

ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ РЕАКТОПЛАСТОВ

Литье под давлением реактопластов – более прогрессивный метод по сравнению с компрессионным и литьевым прессованием, но **требует наличия материалов с меньшей вязкостью и более длительным временем вязкотекучего состояния.**

Специфика переработки реактопластов - не только процессы массопереноса и теплообмена, но и **химические взаимодействия**, ведущие к образованию трехмерной сетчатой структуры.

Более **жесткие** требования к **выполнению технологических условий** литья, прежде всего, температурно-временных параметров процесса, а также **исключению возможности образования застойных зон** в материальном цилиндре литьевой машины

Оборудование: плунжерные и червячные литьевые машины

Режимы - инъекционный и интрузионный

ТРЕБОВАНИЯ К СЫРЬЮ:

Размер гранул: от 0,25 до 1,0 мм. **Меньше 0,16 мм** - попадание частиц материала в зазор между гребнем шнека и цилиндром. **Более 1 мм** – увеличение *анизотропии свойств* изделий.

Содержание влаги и летучих: от 2 до 4 %. **Меньше 2%** - ухудшается текучесть материала. **Более 4 %** - снижаются диэлектрические, физико-механические показатели, возрастает пористость изделий, усадка, коробление.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА литьевых реактопластов при скорости сдвига 15 с^{-1} (пластометр Канавца):

- время вязкопластичного состояния (при 120°C для всех типов сырья) ;
- время отверждения (при 170°C для фенопластов и 150°C для аминопластов);
- вязкость материала на стадии вязкопластичного состояния (при 120°C для всех типов сырья).

Три группы материалов по технологическим свойствам:

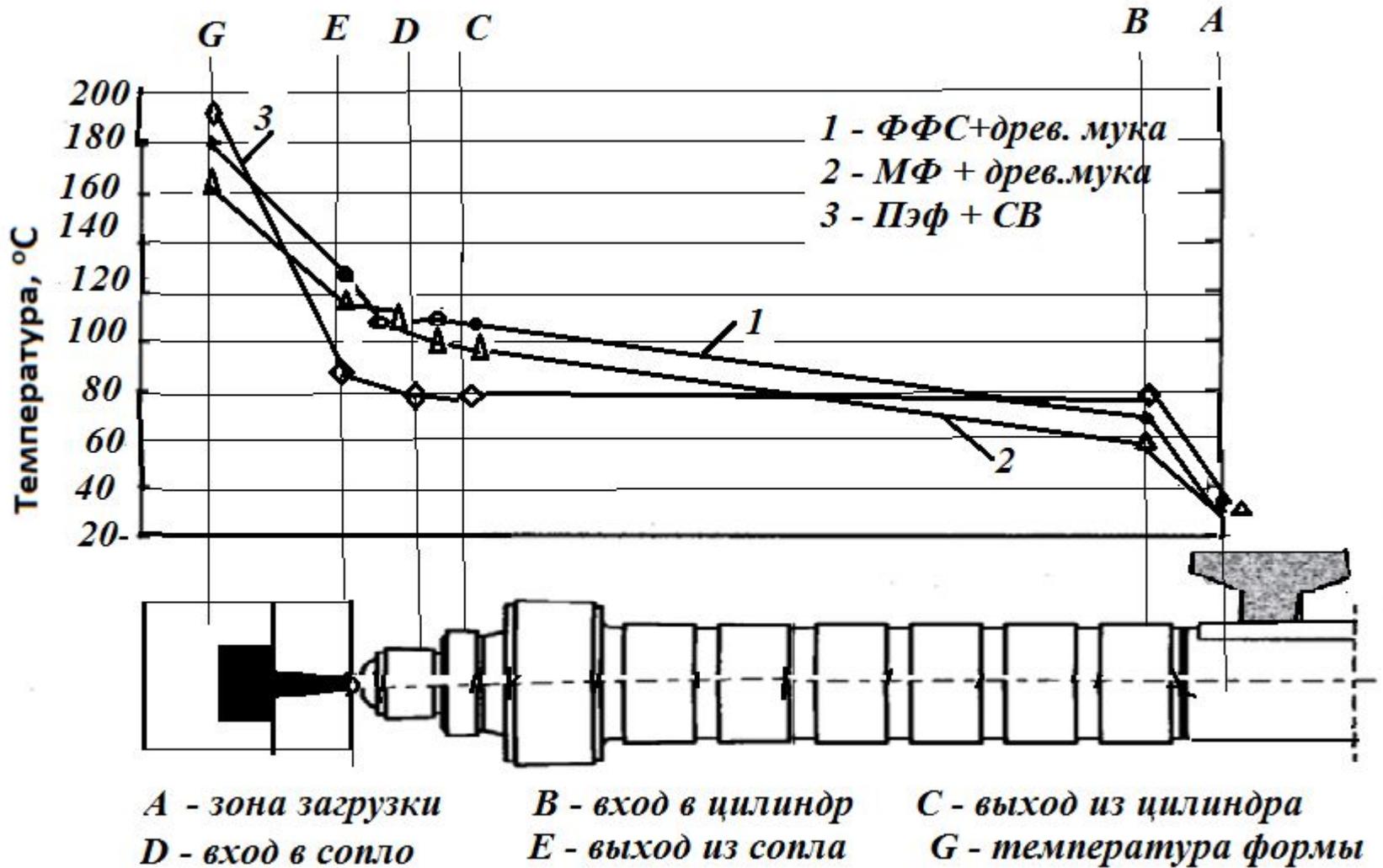
Группа	Вязкость в вязкопластичном состоянии, Па*с	Время вязкопластичного состояния, с
I	$(2 \div 6)10^4$	20 - 140
II	$2*10^3 \div 2*10^4$	40 - 140
III	$2*10^3 \div 10^4$	60 - 140

Материалы I группы - переработка **на плунжерных** литьевых машинах;

Материалы II группы переработка **на червячных** машинах с незапирающимся соплом и объемом пластикационного цилиндра до 250 см^3 ;

Материалы III группы реактопластавтоматы с объемом пластикации $> 250 \text{ см}^3$, снабженные запорными устройствами, предотвращающими утечку материала при впрыске.

ПРОФИЛЬ ТЕМПЕРАТУР ПО ЗОНАМ ЦИЛИНДРА И В ФОРМЕ



ФОРМОВАНИЕ

1. Загрузка пресс-порошка в пластикационный цилиндр из бункера с мешалкой, для предотвращения зависания.

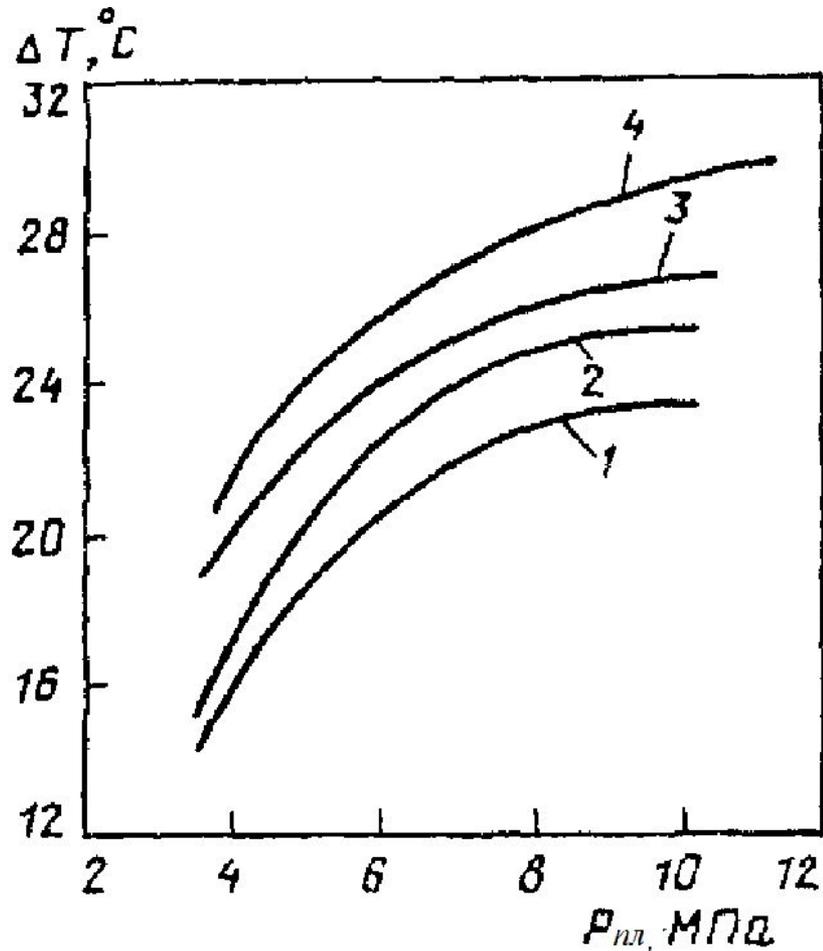
2. Перевод материала в вязкопластичное состояние в пластикационном цилиндре – *пластикация*. *Разогрев материала* происходит *за счет тепла от внешних нагревателей и разогрева массы при трении о вращающийся шнек*. *Вязкость материала снижается до $10^3 - 10^4$ Па*с*.

Время вязкопластичного состояния завершается резким нарастанием скорости химического взаимодействия, быстро нарастает вязкость материала и теряется текучесть, т. е. формуемость материала.

Транспортирование материала шнеком к соплу, прохождение через сопло и заполнение формующей полости должно происходить в течение времени вязкопластичного состояния перерабатываемого реактопласта.

При вращении шнека за счет трения в пластикационном цилиндре происходит дополнительный нагрев материала. Уплотнение материала под давлением пластикации (противодавлением) ведет к росту интенсивности разогрева.

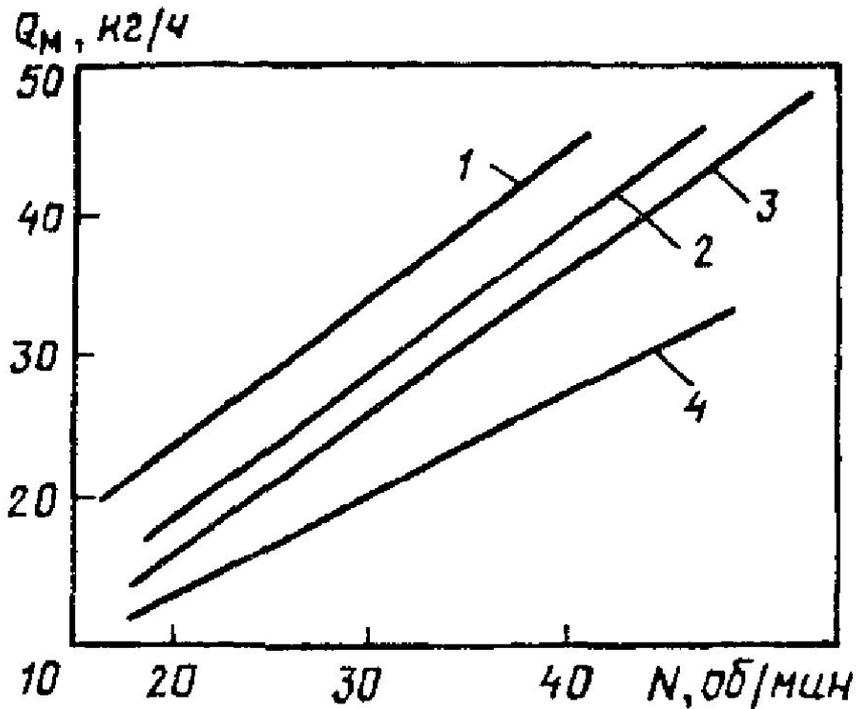
Зависимость прироста температуры реактопласта ΔT от давления пластикации $P_{пл}$.



Частота вращения шнека (об/мин):

1 - 15; 2 - 25; 3 - 35; 4 - 45

С ростом $P_{пл}$ и N увеличивается ΔT



Зависимость пластикационной производительности литьевой машины $Q_{пл}$ от частоты вращения шнека N (*при $T=const$*);

$P_{пл}$ (МПа): 1- 3,5; 2 - 5,4; 3 - 8,6; 4-12

*Рост N ведет к росту $Q_{пл}$
Рост $P_{пл}$ ведет к снижению $Q_{пл}$*

Технологические параметры (T , $P_{пл}$, $Q_{пл}$) на стадии **пластикации** выбирают таким образом, чтобы на выходе из цилиндра температура материала не превышала **80—100 °С** (чтобы не произошло раннего отверждения материала в сопле литьевой машины).

Чем выше T , тем меньше время вязкопластичного состояния и время отверждения.

Набор материала в пластикационный цилиндр :
доза материала должна **соответствовать** **объему впрыска**,
для исключения отверждения материала в цилиндре .
Ход шнека не более двух-трех $D_{\text{шн.}}$

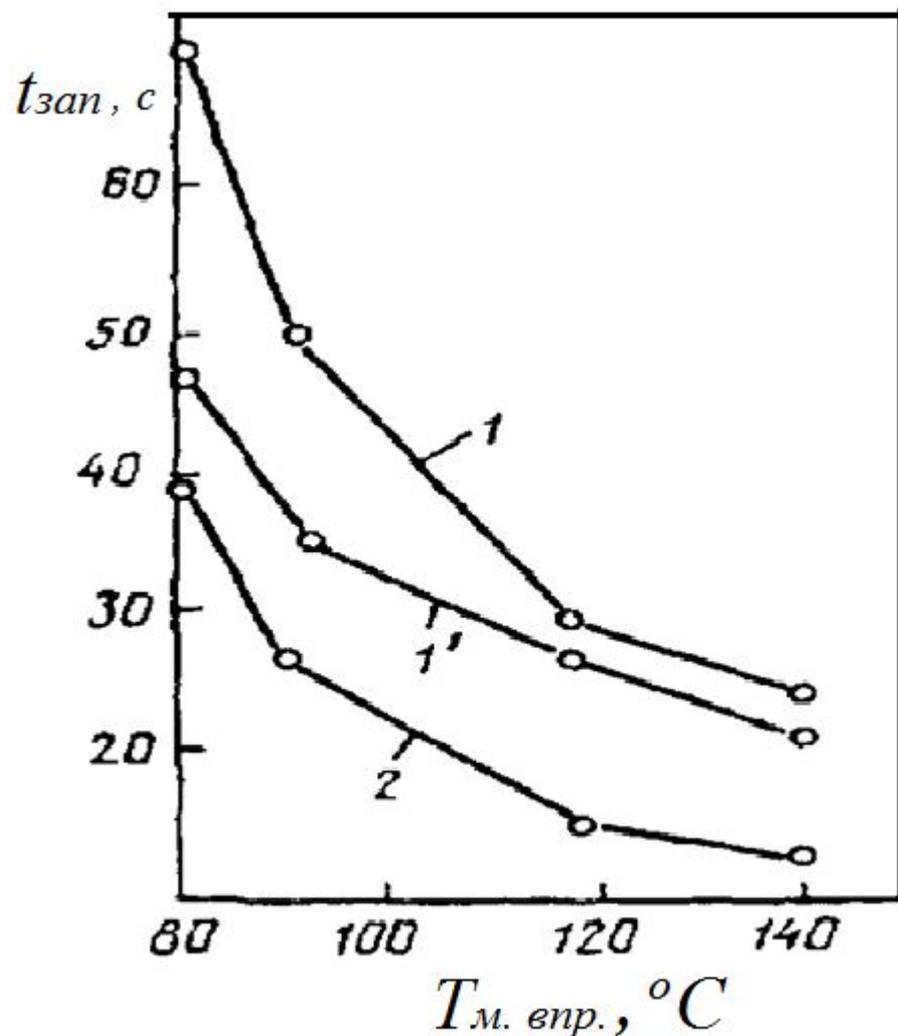
Впрыск подготовленной дозы в форму : **потери давления на входе в форму (ΔP «сопло-форма») \gg** , чем для термопластов из-за высокой вязкости реактопласта, поэтому материал разогревается при прохождении через сопло и его температура при поступлении в форму ($T_{\text{м впр}}$) выше, чем перед соплом на 15 - 20 °С.

Чем $> T_{\text{м впр}}$, тем $<$ изменение объема материала (ΔV) при нагреве $T_{\text{м}}$ до $T_{\text{ф}}$.

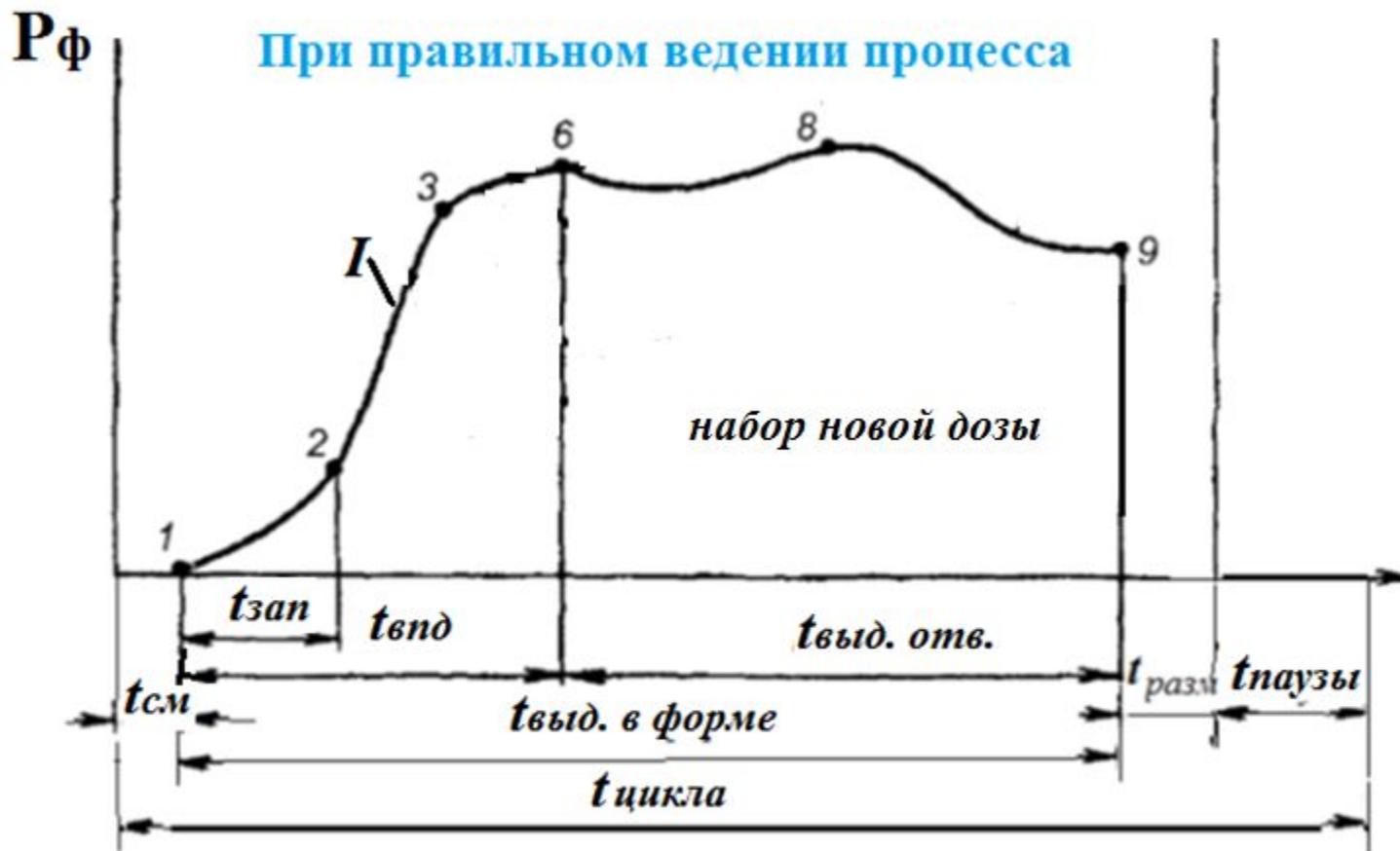
Время заполнения формы : $t_{\text{зан}} = f(V_{\text{впр средн.}})$
 $V_{\text{впр средн.}} = f(P_{\text{л}}, \eta, \text{сопротивление ходу шнека})$

Зависимость времени заполнения формы $t_{\text{зан}}$ от температуры расплава на входе в форму $T_{\text{м впр}}$, при температуре формы $T_{\text{ф}}$: 145 (1 и 2) и 165 °С (1'), и давлении литья $P_{\text{л}}$: 43 (1 и 1') и 56 МПа (2).

Чем выше $T_{\text{ф}}$, тем меньше $t_{\text{зан}}$.
Чем выше $P_{\text{л}}$, тем меньше $t_{\text{зан}}$.



ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ФОРМЕ В ТЕЧЕНИЕ ЦИКЛА ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ РЕАКТОПЛАСТА



1—3 : заполнение формы и уплотнение расплава

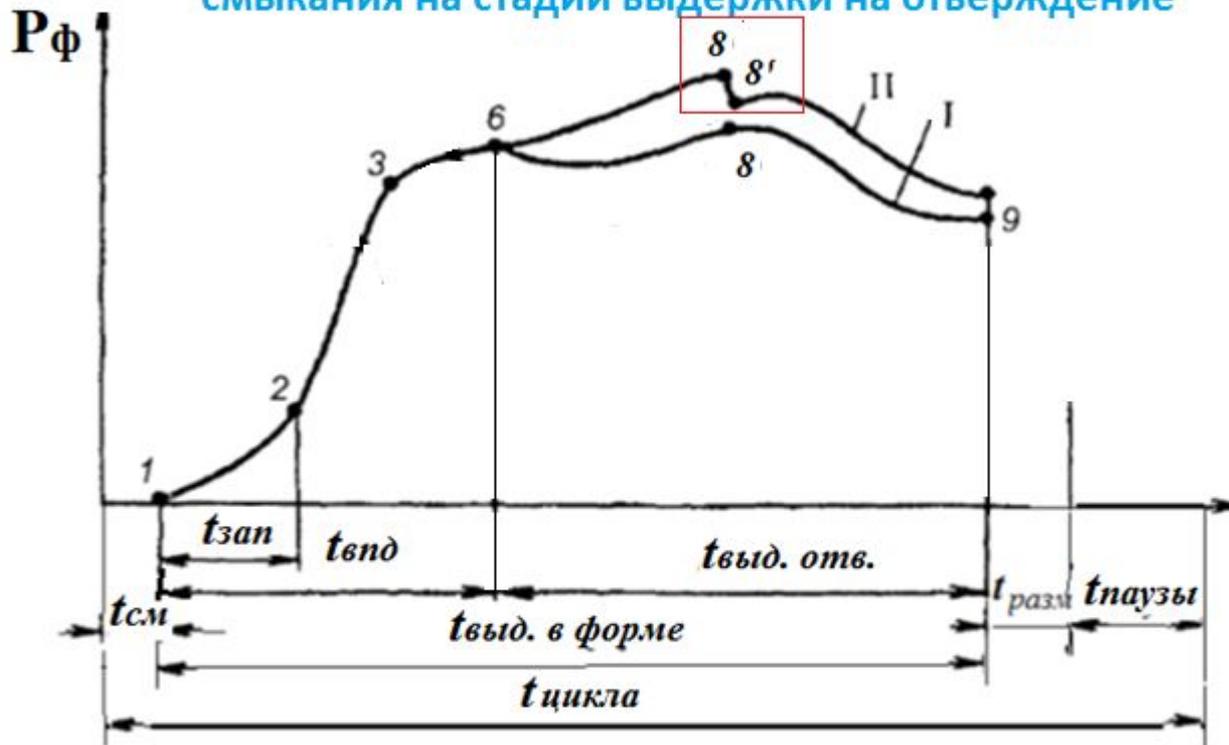
т. 6 : конец выдержки под давлением

6-8 : расширение из-за прогрева материала в форме

8-9 : усадка в рез. отверждения

ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ФОРМЕ В ТЕЧЕНИЕ ЦИКЛА ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ РЕАКТОПЛАСТА

II - ход кривой при недостаточном усилии смыкания на стадии выдержки на отверждение



1—3 : заполнение формы и уплотнение расплава

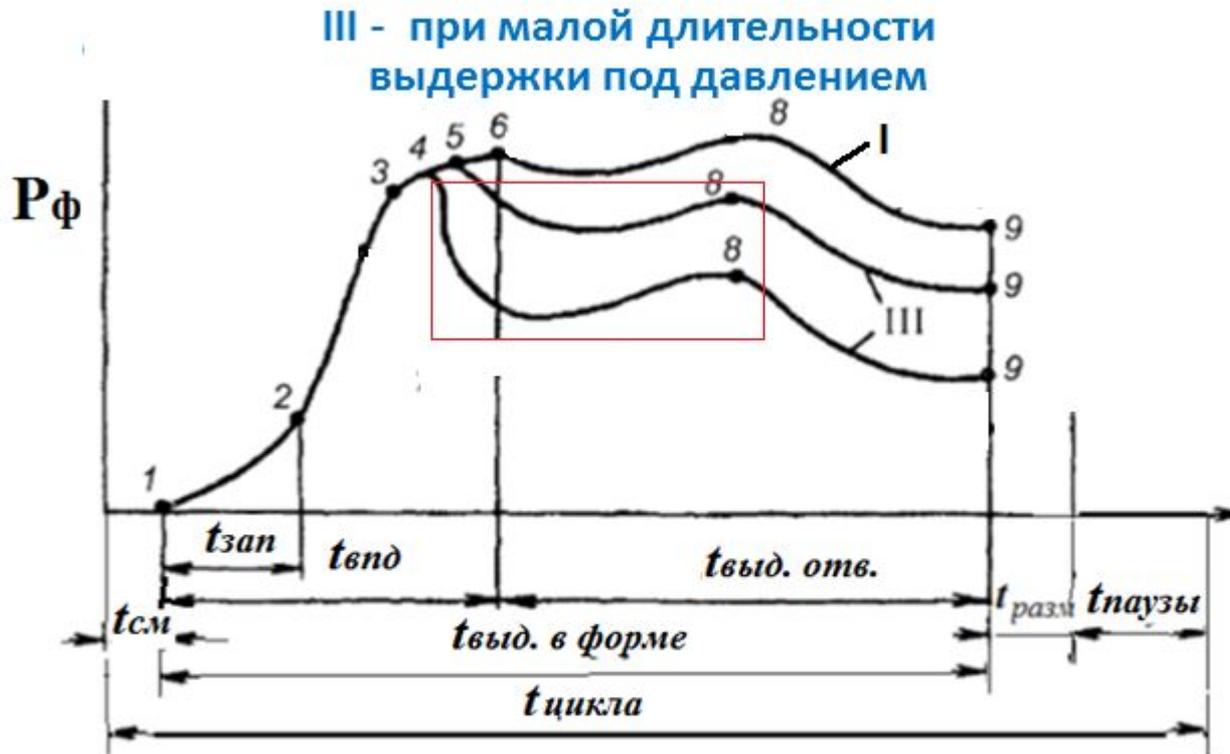
т. 6 : конец выдержки под давлением

6-8 : расширение из-за прогрева материала в форме

8- 8': $P_{\phi} > P_{см}$, раскр. формы

8'-9 : усадка в рез. отверждения

ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ФОРМЕ В ТЕЧЕНИЕ ЦИКЛА ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ РЕАКТОПЛАСТА



1-3 : заполнение формы и уплотнение расплава

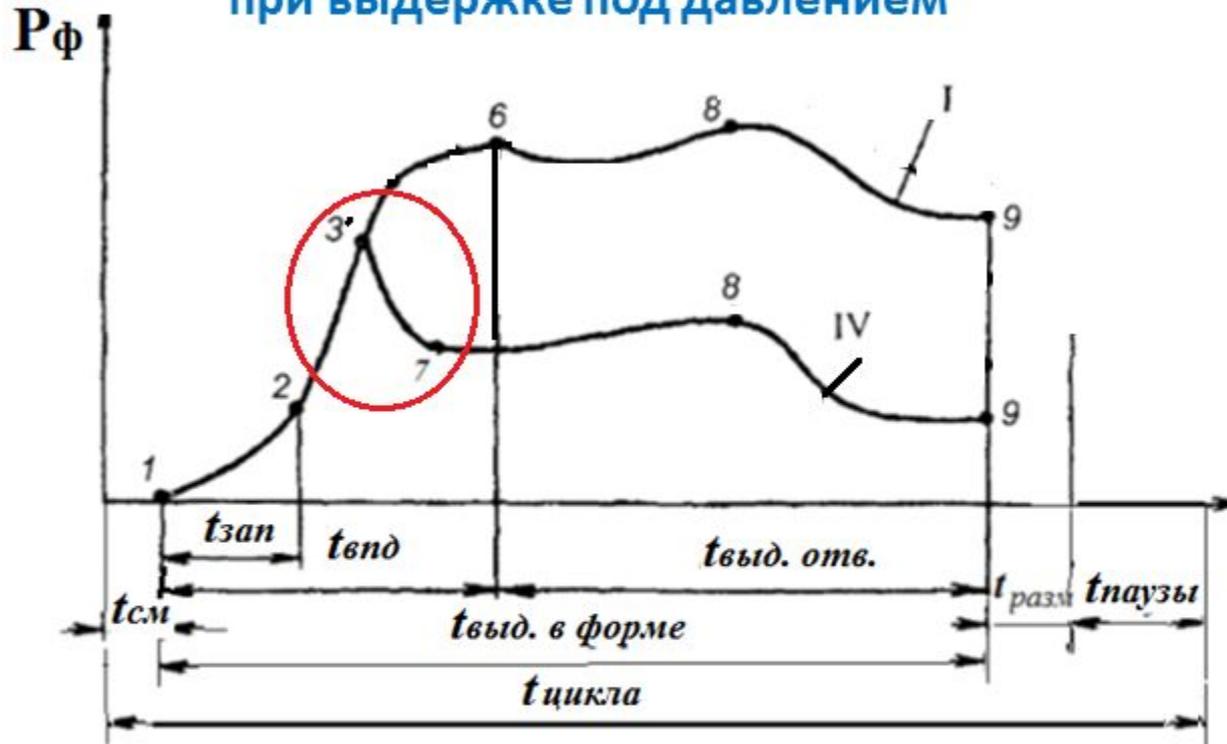
4, 5 - мало $t_{внд}$: истечение материала из полости формы

5-8 и 6-8 : расширение из-за прогрева материала в форме

8-9 : усадка в рез. отверждения

ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ФОРМЕ В ТЕЧЕНИЕ ЦИКЛА ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ РЕАКТОПЛАСТА

IV - при недостаточном усилии смыкания на стадии уплотнения расплава в форме при выдержке под давлением



1-3': заполнение формы и уплотнение расплава

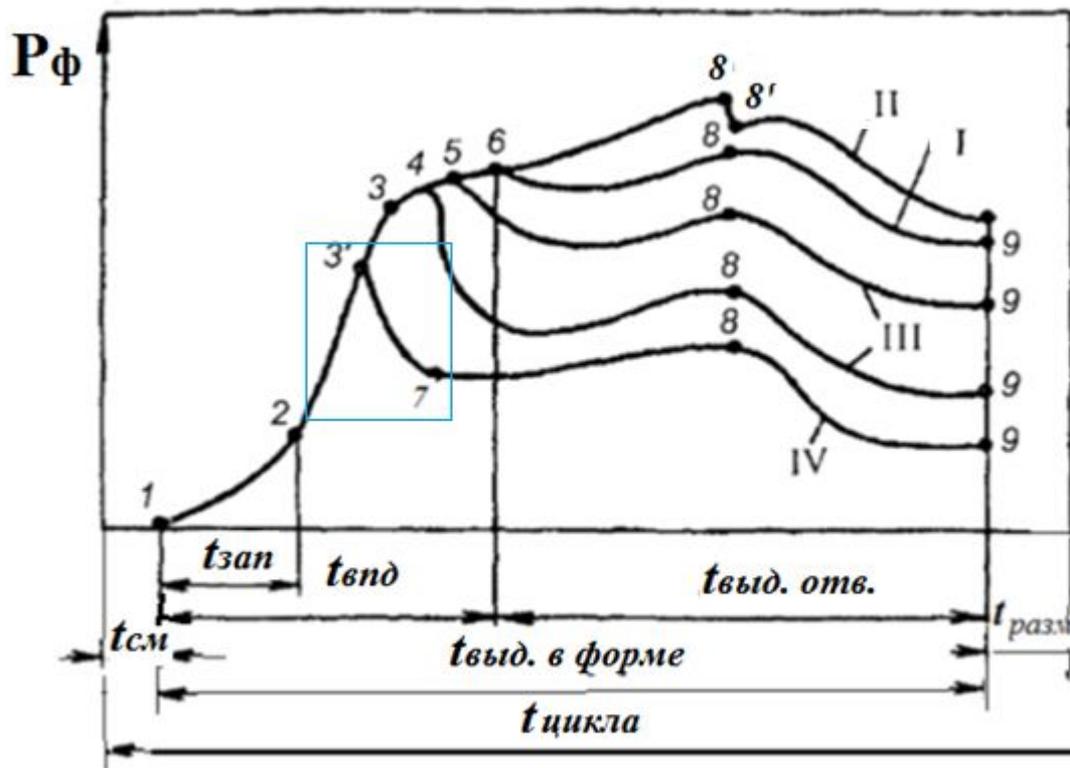
3'-7: частичное размыкание полуформ, облой ($F_{см} < F_φ$)

7-8: расширение из-за прогрева материала в форме

8-9: усадка в рез. отверждения

т. 9: $P_φ = P_к$

ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ФОРМЕ В ТЕЧЕНИЕ ЦИКЛА ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ РЕАКТОПЛАСТА



1—3 : заполнение формы и уплотнение расплава

3'-7: частичное размыкание полуформ , облой ($F_{см} < F_{ф}$)

4, 5 - мало $t_{внд}$: истечение материала из полости формы

п. 6, кривые I и II - конец выдержки под давлением

6-8 : расширение из-за прогрева материала в форме

8-9 : усадка в рез.

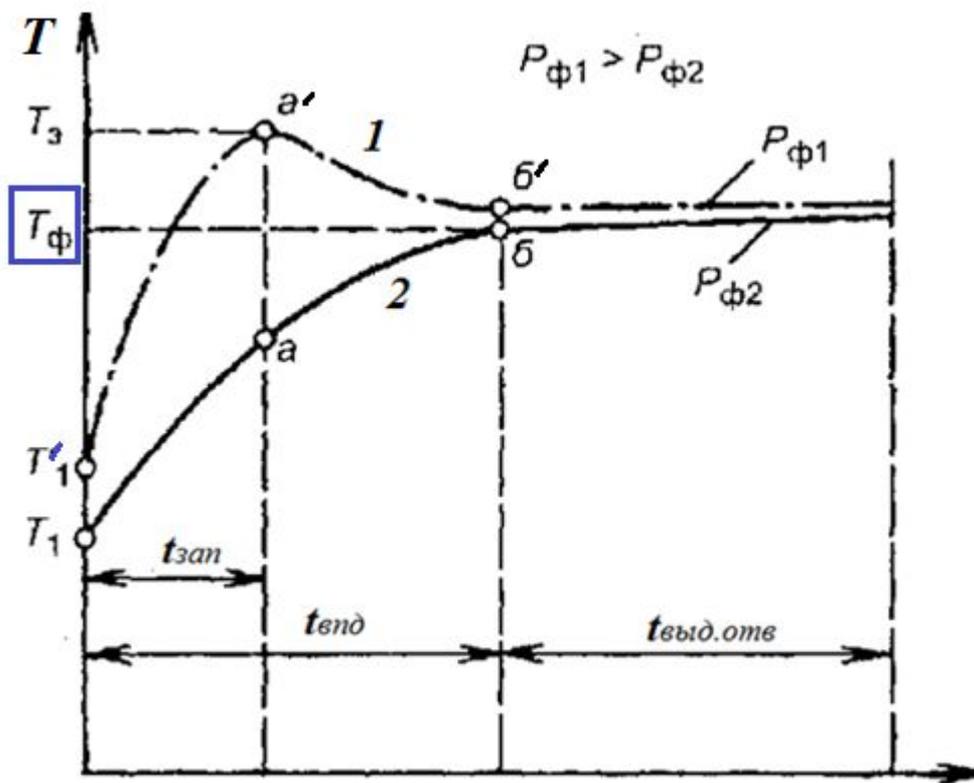
отверждения
8- 8' : $F_{ф} > F_{см}$, раскр.

формы $P_{ф} =$

II - ход кривой при недостаточном усилии смыкания на стадии выдержки на отверждение; II - при нормальном проведении процесса литья;

III - при малой длительности выдержки под давлением; IV - при недостаточном усилии смыкания на стадии уплотнения расплава

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕАКТОПЛАСТА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В ФОРМЕ, В ТЕЧЕНИЕ ЦИКЛА



Нагрев материала за счет:
1) теплопроводности от стенок горячей формы,
2) диссипативных потерь в результате вязкого течения и
3) теплового эффекта реакции отверждения.

1 – литье при повышенных $P_{л}$ и $T_{р}$
2 - литье при низких $P_{л}$ и $T_{р}$

Выдержка под давлением

После заполнения формующей полости расплавом ($t_{\text{зап}}$) начинается выдержка под давлением ($t_{\text{впд}}$).

Материал нагнетается в форму и $P_{\text{ф}}$ растет.

$$t_{\text{впд}} = f(t_{\text{отв материала в литнике}})$$

При большой $\delta_{\text{изд}}$ и ($\delta_{\text{изд}} > \delta_{\text{литн}}$): $t_{\text{отв литника}} < t_{\text{отв изделия}}$,
а $t_{\text{впд}} = f$ (времени вязкопластичного состояния материала *в литнике*).
После отверждения материала в литнике подпитка прекращается.

При малой $\delta_{\text{изд}}$ и ($\delta_{\text{изд}} < \delta_{\text{литн}}$): $t_{\text{отв литника}} > t_{\text{отв изделия}}$, а $t_{\text{впд}} = f$
(времени вязко-пластичного состояния материала *в формующей полости*)

После отверждения материала в литниковой системе и прекращения подпитки сопло отводится от формы

Выдержка на отверждение в форме ($t_{\text{выд. отв}}$)

Масса изделия постоянна.

На этой стадии обеспечивается необходимая и одинаковая по всему объему изделия степень отверждения.

($t_{\text{выд. отв}}$) завершается при достижении материалом определенной степени отверждения.

Изделия общетехнического назначения отверждаются:

из фенопластов до $\sigma_{\text{сдв}} = 6$ МПа, из аминопластов до $\sigma_{\text{сдв}} = 4$ МПа.

Изделия электротехнического назначения требуют **меньшей** $t_{\text{выд. отв}}$.

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ РЕАКТОПЛАСТОВ

Температура материала на выходе из шнека T :

$$T_1 = T_{\text{ц}} + aN + bP,$$

где $T_{\text{ц}}$ - температура цилиндра, °С; N - частота вращения шнека, об/мин;
 $P_{\text{пл}}$ - давление пластикации, МПа; a, b – константы материала

Давление в гидроцилиндре литьевой машины на стадии впрыска

($P_{\text{впр}}$):

$$P_{\text{впр}} = \Sigma \Delta P_{\text{с}} + \Sigma \Delta P_{\text{л}} + P_{\text{ф}} \quad (P_{\text{ф}} \sim 50 \text{ МПа}):$$

Температура материала после заполнения формы T_3 :

$$T_3 = T_1 + \frac{\Sigma \Delta P_{\text{с}} + \Sigma \Delta P_{\text{л}}}{c_p \rho},$$

где T_1 — температура материала в зоне дозирования цилиндра, К;
 $\Delta P_{\text{с}}$ и $\Delta P_{\text{л}}$ - потери давления в каналах сопла и в литниках, МПа;
 c_p и ρ — удельная теплоемкость и плотность материала при T_1

Длительность выдержки под давлением ($t_{впд}$):

$$t_{впд} = K_{в} (t_{отв. пл} - t_{нагр. пл}) e^{\beta(T_{пл} - T_{з})},$$

где $t_{отв. пл}$ – по пластометру Канавца, с; $t_{пл}$ – время нагревания материала в пластометре Канавца до температуры отверждения $T_{отв}$, с; (принимают 19 с)

β – температурный коэффициент для перерабатываемого материала, учитывающий влияние температуры на длительность отверждения;

$T_{пл}$ – температура измерительной камеры пластометра, °С;

$K_{в} = 0,5 - 0,6$ – коэффициент, учитывающий степени отверждения материала в литнике.

Длительность выдержки на отверждение ($t_{выд. отв.}$):

Если $T_{м} \approx T_{ф}$:

$$t_{выд. отв} = K_{в} (t_{отв. пл} - t_{нагр. пл}) e^{\beta(T_{пл} - T_{ф})} - t_{впд},$$

Если $T_m < T_f$:

$$t_{\text{выд отв}} = \frac{1}{K_2} \frac{\delta^2}{4a} \ln \left(K_1 \frac{T_f - T_0}{T_f - T_u} \right) + \\ + (t_{\text{отв. пл}} - t_{\text{нагр. пл}}) e^{\beta(T_{\text{пл}} - T_f)}$$

где K_1 и K_2 - учет формы изделия; δ - толщина стенки формуемого изделия, м;
 a -- коэффициент температуропроводности материала при $T = (T_0 + T_f)/2$, м²/с;
 T_f , T_0 , $T_{\text{пл}}$, T_u – температуры формы, материала на входе в форму, камеры
пластометра при стандартных испытаниях и в центре изделия к моменту начала
отверждения соответственно, °С;

Рекомендуется $T_u = T_f - 20$.

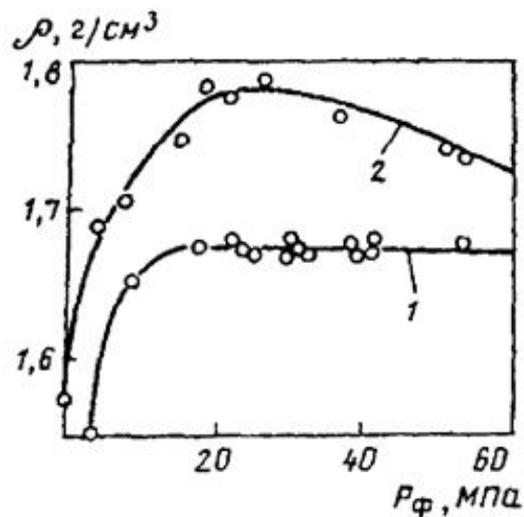
Время цикла литья под давлением:

$$t_{\text{цикла}} = t_{\text{выд}} + t_{\text{маш}} + t_{\text{паузы}}$$

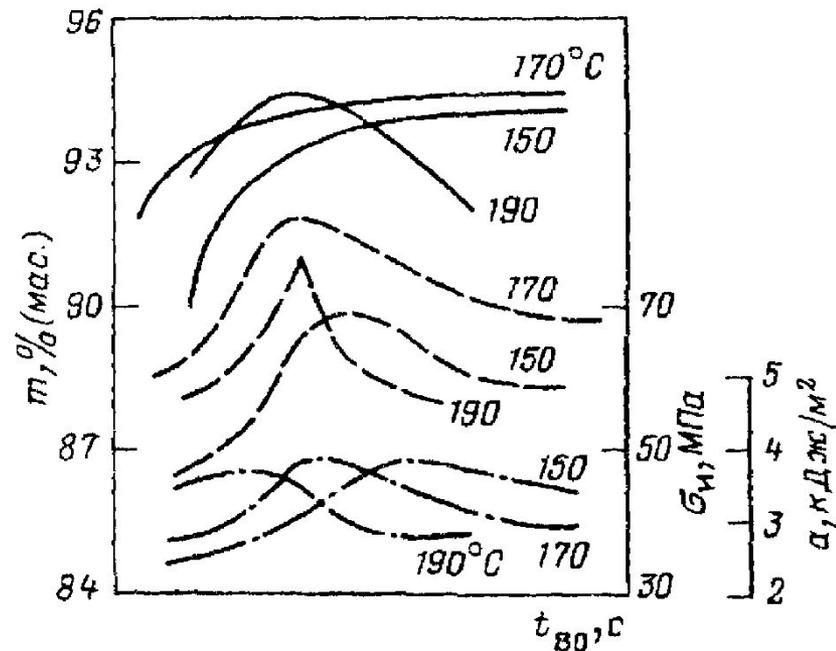
Усилие смыкания формы $F_{\text{см}}$: $F_{\text{см}} = P_{\text{ф}}(S_{\text{изд}}^n + S_{\text{л}})$,

где $P_{\text{ф}}$ — давление в форме, МПа; n — число гнезд в форме;

$S_{\text{изд}}$ и $S_{\text{л}}$ — площади проекции изделия и литников, м^2 .



Зависимость плотности материала в изделии ρ от давления в форме $P_{\text{ф}}$:
1 — для ФКПМ-15Т; 2 — для АГ-4В



Зависимость содержания нерастворимых продуктов m (—), разрушающего напряжения при изгибе $\sigma_{\text{н}}$ (— — —), ударной вязкости a (— · —) для материала 03-010-02 от продолжительности отверждения

*Условия переработки реактопластов литьем под давлением
на червячных машинах*

Реактопласт	Температура, °С				Давление впрыска, МПа	Темпера- тура фор- мы, °С
	цилиндра		сопла	расплава на выходе из сопла		
	на входе	на выходе				
Фенолоформальде- гидное связующее с наполнителем:						
древесная мука	60—70	85—100	85—100	110—120	60—120	160—180
асбест	60—70	95	105	110—115	120—150	170—185
каучук	60—70	95	105	120	60—120	160—180
Мочевиноформаль- дегидное связую- щее, наполнитель — древесная мука	55—65	85—100	100—110	115—120	70—130	150—165
Меламиноформаль- дегидное связующее с наполнителем:						
древесная мука	55—65	90—100	100—110	115—120	70—120	150—165
асбест	50—60	80—90	90—100	100—115	100—160	160—170
Полиэфирное свя- зующее, наполнен- ное стекловолокном или асбестом	60—80	60—80	60—80	70—90	90—120	170—190

* Давление пластикации не превышает 30 МПа, частота вращения шнека 50 об/мин, длительность пребывания материала в инжекционном цилиндре 4—20 с, продолжительность впрыска 2—7 с.