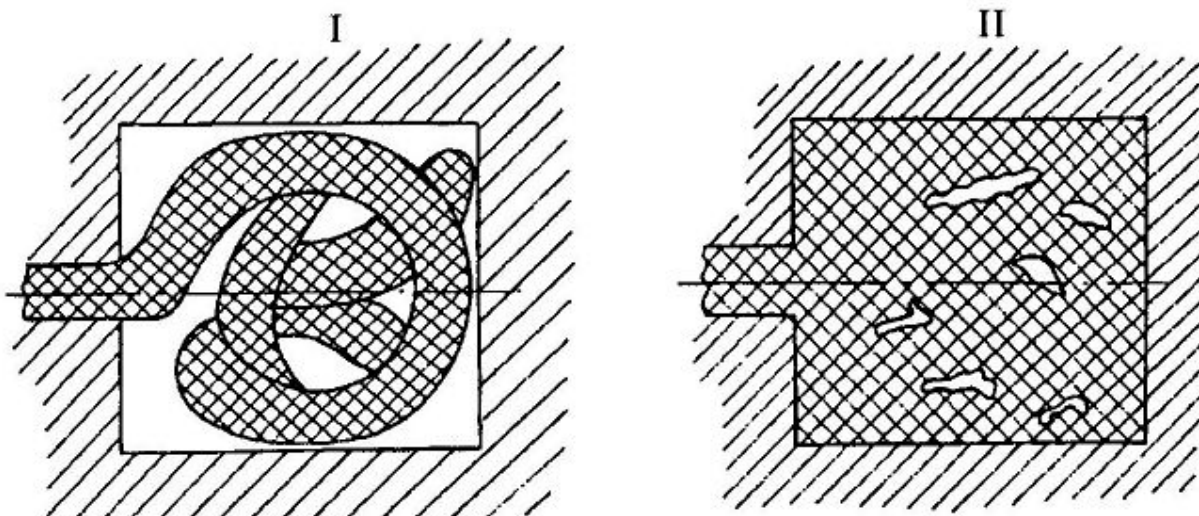
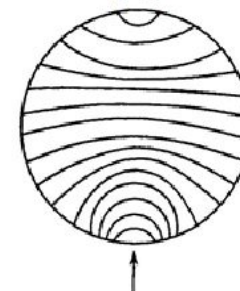
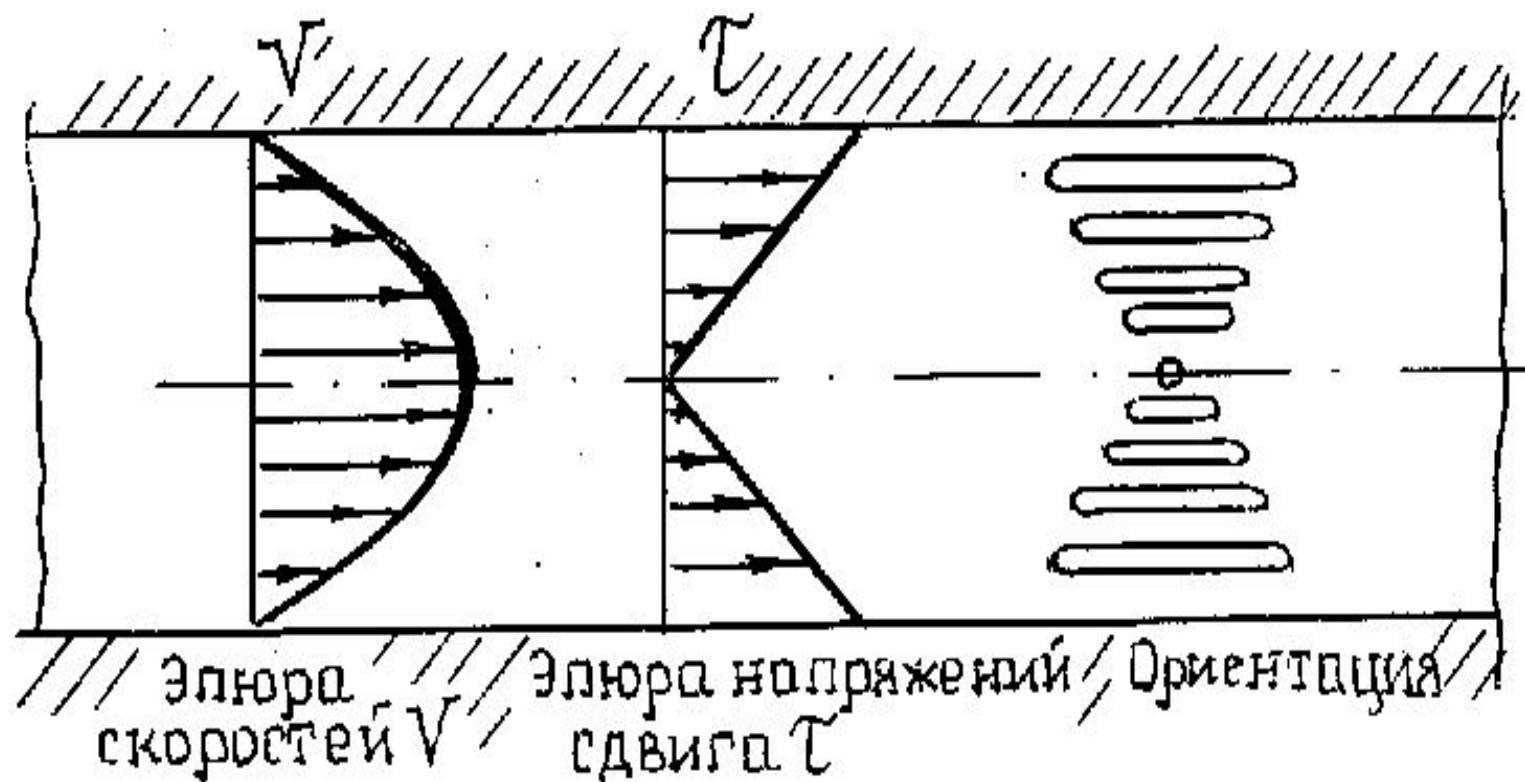


Схема заполнения формы при струйном режиме:

I — укладка струи в полости формы; II — уплотнение отрезков струи в полости формы



Течение материала в форме

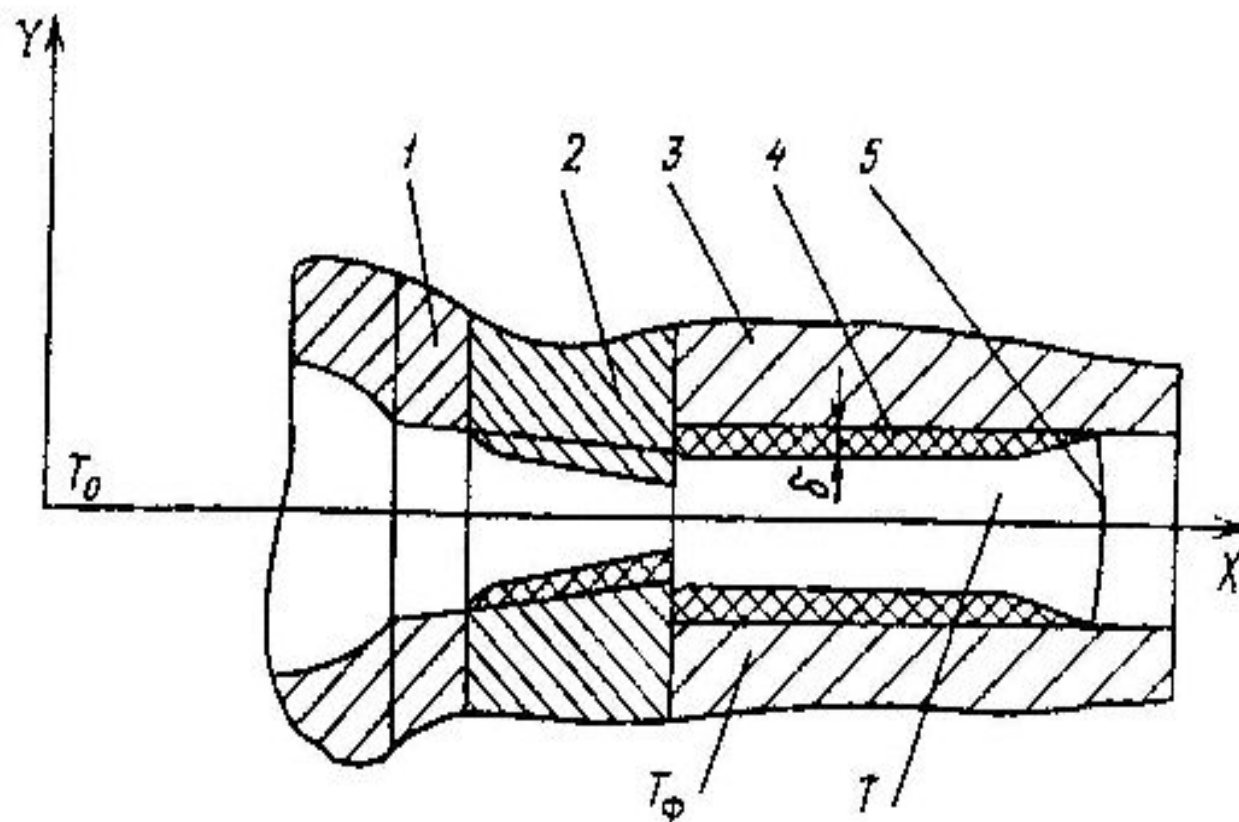
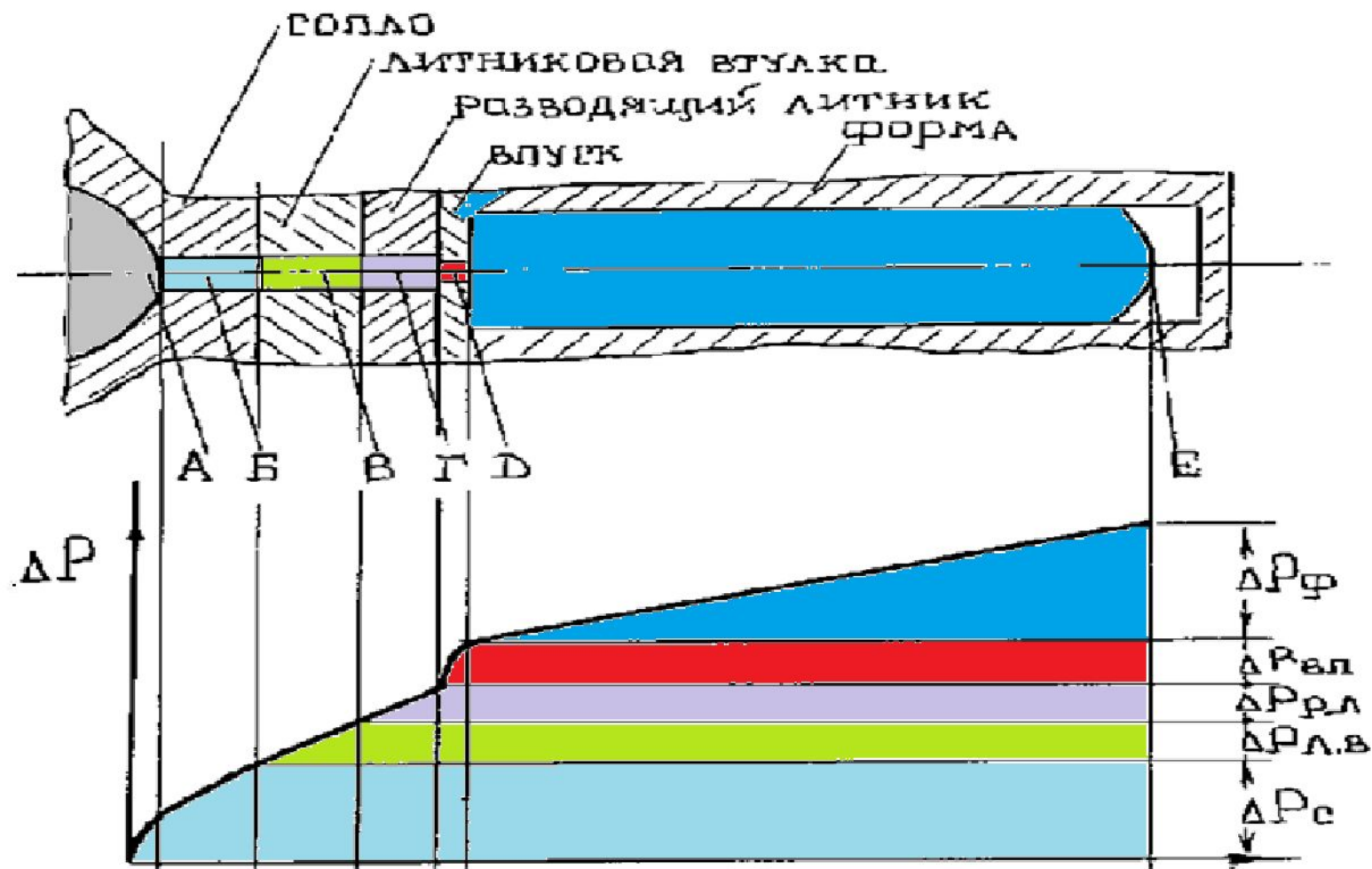


Схема формирования пристенного слоя при заполнении формы расплавом:

1 — сопло; 2 — литниковая втулка; 3 — форма; 4 - пристенный слой полимера; 5 — фронт течения расплава

Перепады давления (ΔP) по длине системы "сопло - форма" в зависимости от длины затекания материала



$$P_{\text{л}} \geq (\sum \Delta P_{\text{л.с.}} + \Delta P_{\text{ф}}) + P_{\text{ф}}$$

$P_{\text{ф}}$ давление в форме на стадии выдержки, определяет плотность полимера в изделии, бар или МПа

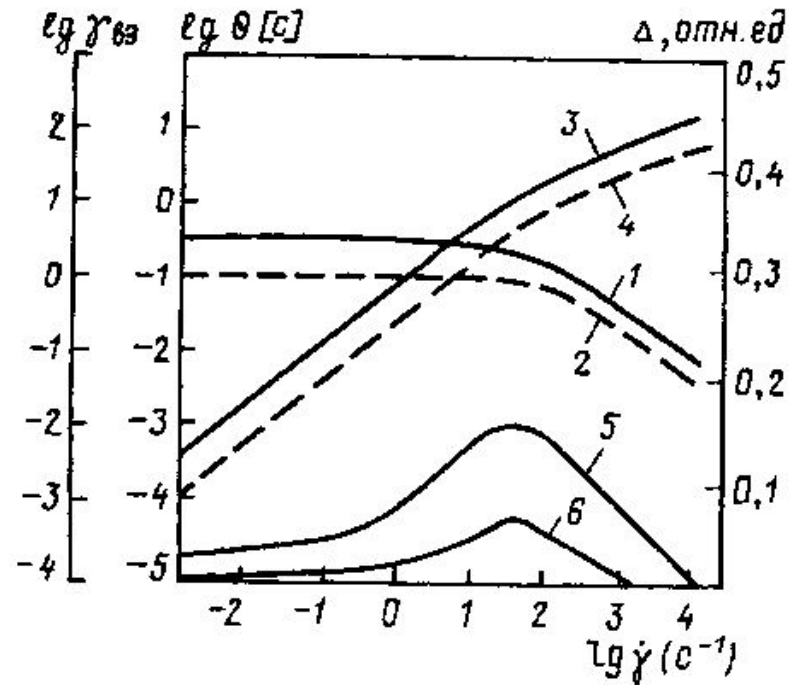
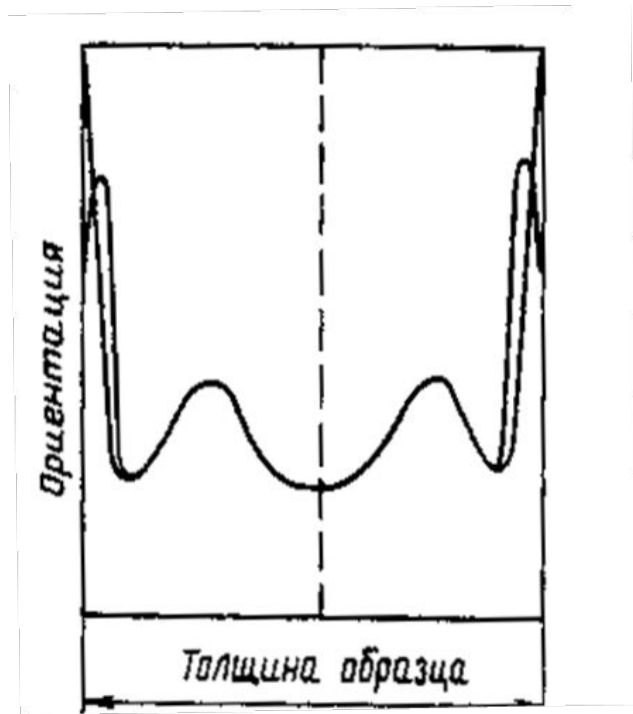
Давление литья $P_{\text{л}} = f$ (вязкостных свойств полимера, конфигурации и размеров изделия)



Развитие высокоэластической деформации $\gamma_{эл}$ и ориентации Δ



Ориентация в аморфных полимерах



Зависимость характерных времен релаксации θ (1,2), высокоэластической деформации γ (3,4) и тепловой усадки Δ (5,6) образцов ПК от скорости сдвига при 250 (—) и 280°C (- - -)

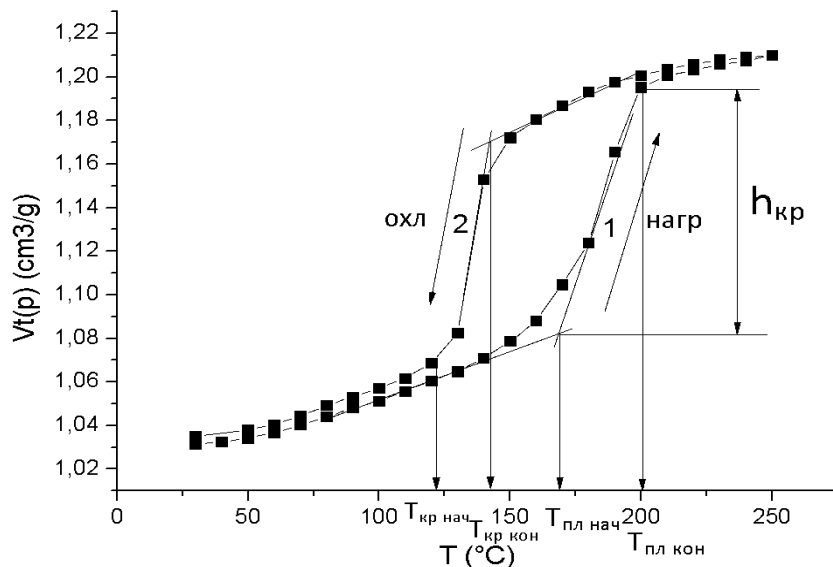
СТАДИЯ ВЫДЕРЖКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Технологические параметры стадии выдержки под давлением

Время выдержки под давлением ($t_{\text{впд}}$), с

Давление выдержки (P_{ϕ}), бар или МПа

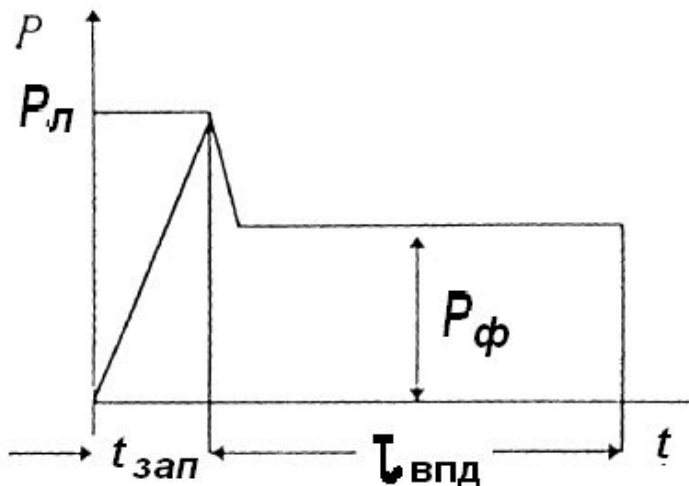
На стадии выдержки – подпитка формирующей полости расплавом для компенсации уменьшения объема в результате охлаждения и обеспечения заданной плотности изделия



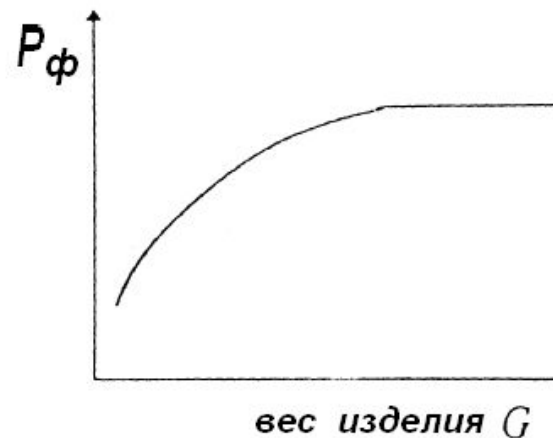
$$(P + \pi)(V - \omega) = RT / M$$

$$P_{\phi} = [RT_p / M (V - \omega)] - \pi$$

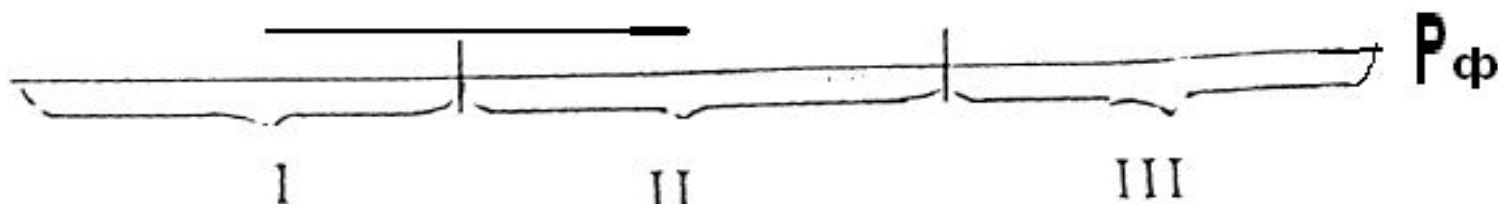
Давление формования (давление выдержки)



Режим формования со сбросом давления



Влияние давления $P_{ф}$ на вес G



I
пустоты
утяжины
корбление

II
Рабочий
диапазон

III
Качество изделий
не улучшается с ростом $P_{ф}$
Излишний вес Большие
внутренние напряжения

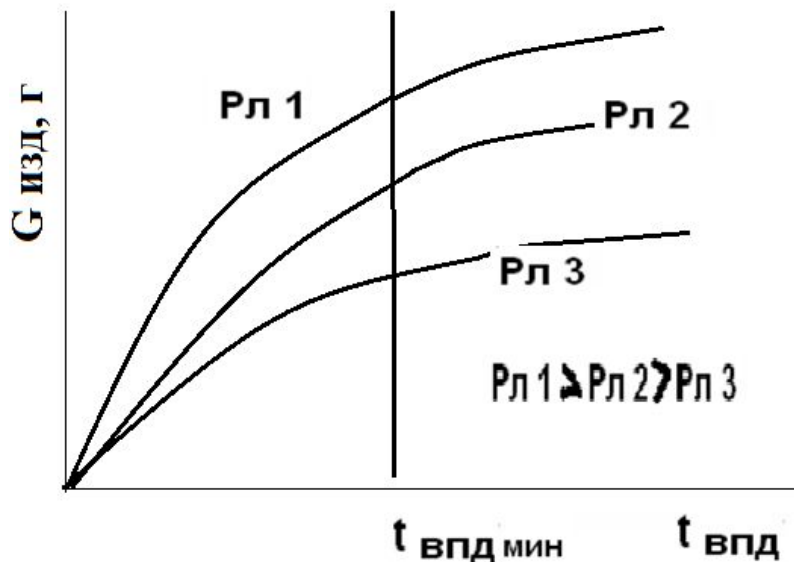
Время выдержки под давлением $t_{впд}$

Для аморфных полимеров

$$t_{впд} = (Ar^2 / \alpha) \{B - \ln [(T_p - T_f) / (T_{тек} - T_f)]\}$$

Для кристаллизующихся полимеров

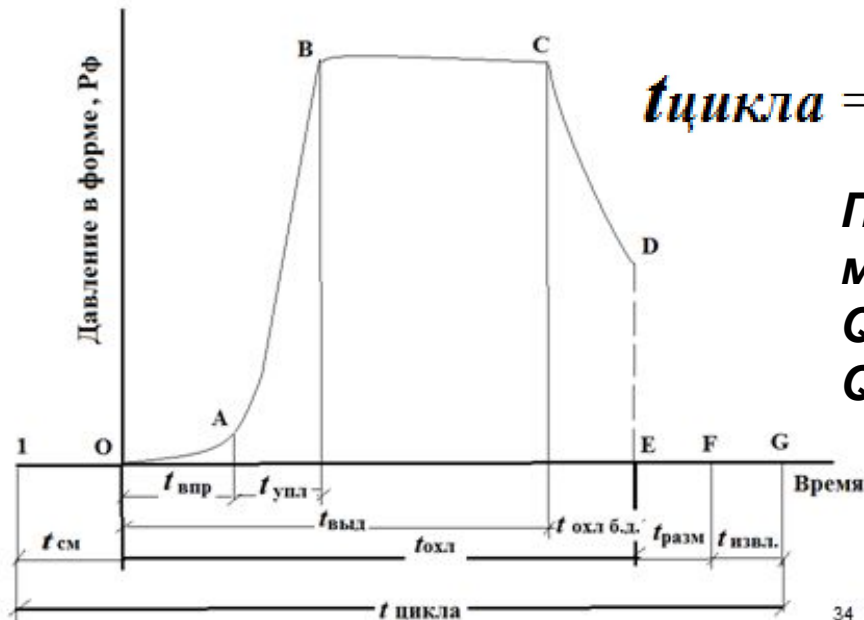
$$t_{впд} = (Ar^2 / \alpha) \{B - \ln [(T_p - T_f) / (T_{кр} - T_f)]\}$$



ОХЛАЖДЕНИЕ РАСПЛАВА В ФОРМЕ

- Технологические параметры стадии охлаждения
- Температура формы (T_{ϕ}), °C
- Время охлаждения (до 80 % от всего цикла):
- $t_{\text{охл}} = A \delta^2/a [B - \ln ((T_{\text{и}} - T_{\phi}) / (T_{\text{р}} - T_{\phi}))]$
- $t_{\text{охл}} = t_{\text{охл. под давл.}} + t_{\text{охл б. д.}} = t_{\text{выд.}} + t_{\text{охл б. д.}}$

ДИАГРАММА «ДАВЛЕНИЕ В ФОРМЕ – ВРЕМЯ»



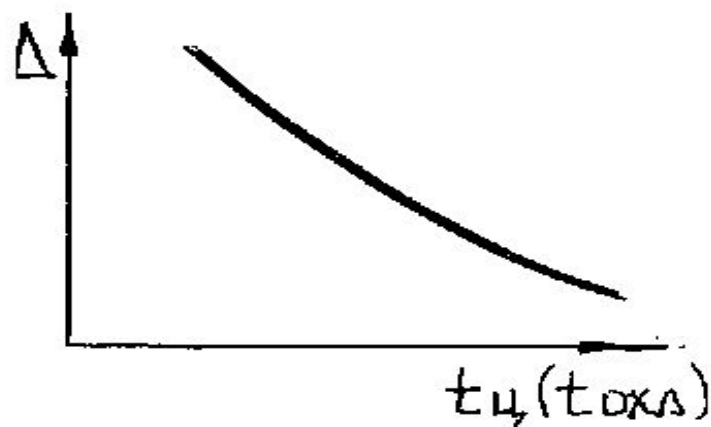
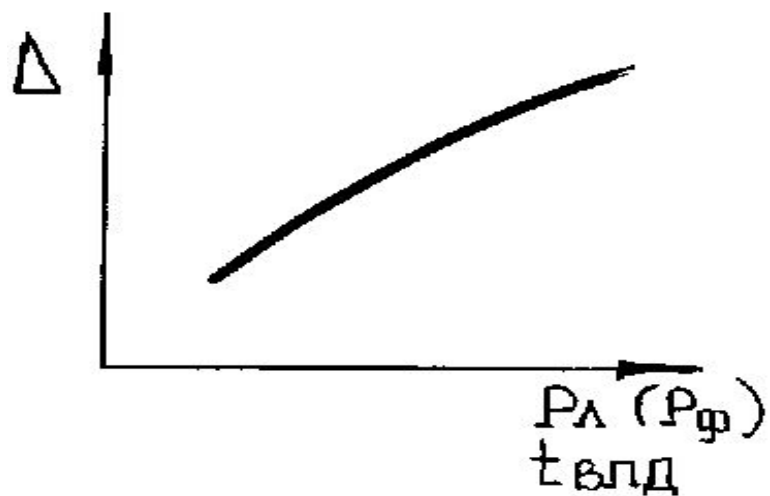
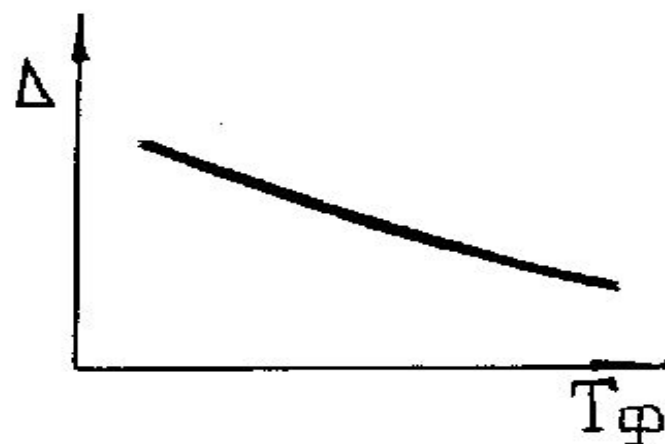
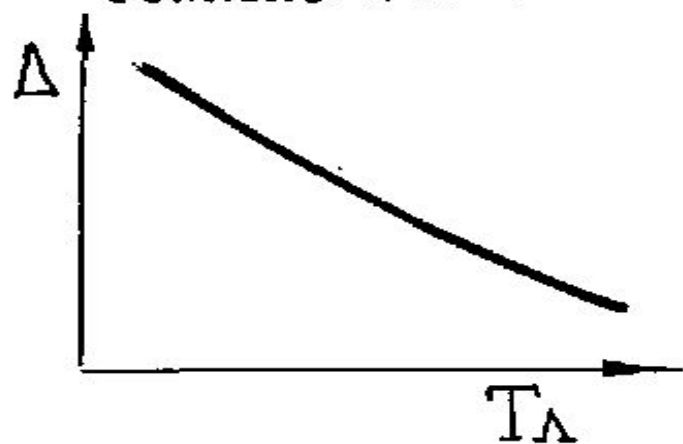
$$t_{\text{цикла}} = t_{\text{впр}} + t_{\text{охл}} + t_{\text{маш}} + t_{\text{паузы}}$$

Производительность литейной машины:

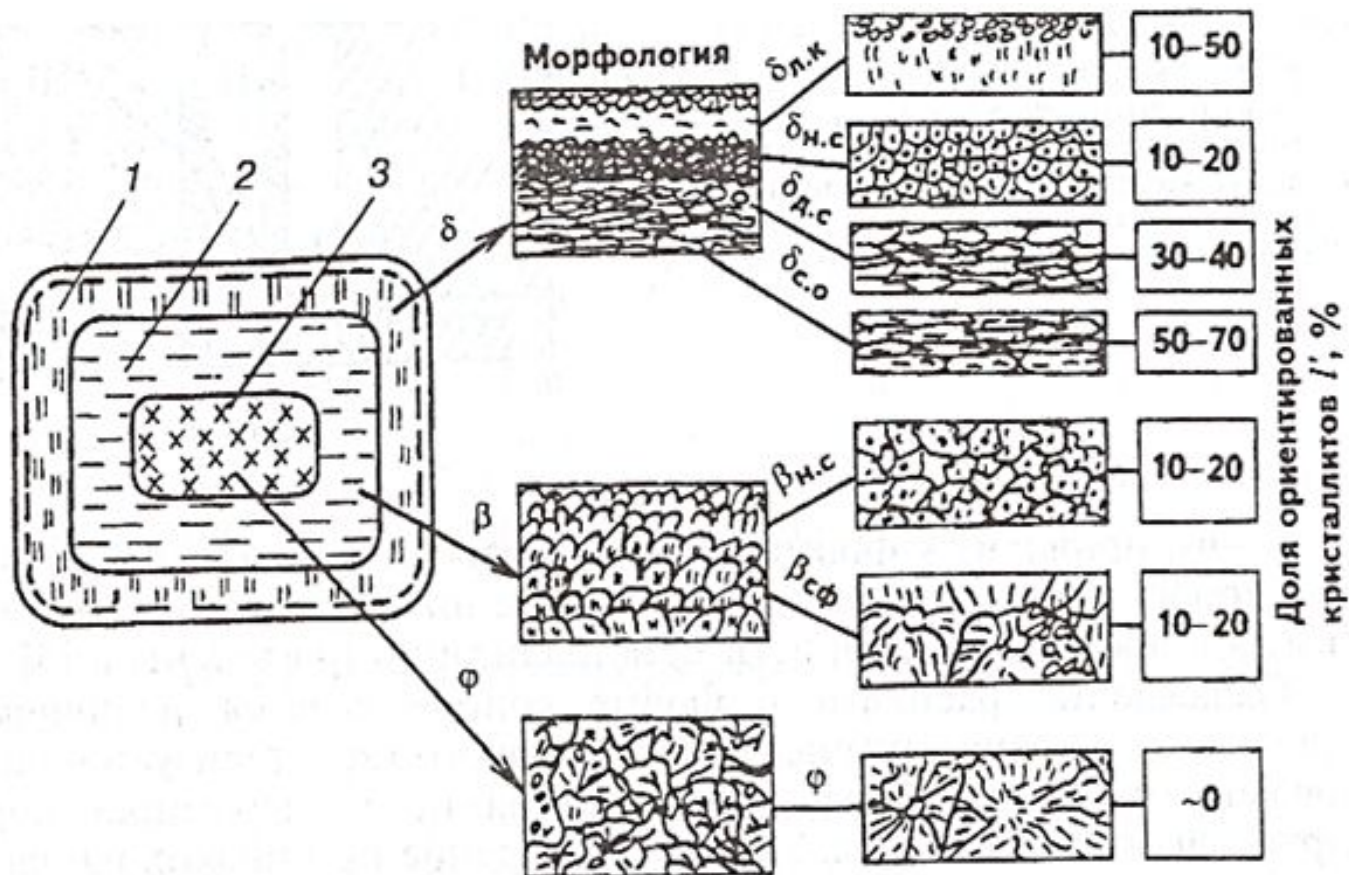
$$Q = 3600/t_{\text{цикла}} \text{ [шт / час]}$$

$$Q = 3600 * m_{\text{изд}} / t_{\text{цикла}} \text{ [кг/час]}$$

Влияние на остаточную ориентацию Δ
технологических параметров



Структура отливок из кристаллических полимеров



Структурные слои в поперечном сечении литьевых изделий:
 1 — поверхностная оболочка (заполнение); 2 — средний слой (выдержка под давлением); 3 — центр (охлаждение без давления).