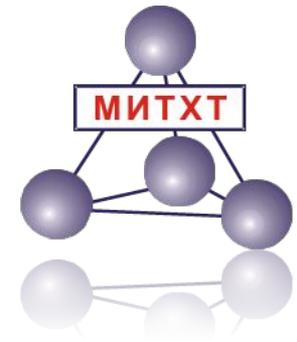


*Московский технологический университет
Институт тонких химических технологий*

**КАФЕДРА
ХИМИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ
ПЛАСТМАСС И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ
(ХТПП и ПК)**





МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРОВ

МОСКВА 2017

1. Технологические процессы и технологические схемы процессов переработки

- основные общие стадии технологических процессов и их содержание применительно к процессам переработки полимеров (прием сырья, входной контроль сырья, подготовка сырья, дозирование сырья, формование изделий, промежуточный контроль свойств изделий, обработка отформованных изделий, выходной контроль изделий, упаковка, складирование, переработка технологических отходов)

2. Технологические параметры основных процессов переработки полимерных материалов

- Прессование (схемы основного оборудования и параметры)
- Экструзия термопластов (схемы основного оборудования и параметры)
- Литье под давлением термопластов (схемы основного оборудования и параметры)
- Литье под давлением реактопластов (схемы основного оборудования и параметры)

Подготовка сырья – сушка, сушилки для полимерных материалов (назначение, эффективность)

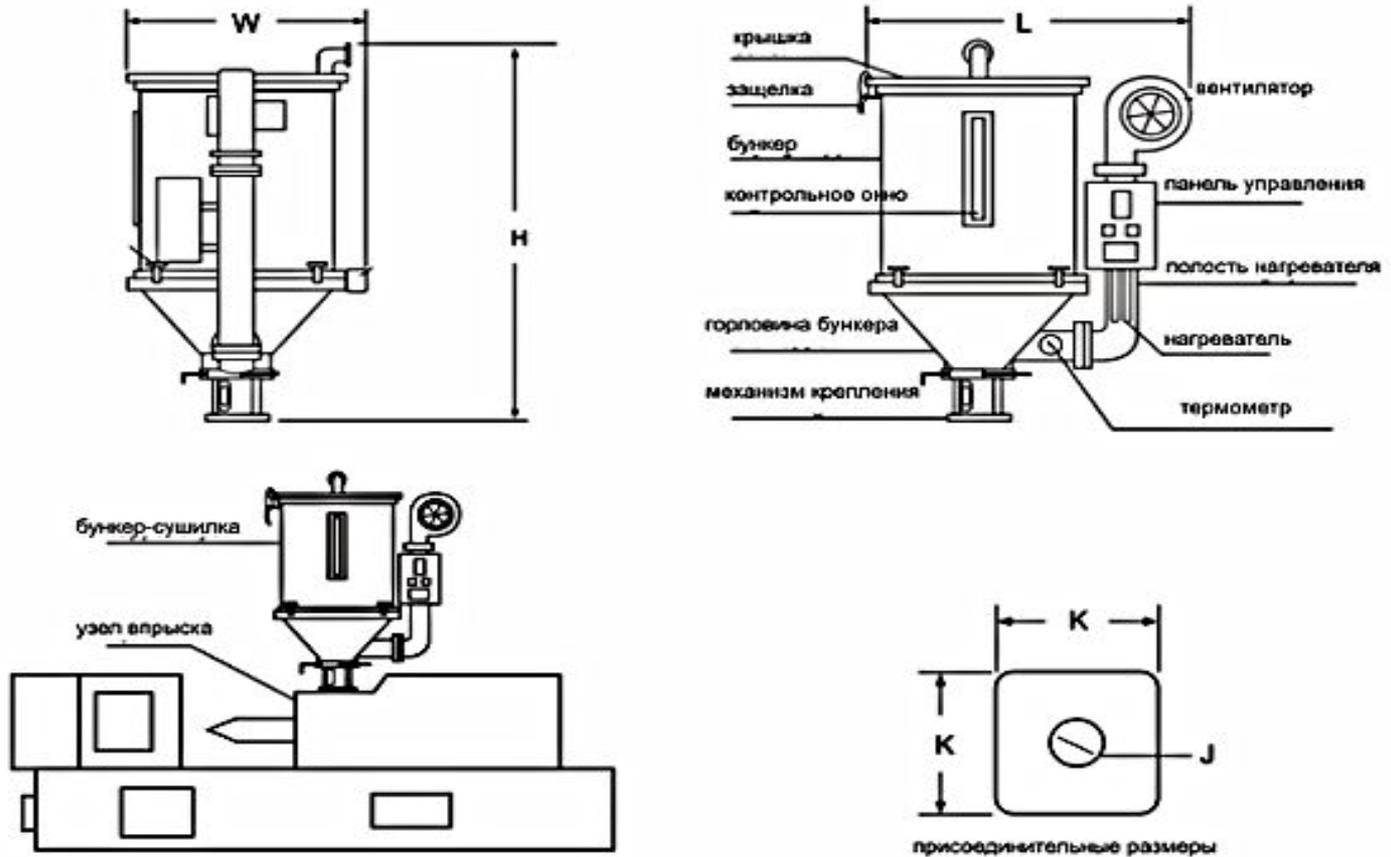


Схема бункерной сушилки для полимеров

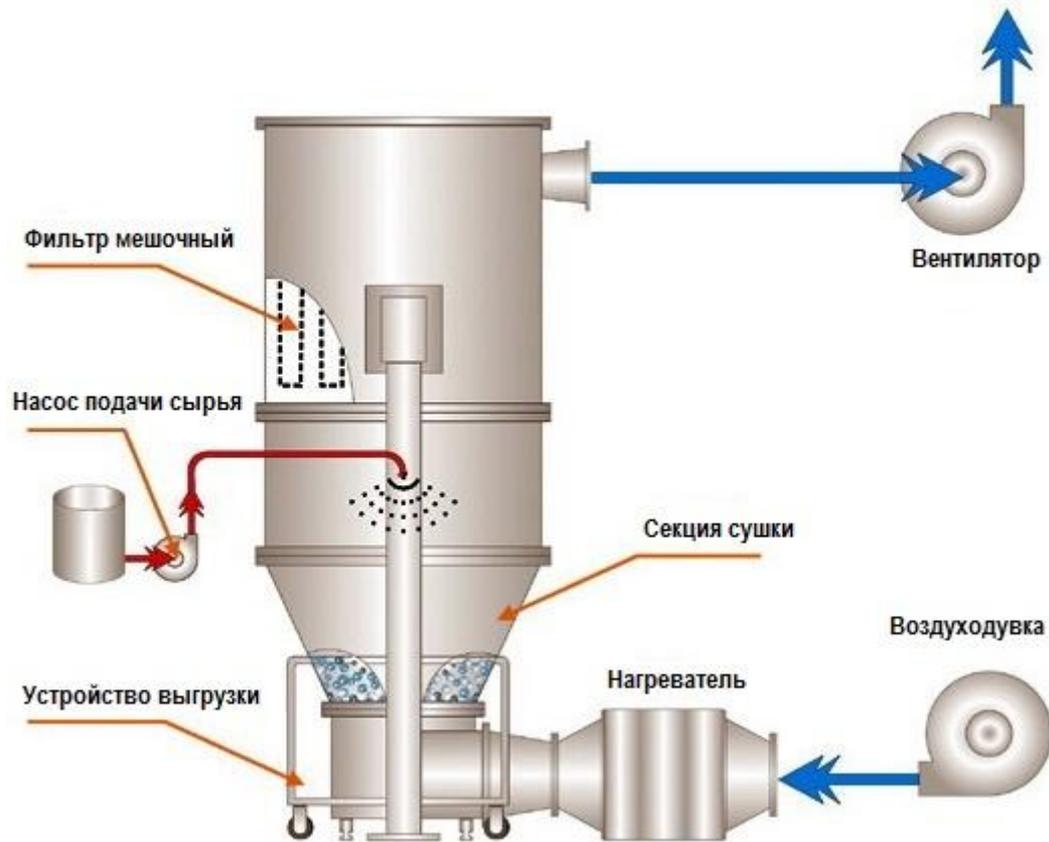


Схема сушилки в кипящем слое

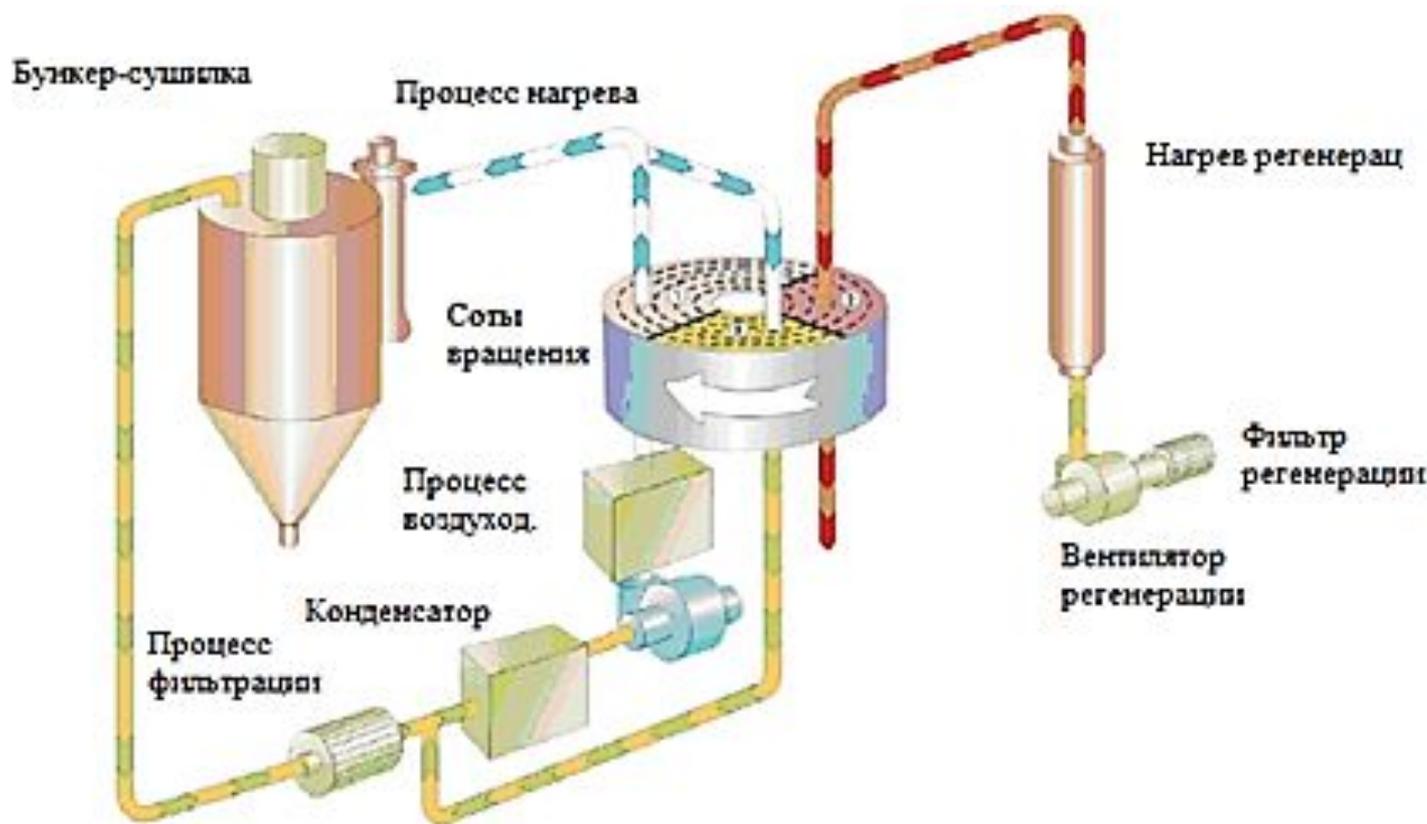


Схема влагопоглощающей сушилки

Процесс сушки происходит за счет прохождения воздуха через влагопоглощающий слой. Сухой воздух подается в материал и процесс повторяется. Такой способ позволяет качественно произвести сушку материала.

Надежная и стабильная программа управления.

ДОЗИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

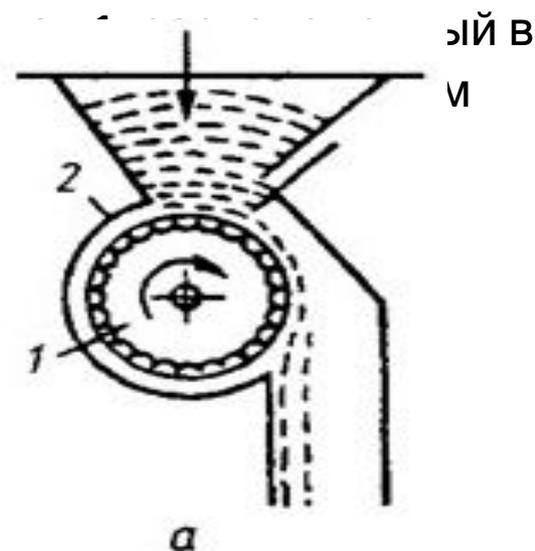
Дозаторы для сыпучих компонентов.

Принцип действия **объемных дозаторов непрерывного действия** для сыпучих материалов основан на подаче продукта из емкости (бункера) рабочим органом, совершающим вращательное, поступательное или возвратно-поступательное движение.

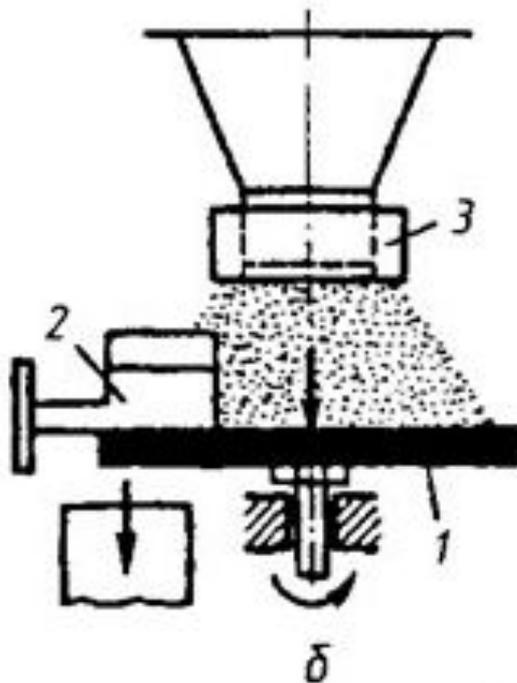
Для непрерывного **объемного** дозирования порошков используют барабанные, тарельчатые, шнековые, ленточные и вибрационные дозаторы.

Барабанный дозатор (рис. **а**) имеет рабочий корпус **2**, с несколькими карманами-ячейками, **3** материалом под действием силы тяжести.

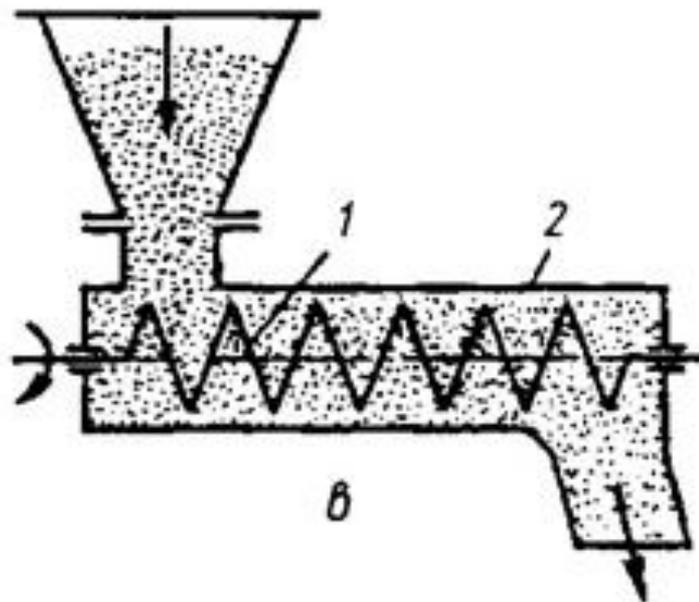
При регулировании производительности меняют объем карманов или частоту вращения барабана. Из карманов порошок поступает в выходной патрубке дозатора.



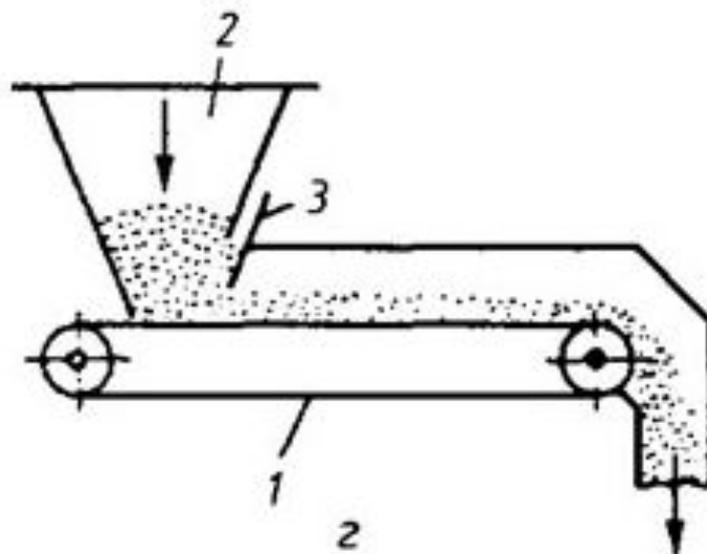
Тарельчатый дозатор (рис., б) представляет собой горизонтальный вращающийся диск 1 (тарель), с которого материал сбрасывается скребком 2. Высота слоя материала регулируется передвигающейся манжетой 3, перекрывающей выходной патрубок бункера. Материал располагается на тарели усеченным конусом, размеры которого зависят от высоты расположения манжеты.



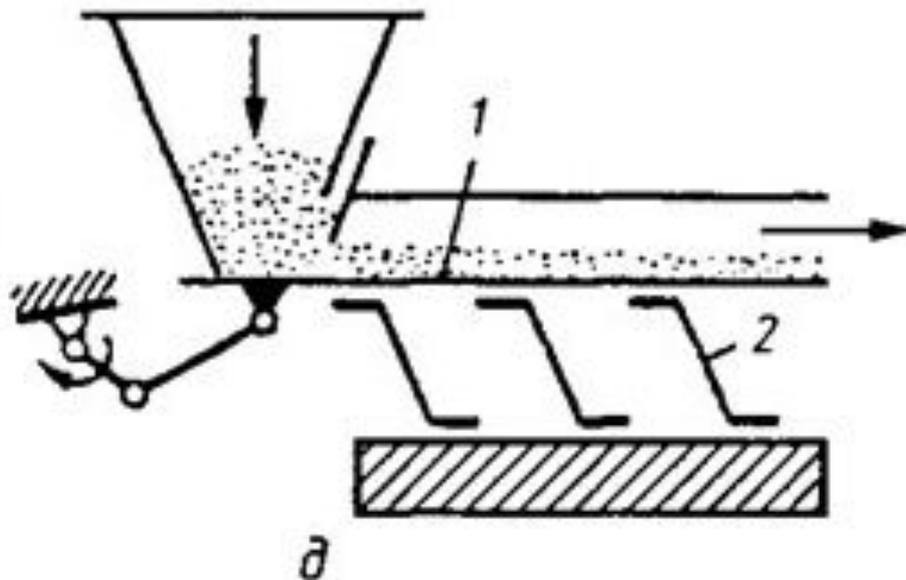
Шнековый дозатор (рис. **В**) представляет собой короткий шнек 1, помещенный в кожух 2, забирающий материал из бункера. Производительность дозатора может регулироваться частотой вращения шнека.



Ленточный дозатор (рис. Г) является коротким ленточным конвейером 1, расположенным под питающим бункером 2. Подачу материала можно регулировать перемещением заслонки 3 или изменением скорости конвейера.



Вибрационный дозатор (рис. Д) имеет рабочий орган в виде колеблющегося лотка 7, подвешенного на гибких опорах 2. При вибрации лотка сыпучий материал перемещается в продольном направлении.

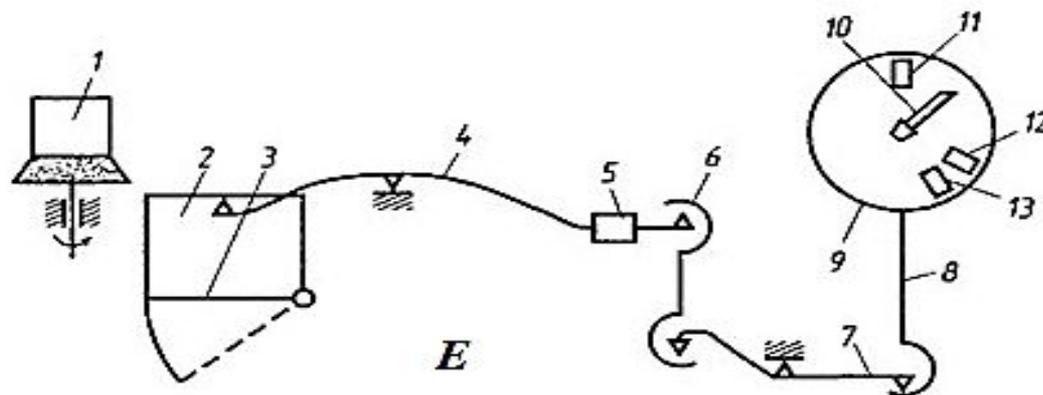


Весовые дозаторы порошков и гранул , в основном, используют на предприятиях при периодических и непрерывных процессах. Принцип их действия основан на использовании квадрантных или рычажных весовых механизмов.

Бункерный дозатор (рис. E) относится к **дозаторам весового типа**, работающим в периодическом режиме от питателя 1.

В нем на призмах малого плеча грузоприемного рычага 4 подвешен бункер 2 с открывающимся дном 3.

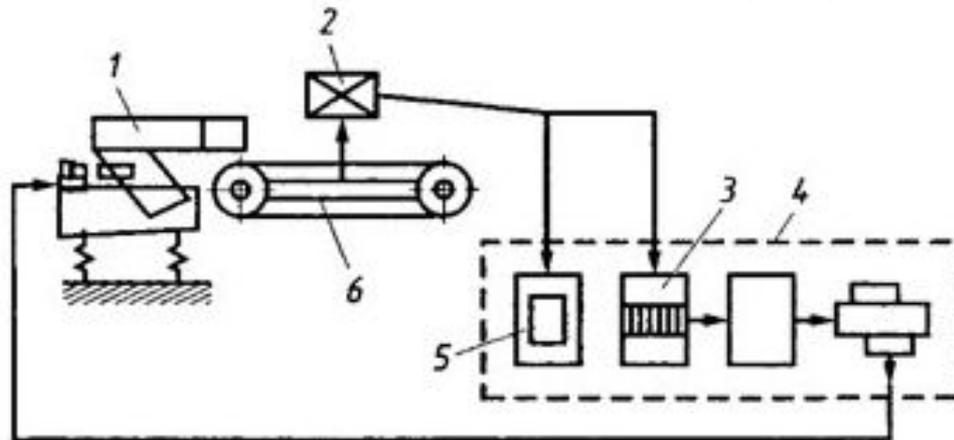
Большое плечо при помощи тяг 6, 8 и промежуточного рычага 7 связано с циферблатным указательным прибором 9, на котором установлены датчики грубой 12 и точной 13 массы, датчик 11 нулевого положения стрелки 10. На большом плече расположен противовес 5.



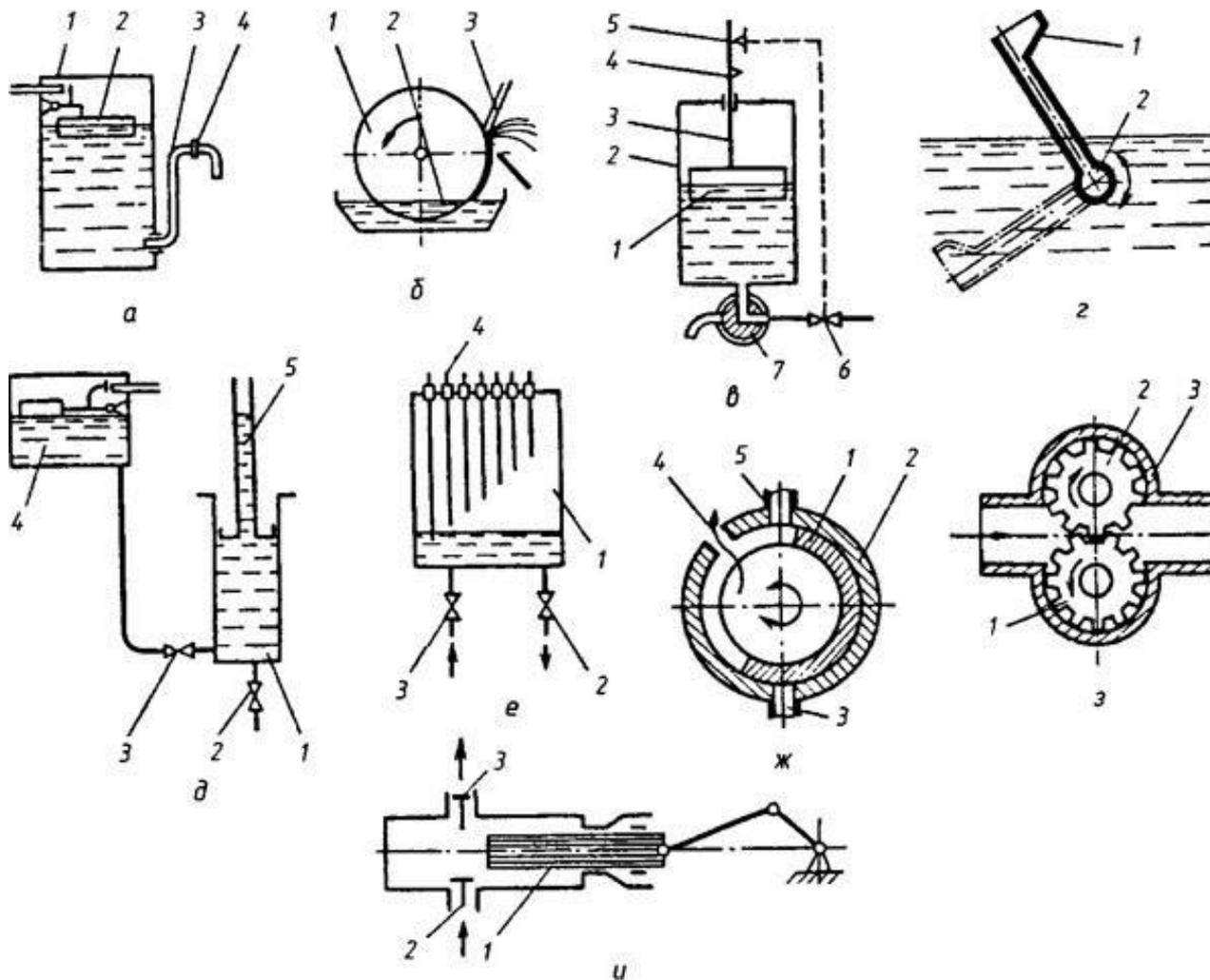
Ленточный дозатор (рис. Ж) относится к дозаторам весового типа, обеспечивает высокую точность дозирования сыпучих компонентов при непрерывных процессах переработки.

Питатель 1 подает дозируемый продукт на короткий конвейер 6, движущийся с постоянной скоростью. При поступлении продукта на конвейер сигнал, поступающий на весовое устройство 2, непрерывно преобразуется им в пропорциональный электрический или пневматический сигнал, подающийся в систему регистрации и автоматического управления 4, а затем в интегрирующий 5 и регистрирующий 3 приборы. Эта система обеспечивает заданную производительность питателя.

Системы автоматического непрерывного весового дозирования обладают гибкостью и хорошо сочетаются с современными средствами комплексной механизации и автоматизации производства и микропроцессорной техникой.



СХЕМЫ ДОЗАТОРОВ ОБЪЕМНОГО ТИПА ДЛЯ ЖИДКИХ КОМПОНЕНТОВ:



а — дроссельный; б — барабанный; в — поплавковый; г — черпаковый; д — фиксированного уровня; е — электродный; ж — стаканчиковый; з — шестеренный; и — поршневой

Дроссельный дозатор (рис. а) представляет собой емкость 1, в которой при помощи поплавкового клапана 2 поддерживается постоянный уровень. Жидкость сливается по трубопроводу 3, на котором установлено дросселирующее устройство 4.

Этим способом при условии поддержания температуры на постоянном уровне можно с высокой точностью дозировать жидкости, близкие к ньютоновским. Однако при этом следует учитывать, что при дозировании жидких компонентов возможно выделение примесей, а также появление отложений на стенках трубопроводов и поверхностях дросселирующего устройства, что приводит к изменению расхода компонентов в зависимости от продолжительности работы дозатора.

Барабанный дозатор (рис. б) осуществляет непрерывное объемное дозирование жидких компонентов за счет формирования тонкого слоя на поверхности быстровращающегося барабана. Барабан 1, погруженный в емкость 2 постоянного уровня на глубину около 0,3 радиуса барабана, должен вращаться со скоростью 2...3 м/с. Налипший слой жидкости скребком 3 направляется в установку пропитки или смесителя. Увеличение поверхности смешиваемых потоков ускоряет образование однородной смеси.

Недостатками метода тонкослойного дозирования являются трудности регулирования расхода из-за его нелинейной зависимости от частоты вращения барабана, температуры и других факторов, а также значительные габаритные размеры дозатора

Основные функции и возможности гравиметрических дозаторов



Гравиметрика может выполнять следующие основные функции:

- Измерение расхода исходного материала (кг/час)
- Измерение скорости выхода готовой продукции (м/мин)
- Вычисление плотности готовой продукции (Кг/м)
- Регулирование плотности готовой продукции путём изменения скорости вращения экструдера и подающих шнеков.
- Регулирование плотности готовой продукции путём изменения скорости тянущего к устройства
- Учет количества израсходованного сырья (кг)
- Учет количества произведённой продукции (м)

Принцип работы гравиметрических весов

Весы устанавливаются на входе дозатора или экструдера.

Масса материала находящегося на весах преобразуется мостовым датчиком в электрический сигнал постоянного тока и подаётся на аналоговый вход контроллера, который преобразует его в цифровую форму и использует для дальнейших вычислений. В ходе работы экструдера количество находящегося на весах материала уменьшается, и зная массу материала в каждый момент времени и промежуток времени процессор вычисляет расход в единицу времени по формуле:

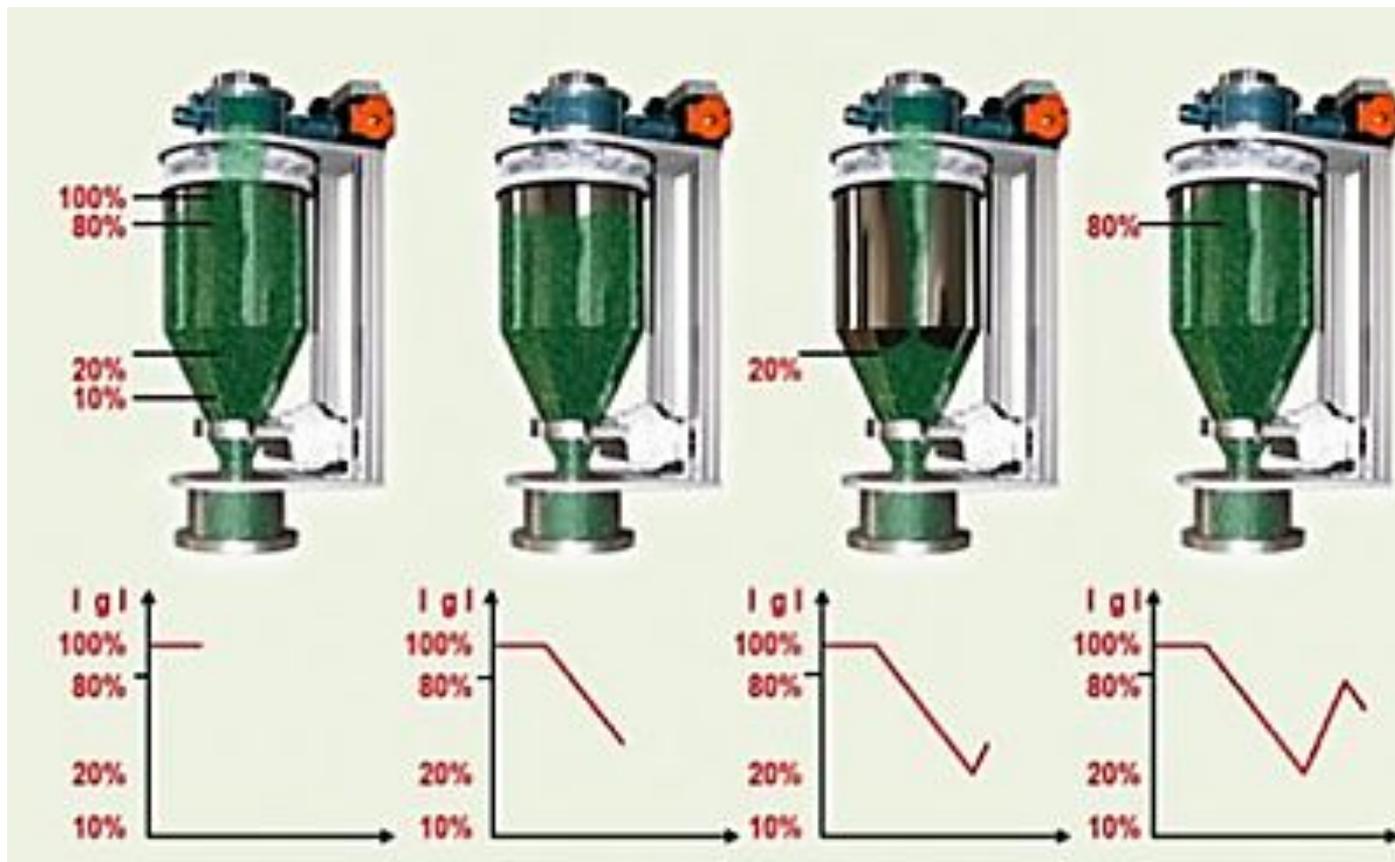
$$Q[\text{кг/час}] = K (\Delta M [\text{кг}] / \Delta T [\text{сек.}])$$

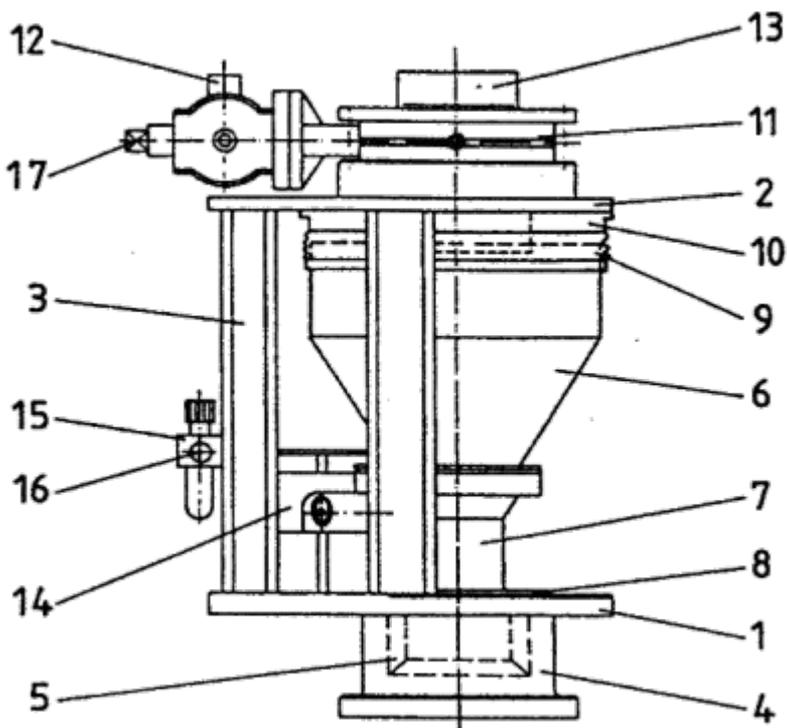
Параметры ΔM - изменение массы и ΔT -промежуток времени можно изменять с пульта в зависимости от производительности экструдера.

ΔM – задаётся косвенно заданием количества циклов измерения за одно опорожнение воронки. Зависимость расхода от времени имеет линейный характер в диапазоне 80...20(%) заполнения воронки, в этих границах рекомендуется проводить вычисление расхода. Эти границы заданы в процессоре и могут быть изменены с дисплея.

Для корректировки минимума и максимума заполнения воронки для конкретного материала существует режим адаптивного наполнения, это означает, что каждое N -ое наполнение производится до 100% и вычисляются новые 20% и 80%.

Активировать и деактивировать адаптивное наполнение, а также изменять





Устройство весов гравиметрического дозатора

Воронкообразные весы в исполнении для гранул с EBRO-запорным клапаном

- 1 Основание
- 2 Несущая платформа
- 3 Несущий профиль
- 4 Горловина
- 5 Редукционная втулка
- 6 Взвешивающая воронка
- 7 Выходной патрубков взвешивающей воронки
- 8 Siliconовая уплотнительная шайба
- 9 Фильтрующая манжета
- 10 Крепёжное кольцо

11 EBRO-запорный клапан

12 Ручное управление/пневматическое

13 Заполняющий патрубок

14 Взвешивающий элемент-приёмник (с защитой от пыли)

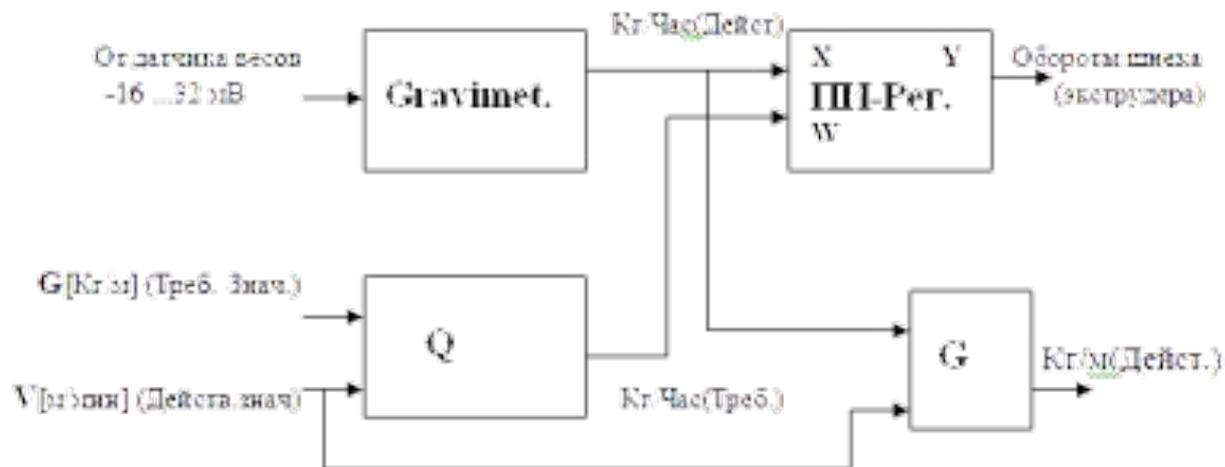
15 Служебный блок для подачи сжатого воздуха

16 Штутцер для подключения шланга

17 Ручное управление/механическое



Устройство дозатора



$$Q[\text{Кг/Час}] = G[\text{Кг/м}] * V[\text{м/мин}] * 60$$

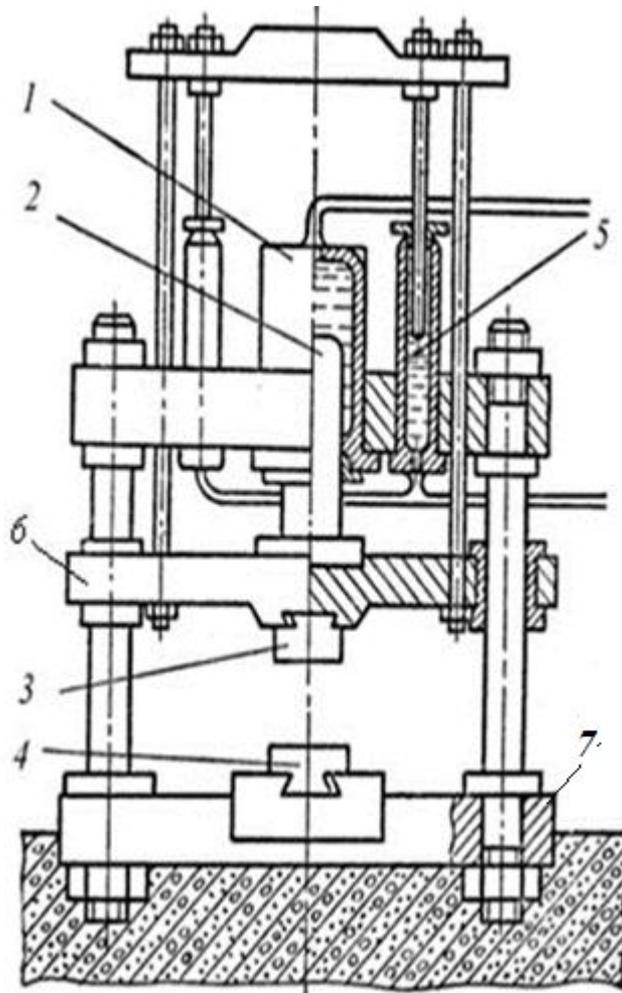
$$G[\text{Кг/м}] = Q[\text{Кг/Час}] / (V[\text{м/мин}] * 60)$$

Q – Расход (Кг/Час)

G – Удельный вес (Кг/м)

V – Скорость выхода продукции (м/мин)

ПРЕССОВАНИЕ (СХЕМА ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА)



1. Гидроцилиндр пресса
2. Поршень гидроцилиндра
3. Пуансон пресс-формы
4. Матрица пресс-формы
5. Гидроцилиндры возврата плунжера
6. Подвижная плита пресса
7. Нижняя плита пресса

Схема гидравлического
пресса

ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ (СХЕМА ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА)

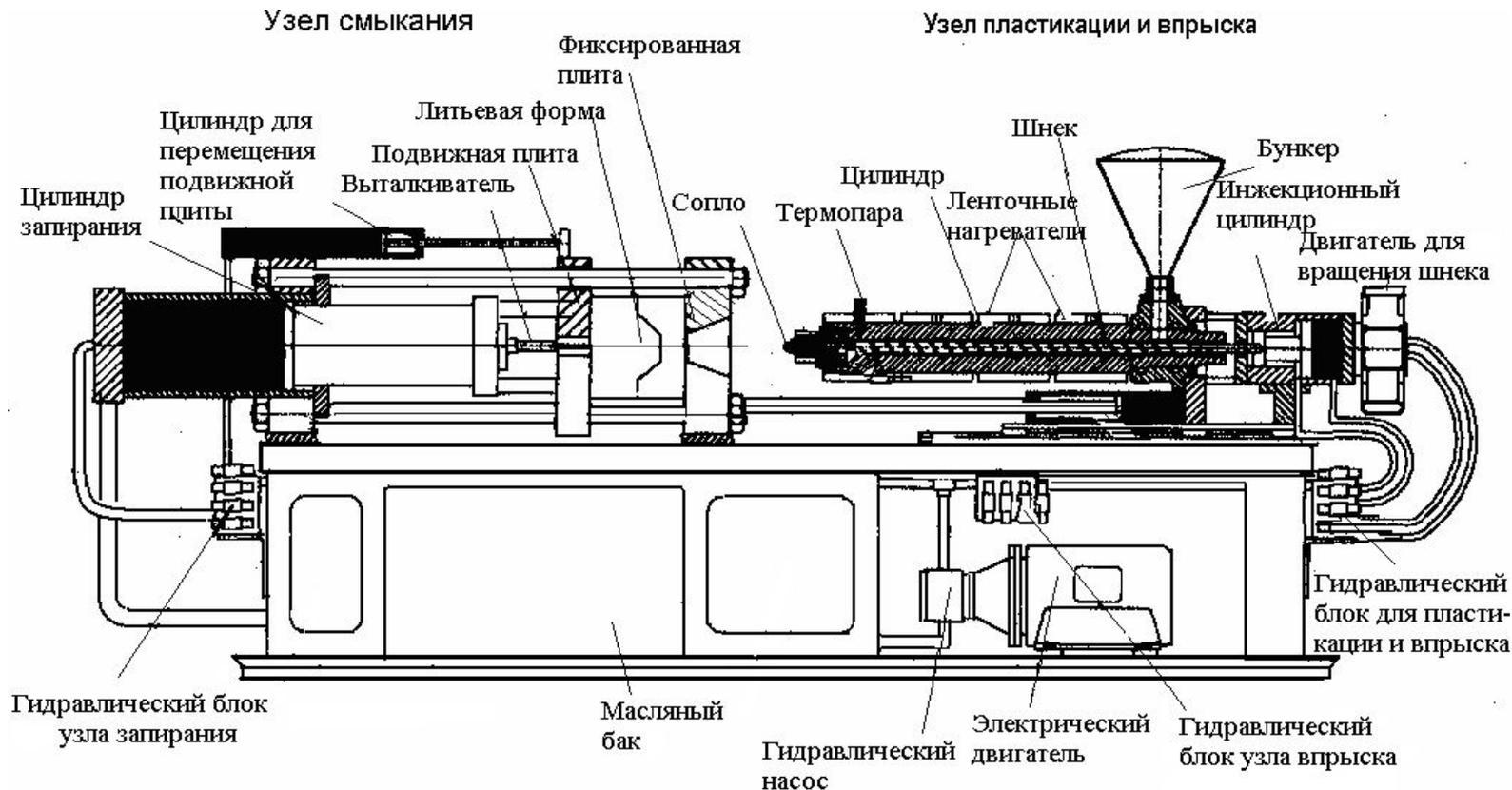


Схема термопластавтомата (ТПА) с червячной пластикацией

ЭКСТРУЗИЯ (СХЕМА ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА)

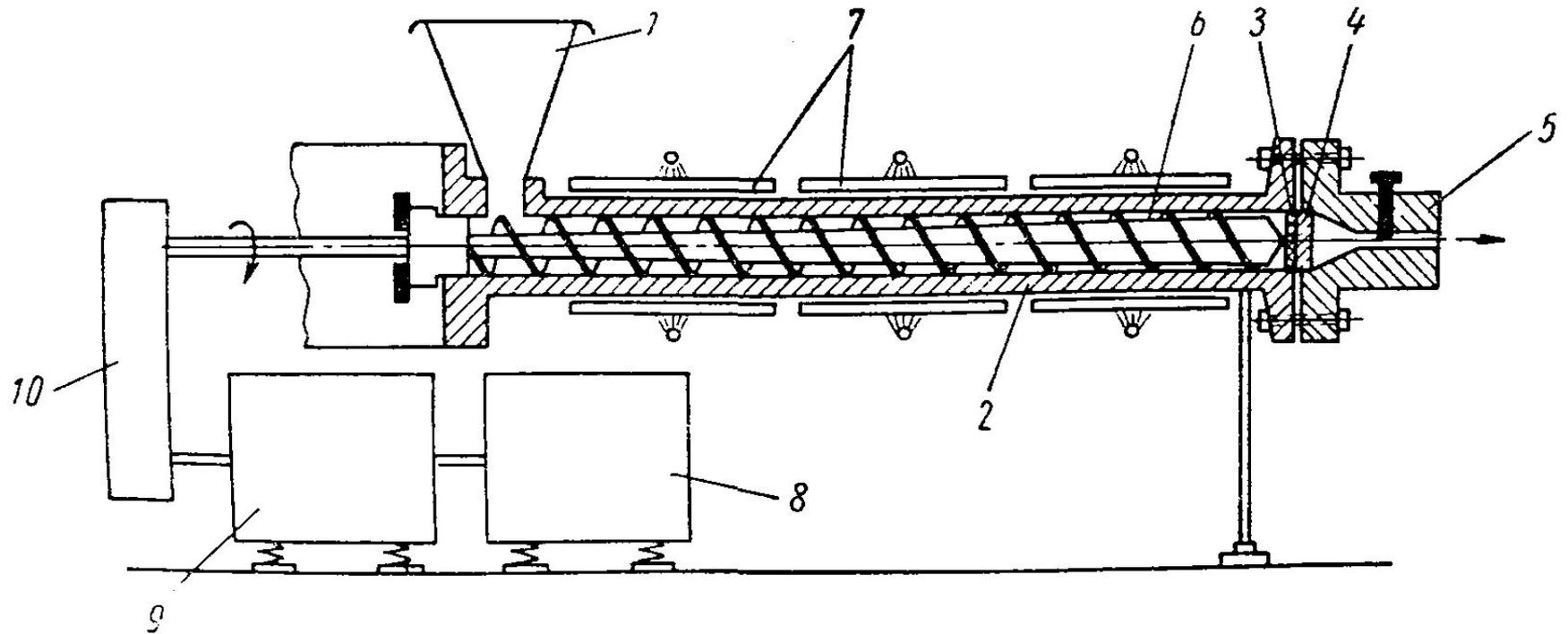


Схема одночервячного
экструдера

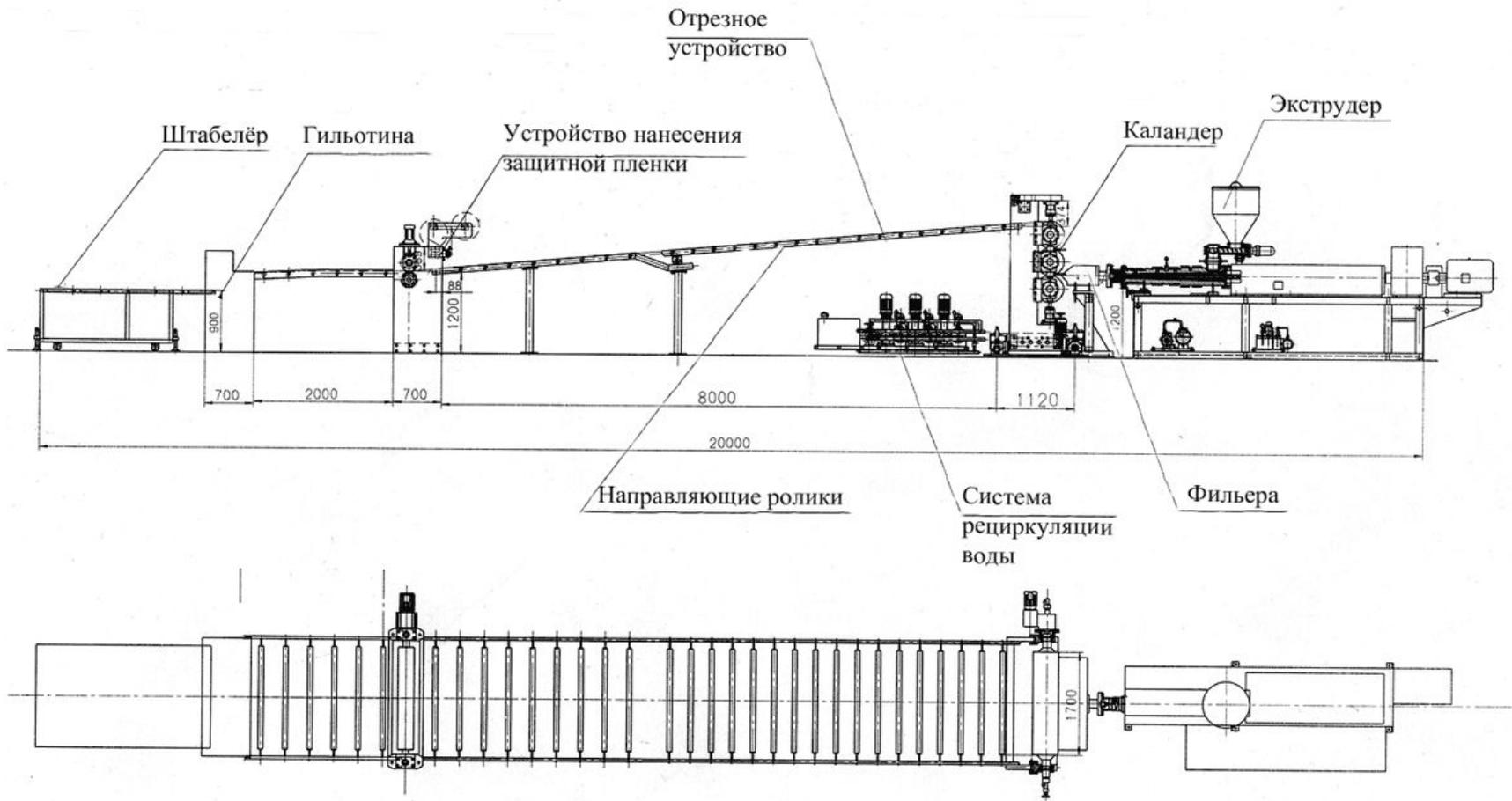


Схема линии для производства ЛИСТОВ

ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛИМЕРОВ

Для исследования процессов, происходящих в индивидуальных веществах или многокомпонентных системах при нагревании или охлаждении и сопровождающихся изменением внутреннего теплосодержания системы используют **термический анализ**.

Термический анализ объединяет **группу методов**, отличающихся аппаратным оформлением и измеряемой характеристикой.

Если измеряется **температура** образца, метод называется **термографией**, масса образца – **термогравиметрией**, количество выделившегося или поглощенного **тепла** – **калориметрией**, **объем** – **дилатометрией** и т.д.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ (ДТА)

При термографическом анализе регистрируемой характеристикой вещества является температура $T = f(t)$.

Записывается термограмма в координатах «Т—t»

Методом ДТА измеряют разность температур ΔT исследуемого образца и инертного эталона (рис. 1).

В качестве эталона используют вещество, не претерпевающее термических превращений в данном температурном интервале. В этом термограмме записывается в координатах $\Delta T — t$ (дифференциальная схема эксперимента). На рис. 2 представлена схематическая кривая ДТА полимера, охватывающая всю температурную область существования полимера

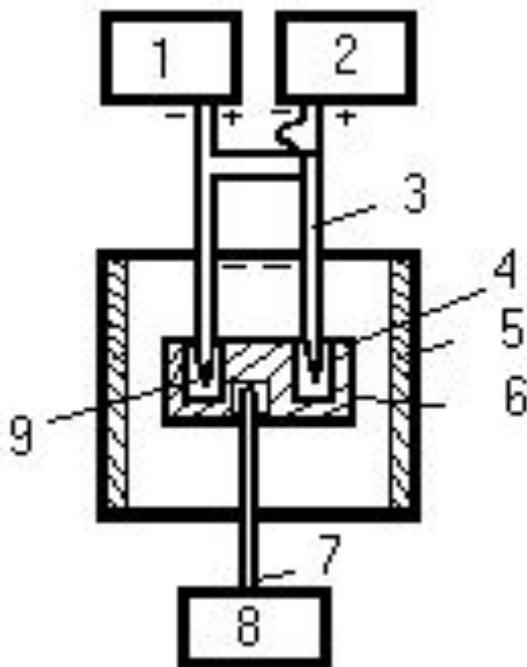


Рис. 1 - Схема прибора для ДТА:

- 1- регистратор разности температур;
- 2 -регистратор температуры образца;
- 3 - комбинированная термопара;
- 4 - блок для исследуемого образца и инертного вещества;
- 5 – печь;
- 6 - ячейка с исследуемым образцом;
- 7 - термопара;
- 8 - программный регулятор нагрева печи;
- 9 - ячейка с инертным веществом

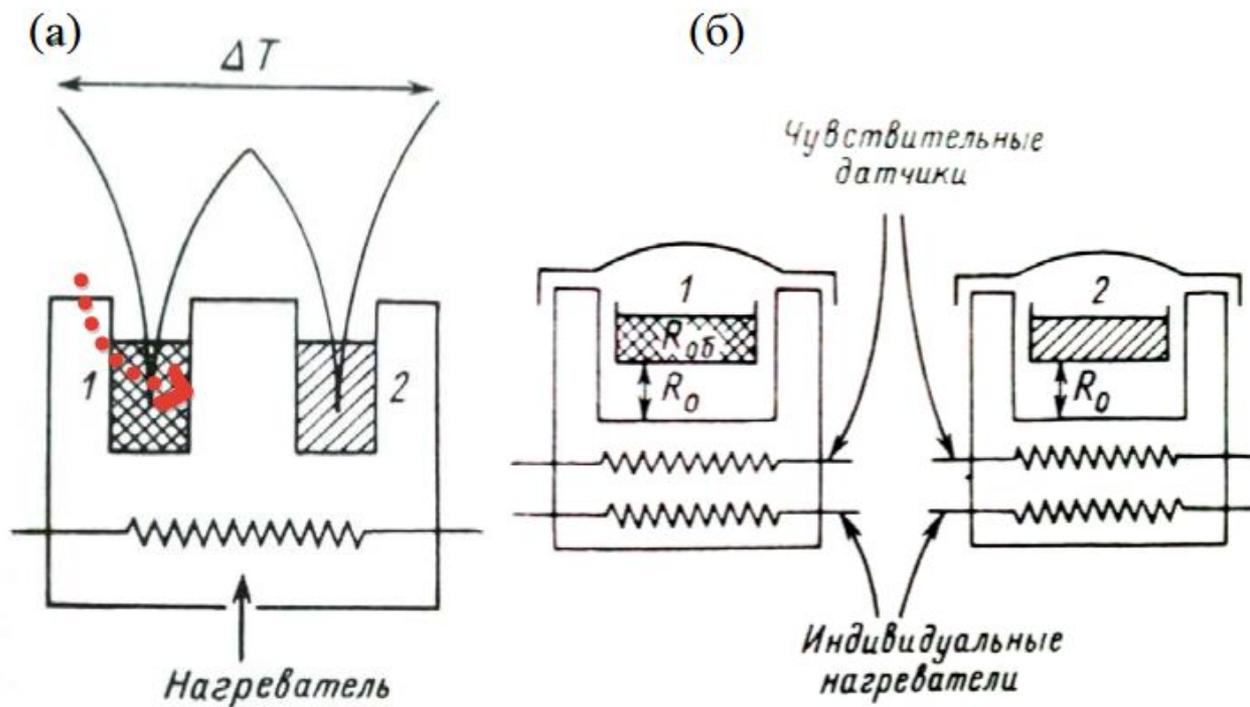


Рис. 3.22. Схематическое изображение калориметрических ячеек для ДТА (а) и ДСК (б): 1 – образец, 2 – эталон; R_0 – термосопротивление прибора, $R_{об}$ – термосопротивление образца.



Рис.2 - Схематическая кривая ДТА полимера

- ΔT – поглощение тепла
 + ΔT – выделение тепла

Превращения, происходящие в полимерах при изменении температуры, можно разделить на две группы — физические и химические.

Физические превращения

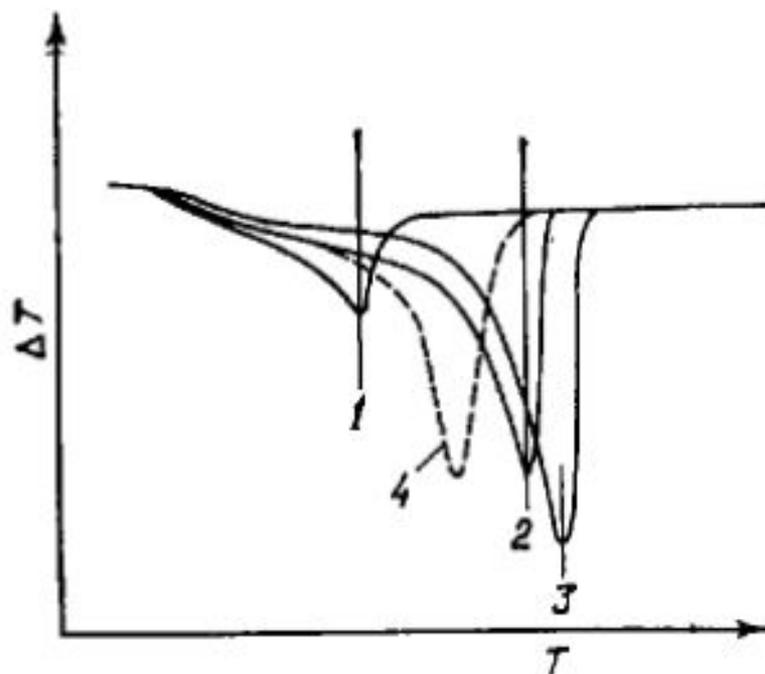
Физические переходы, изучаемые методом ДТА, по мере повышения температуры располагаются в следующем порядке:

- стеклование,
- «холодная» кристаллизация,
- переходы типа кристалл — кристалл (рекристаллизация),
- кристаллизация из расплава, плавление.

Стеклование, не являясь фазовым переходом, характеризуется постепенным изменением теплоемкости с температурой.

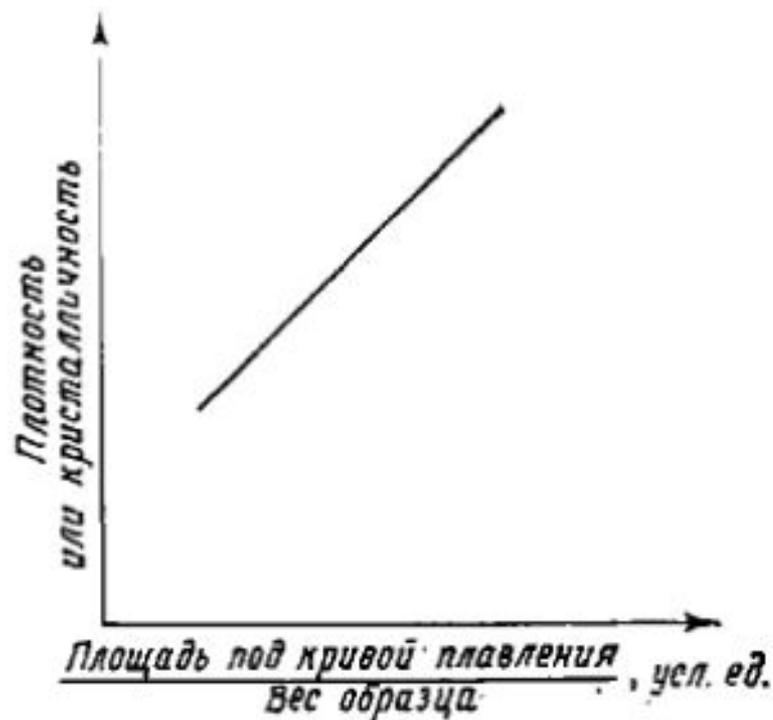
На кривых ДТА это отражается отклонением от базовой линии в сторону ступенчатого уменьшения ΔT .

За температуру стеклования обычно принимают начало этого отклонения.



Кривые плавления трех полимерных образцов с различной плотностью и кристалличностью.

1—образец с плотностью 0,92 и кристалличностью 30%; 2—образец с плотностью 0,95 и кристалличностью 60%; 3—образец с плотностью 0,96 и кристалличностью 73%; 4—неизвестный образец.



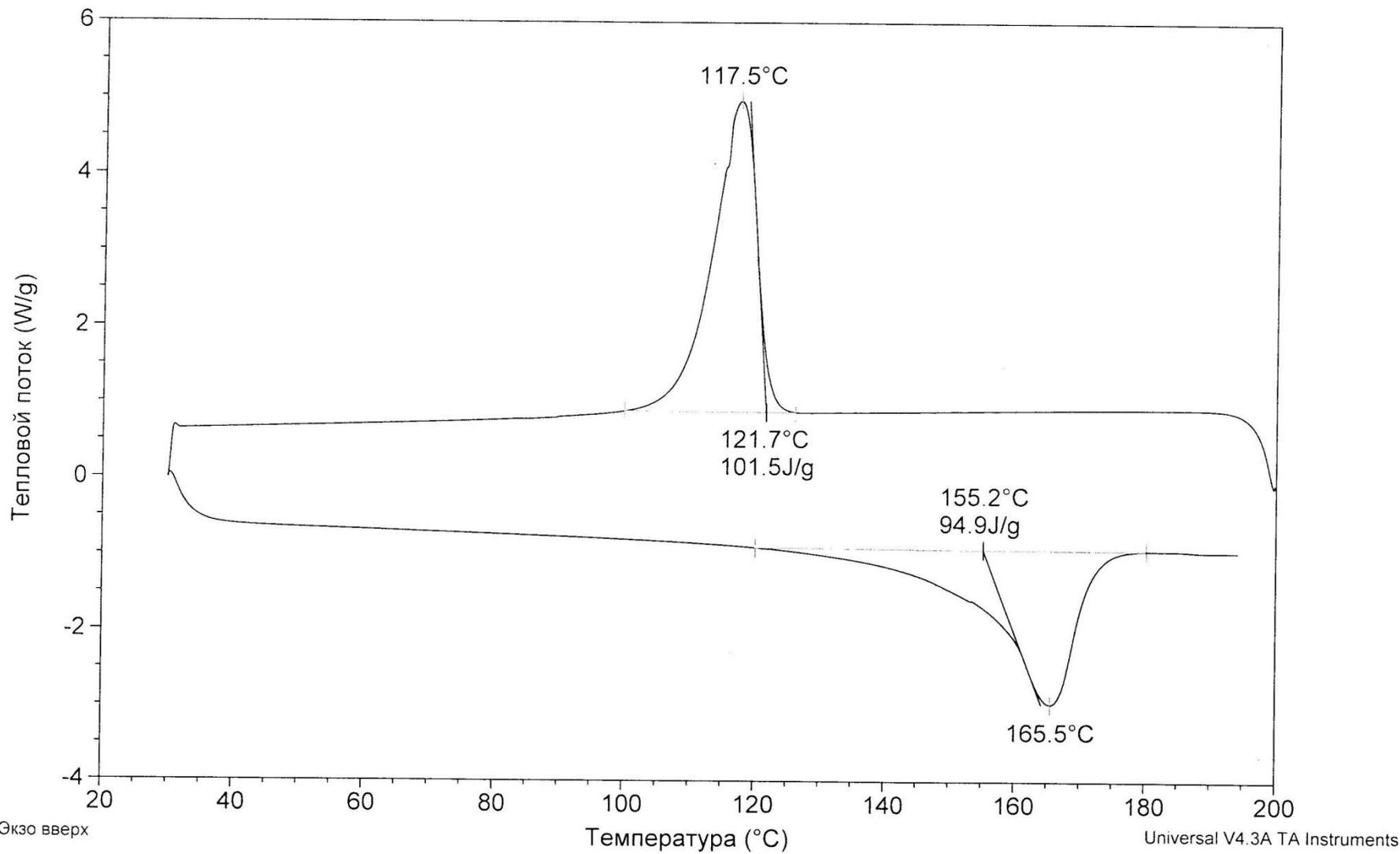
Калибровочная кривая зависимости площади (на единицу веса) под кривой плавления образца от плотности (или кристалличности в процентах) полимерных образцов.

Образец: пл БС-05
Размер: 8.6100 mg
Метод: Cell/Cooler Conditioning

DSC

Файл: C:\...ЛПП белая сажа 05 argon.001

Дата: 08-Фев-2012 13:37
Прибор: DSC Q100 V9.8 Build 296



По площадям пиков плавления можно определить теплоты плавления, предварительно прокалибровав прибор по веществу с известной теплотой:

$$\Delta H = \Delta H_{\text{эт}} A^* m_{\text{эт}} / (A^* m) \quad (1)$$

где ΔH - теплота плавления полимера, Дж/г;

$\Delta H_{\text{эт}}$ - теплота плавления эталона, Дж/г;

m и $m_{\text{эт}}$ — масса образца полимера и эталона, г;

A и $A_{\text{эт}}$ - площади пиков полимера и эталонного вещества.

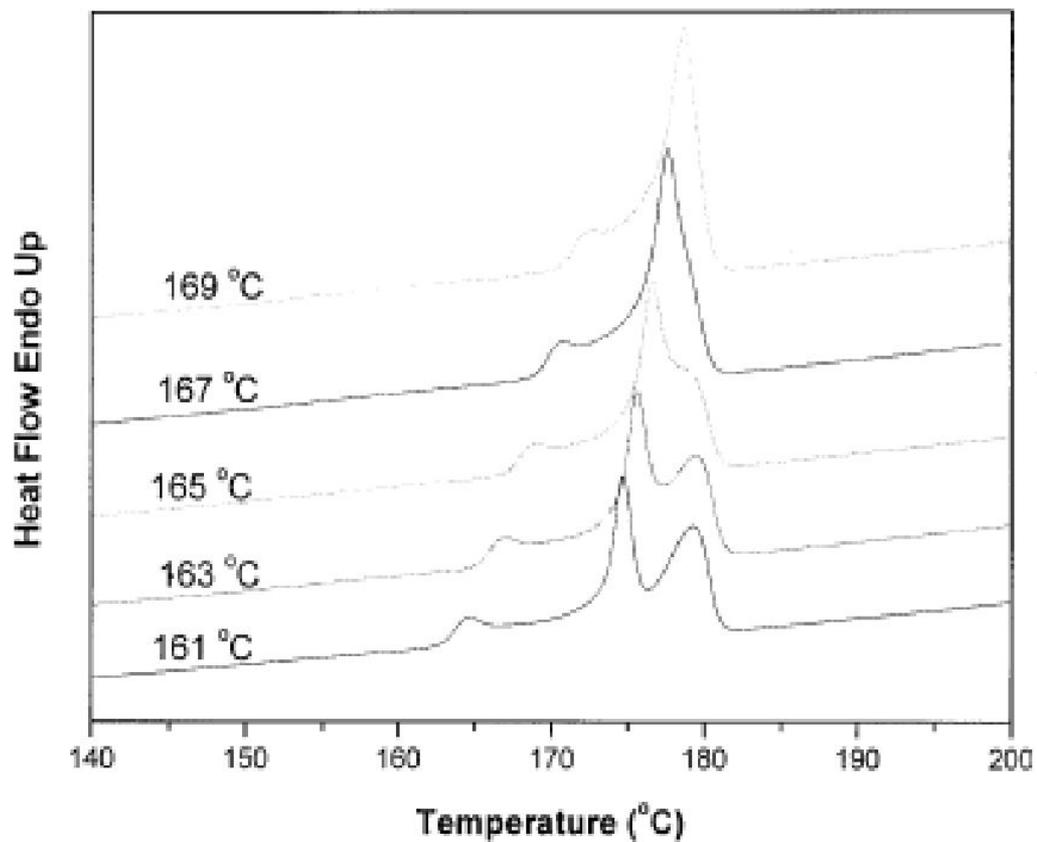
Например, для расчета истинных теплот плавления полиэтилена прибор калибруют по бензойной кислоте, теплота плавления которой 142,4 Дж/г.

Если известна теплота плавления ΔH^* полностью закристаллизованного полимера, то степень кристалличности

α можно определить по уравнению

$$\alpha = (\Delta H / \Delta H^*) * 100 \quad (2)$$

В качестве ΔH^* для полиэтилена принята теплота плавления кристаллического дотриаконтана $C_{32}H_{66}$, равная 271,3 Дж/г.



1 DSC thermograms of nylon 12,14 isothermally crystallized at a specified temperature at a heating rate of 10°C/min.

Рис. - Термограмма ДСК ПА 12,14 изотермически кристаллизуемого при скорости нагрева 10 град/мин [4]

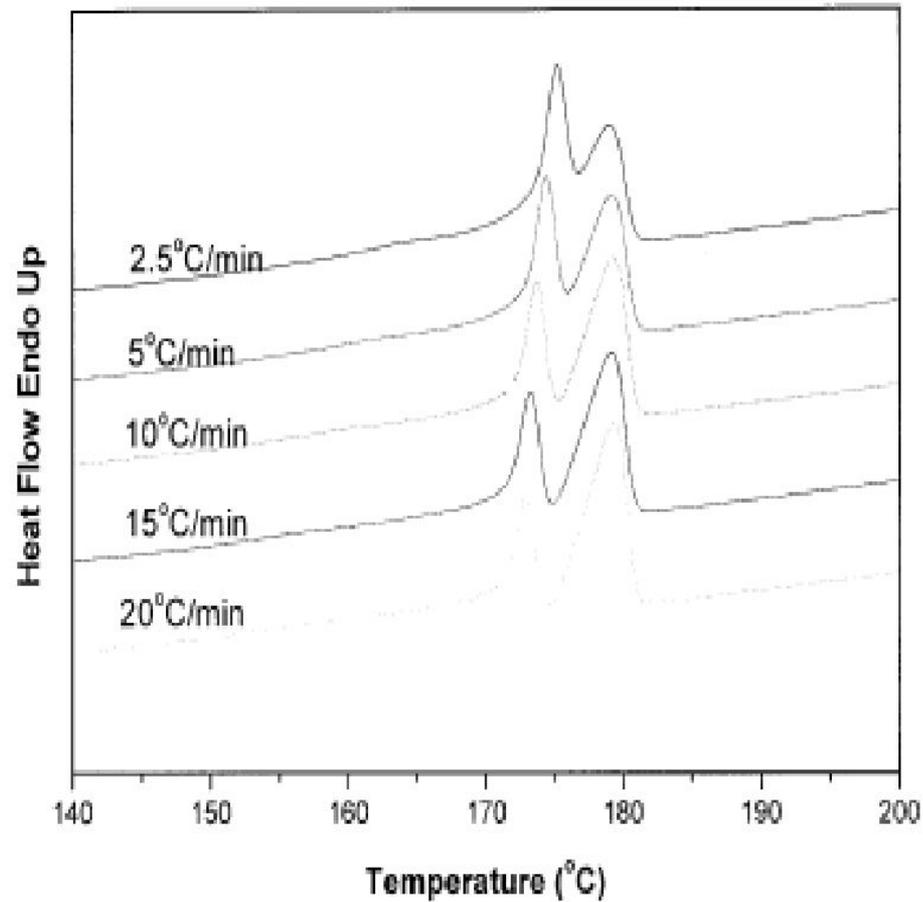


Figure 7 DSC thermograms of nylon 12,14 nonisothermally crystallized at a specified cooling rate at a heating rate of 10°C/min.

Термограммы плавления ДСК, выполненные после неізотермической кристаллизации при различных скоростях охлаждения (рис. 5) [4]

Кривые ДСК

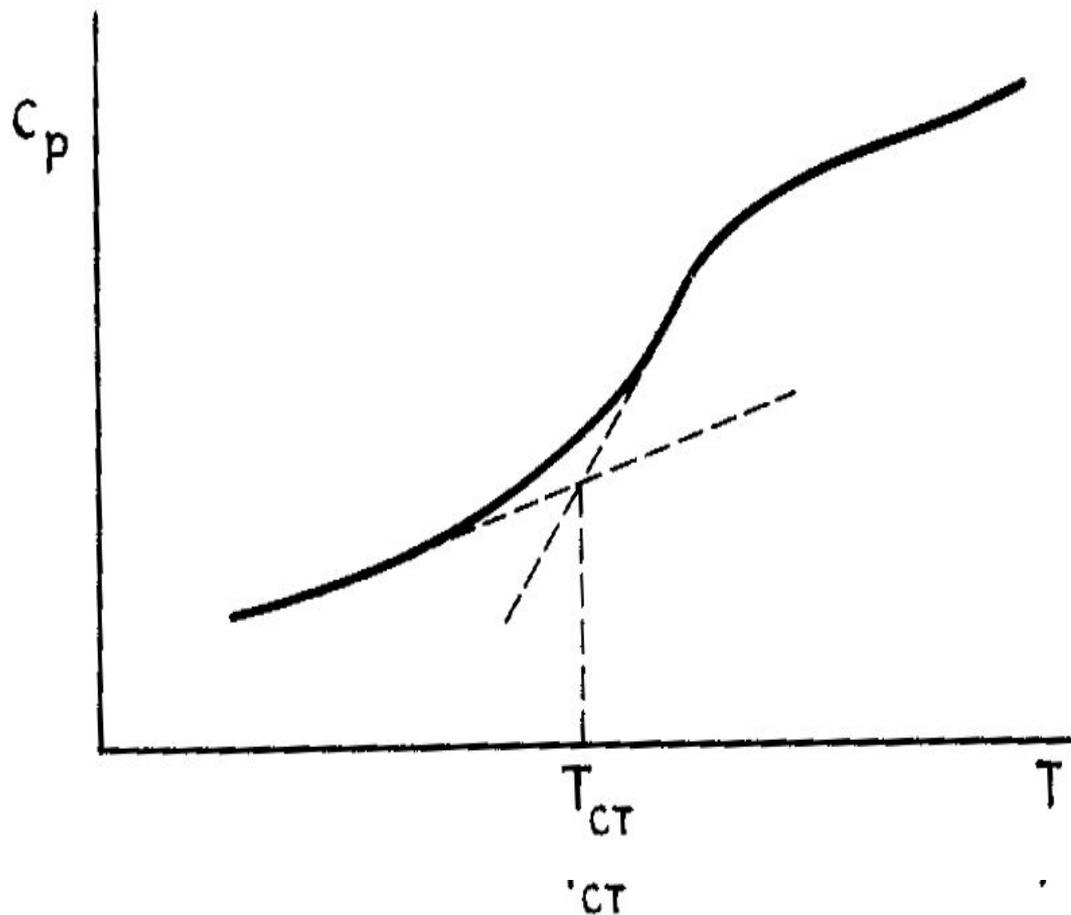
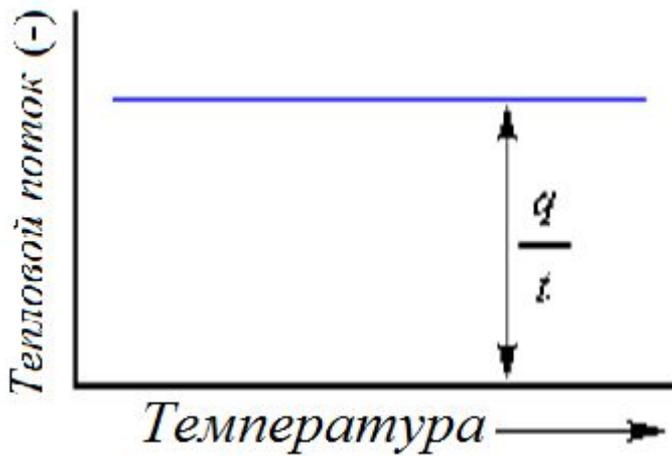


Рис. - Определение температуры стеклования.

Вычисление теплоемкости



q – количество тепла

t - время

ΔT – прирост температуры

q/t – тепловой поток

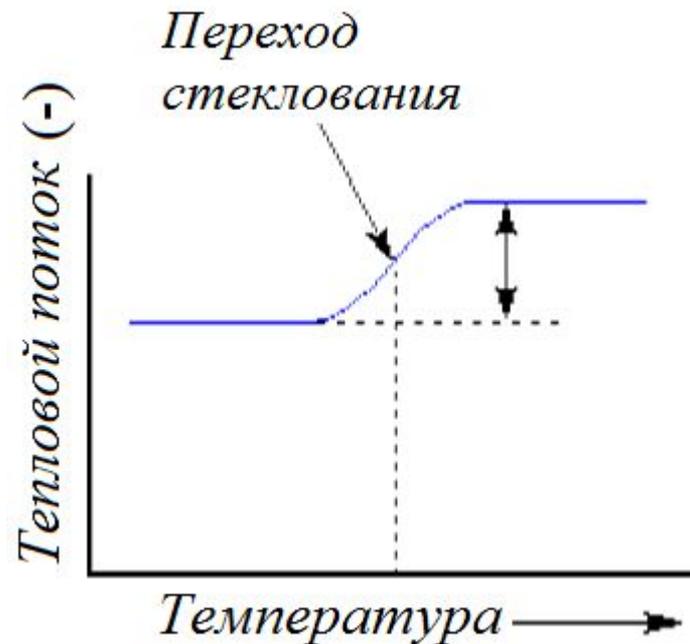
$\Delta T/t$ – скорость нагревания

C_p - теплоемкость

$$\frac{q}{t} = \text{тепловой поток}$$

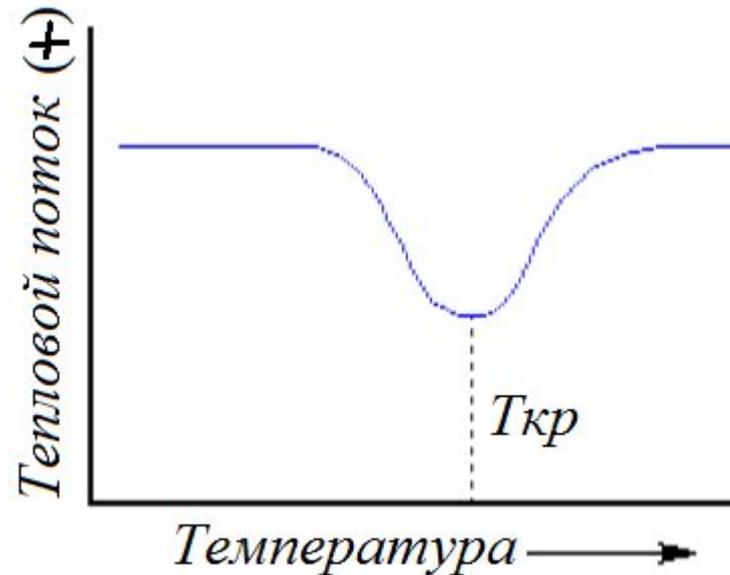
$$\frac{\frac{q}{t}}{\frac{\Delta T}{t}} = \frac{q}{\Delta T} = C_p \quad \text{теплоемкость}$$

Определение температуры стеклования



При определенной температуре кривая $\Delta H = f(T)$ смещается вверх. Компьютерная программа регистрирует увеличение потока тепла, т. е. увеличивается теплоемкость полимера. Произошел процесс стеклования. При температуре выше температуры стеклования полимеры обладают более высокой теплопроводностью, чем при более низких температурах.

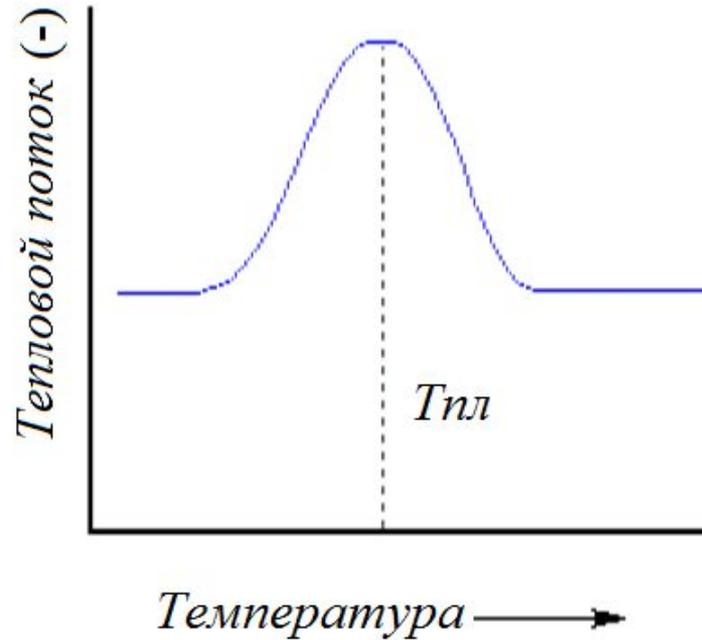
Кристаллизация



При охлаждении из расплава подвижность сегментов постепенно снижается, идет формирование зародышей кристаллитов и их рост.

Процесс идет **с выделением тепла** (теплота кристаллизации), после завершения кристаллизации тепловые потоки над образцом и эталоном выравниваются.

Плавлени е



Нагревая полимер выше его T_c , достигают фазового перехода называемого плавлением ($T_{пл}$, T_m). Плавление происходит с поглощением

тепла и ведет к повышению подвижности сегментов.

Результат – разрушение кристаллитов, переход полимера в текучее состояние.

Определение степени кристалличности

$$\alpha = \frac{\Delta H_{100\%} - \Delta H_{обр}}{\Delta H_{100\%}} * 100 \%$$

$\Delta H_{100\%}$ - теплота плавления полностью кристаллического образца

$\Delta H_{100\%}$ - справочная величина

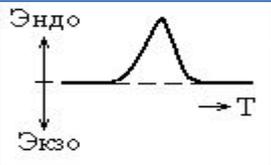
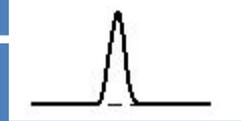
Химические превращения

С помощью ДТА можно изучать процессы получения полимеров, определять оптимальные условия реакции, исследовать влияние состава на их скорость и др. и химические превращения полимеров.

Например, можно определить оптимальные условия вулканизации каучуков, отверждения эпоксидных смол, охарактеризовать способность полимера к окислению.

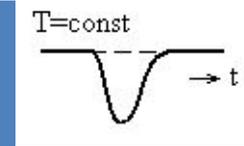
Кроме того, ДТА широко применяют для оценки термостабильности и термодеструкции полимеров.

Таблица 1 – Некоторые виды превращений в полимерах регистрируемые ДСК

Вид превращения	Вид аномалии на кривой ДСК при нагревании
Плавление	
Квазистабильные кристаллы	
Плавление с реорганизацией кристаллов	
Множественное плавление (разные фазы или размеры кристаллов одного полимера, смесь кристаллических полимеров, жидкокристаллические полимеры и др.)	
Плавление ориентированного полимера	

Кристаллизация

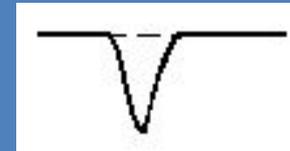
Изотермические условия



Охлаждение расплава



«Холодная» кристаллизация при нагревании твердого полимера

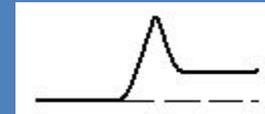


Расстекловывание (α -переход) и релаксация при $T < T_c$

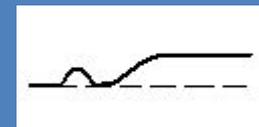
Закаленное состояние



Отожженное состояние



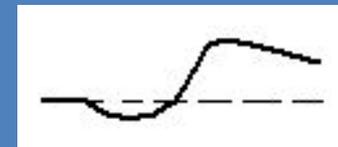
Закалка с частичным (низкотемпературным) отжигом



Сильно пластифицированный полимер



Интенсивно закаленный или предварительно деформированный стеклообразный полимер



Стеклование

Охлаждение из расплава или высокоэластического состояния



Другие физико-химические процессы

Полимеризация, отверждение
~~смер. разложение, абсорбция~~



Десольватация, разложение,
деполимеризация



Испарение, сублимация



Испарение в герметичной капсуле



ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ (ТГА)

Некоторые химические процессы, протекающие в веществе при нагревании, сопровождаются изменением его массы (термоокисление, деструкция и др.).

Для анализа этих процессов применяют ТГА, сущность которого заключается в оценке изменения массы полимера в зависимости от температуры.

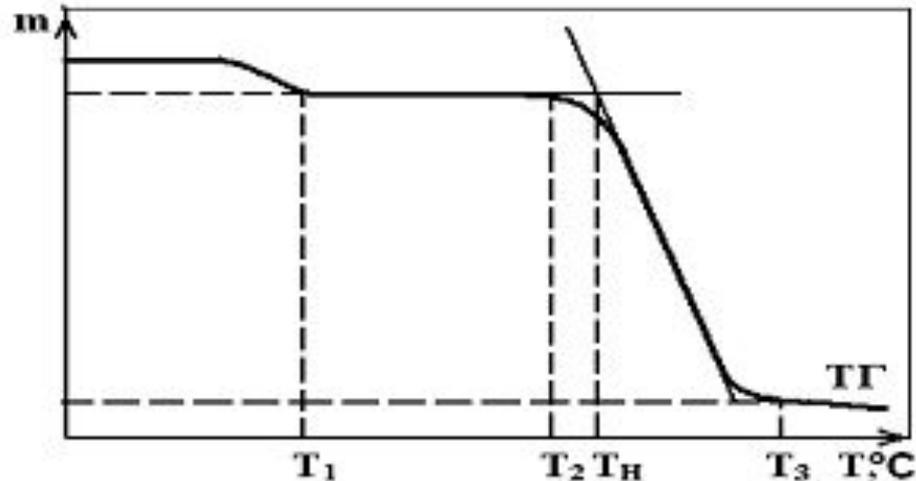
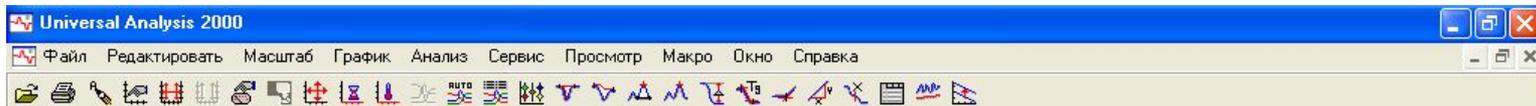


Рисунок 3 – Типичная кривая ТГА



Образец: оксалат кальция

TGA Файл: C:\TA\Data\TGA\CaOxalate.001

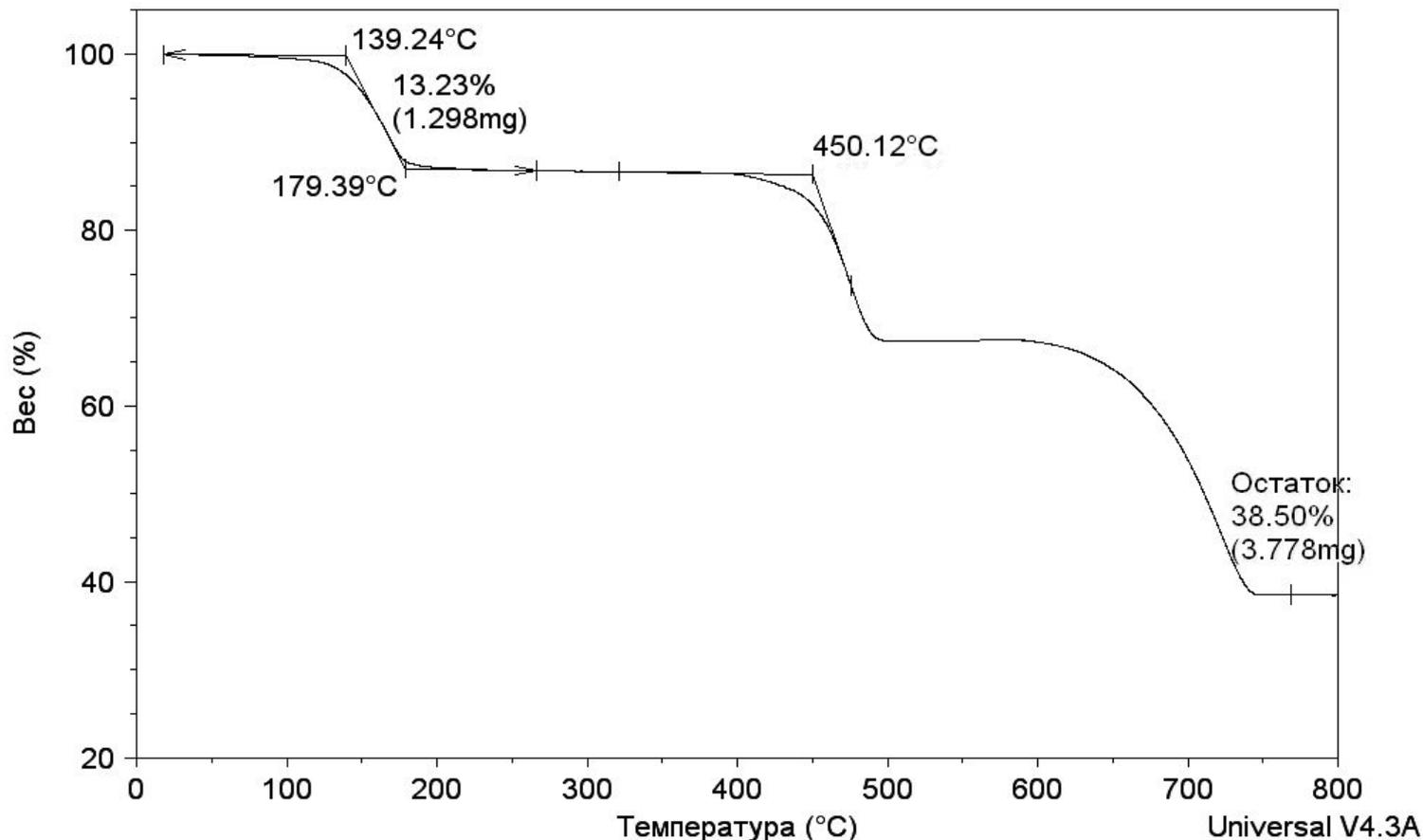
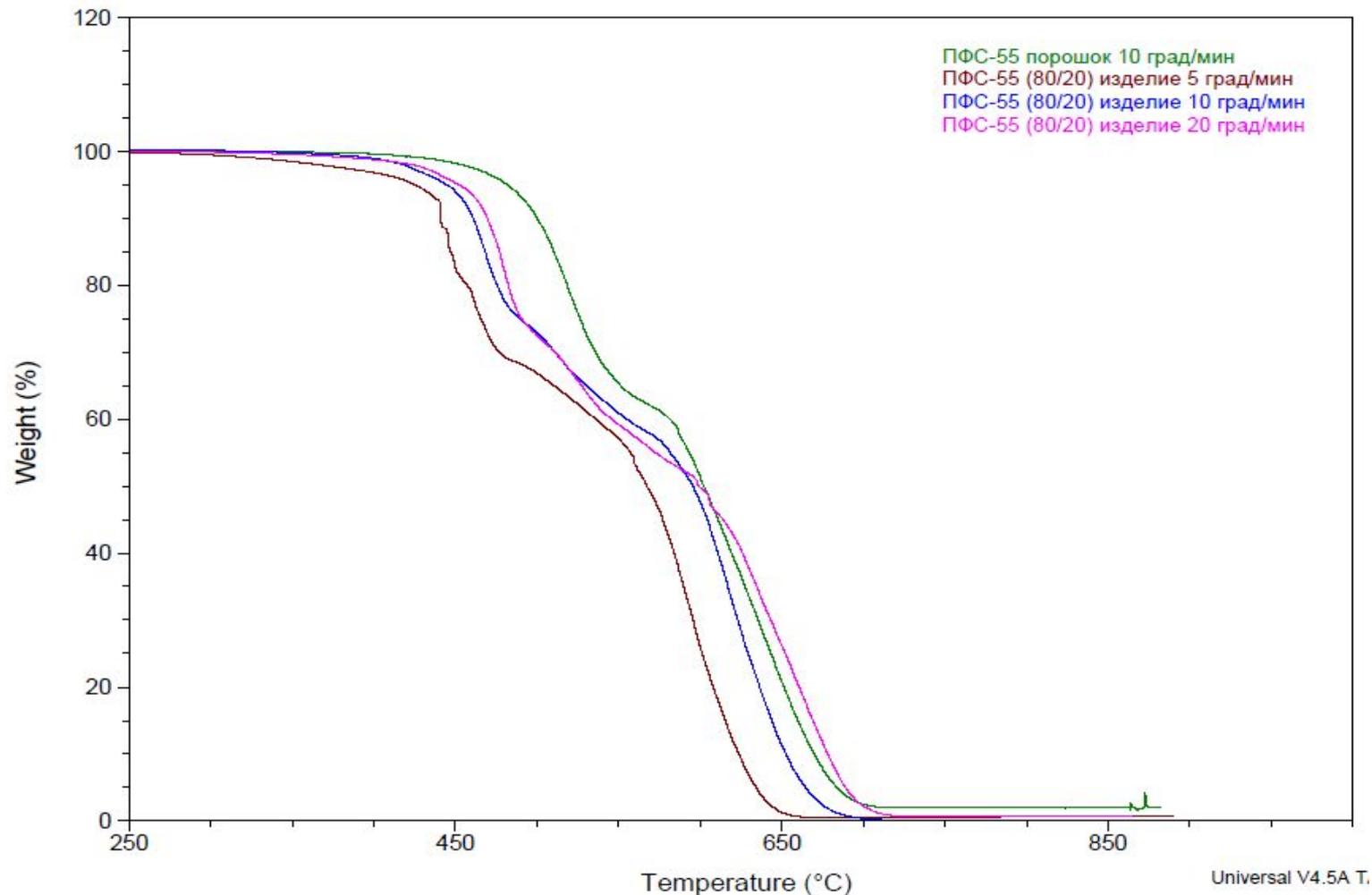


Рис. - Реальная термогравиметрическая кривая разложения оксалата кальция



Типичные кривые динамической ТГА, когда измеряют массу образца при непрерывном нагревании с определенной скоростью.

Разновидностями ТГА являются:

а) изотермическая (или статическая) термогравиметрия (ТГ), когда массу образца измеряют во времени при постоянной температуре;

б) квазистатическая (или ступенчатая), когда образец выдерживают при какой-либо температуре до постоянного значения массы с последующим ступенчатым повышением температуры образца;

в) динамическая, когда измеряют массу образца при непрерывном нагревании с определенной скоростью.

Кривая зависимости изменения массы от температуры называется термогравиметрической кривой или кривой ТГ.

По кривой ТГ можно определить **термостабильность** (термостойкость) полимера.

Термостабильность оценивается температурой начала разложения полимера T_n , при которой начинается потеря массы и кривая ТГ отклоняется от исходного нулевого значения, а также температурами T_{10} , T_{20} , T_{50} , при которых происходит потеря 10, 20 и 50% массы в одних и тех же условиях эксперимента (скорость нагрева, среда и т. д.).

Температура, при которой происходит полное разложение вещества, называется конечной температурой разложения T_k .

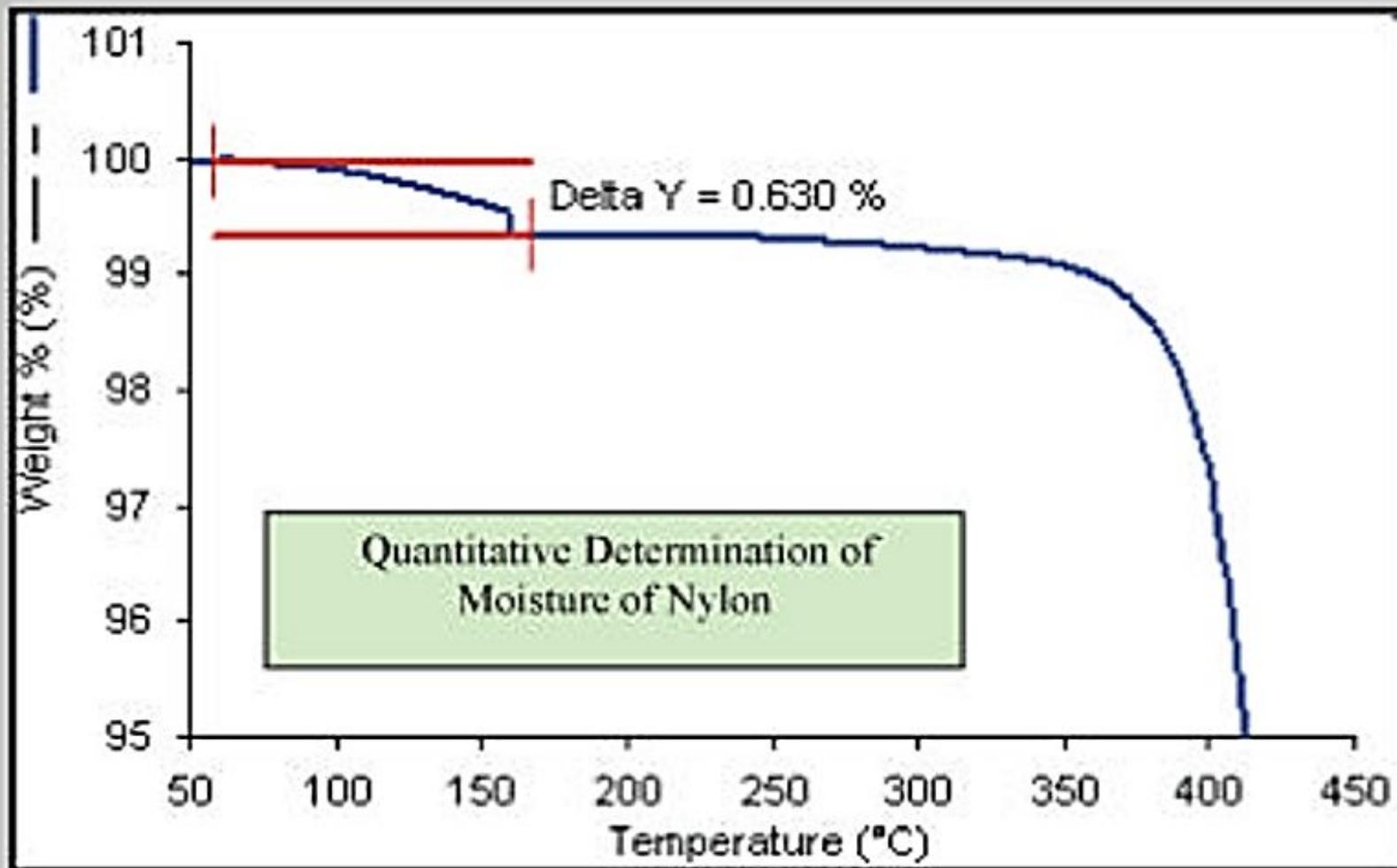
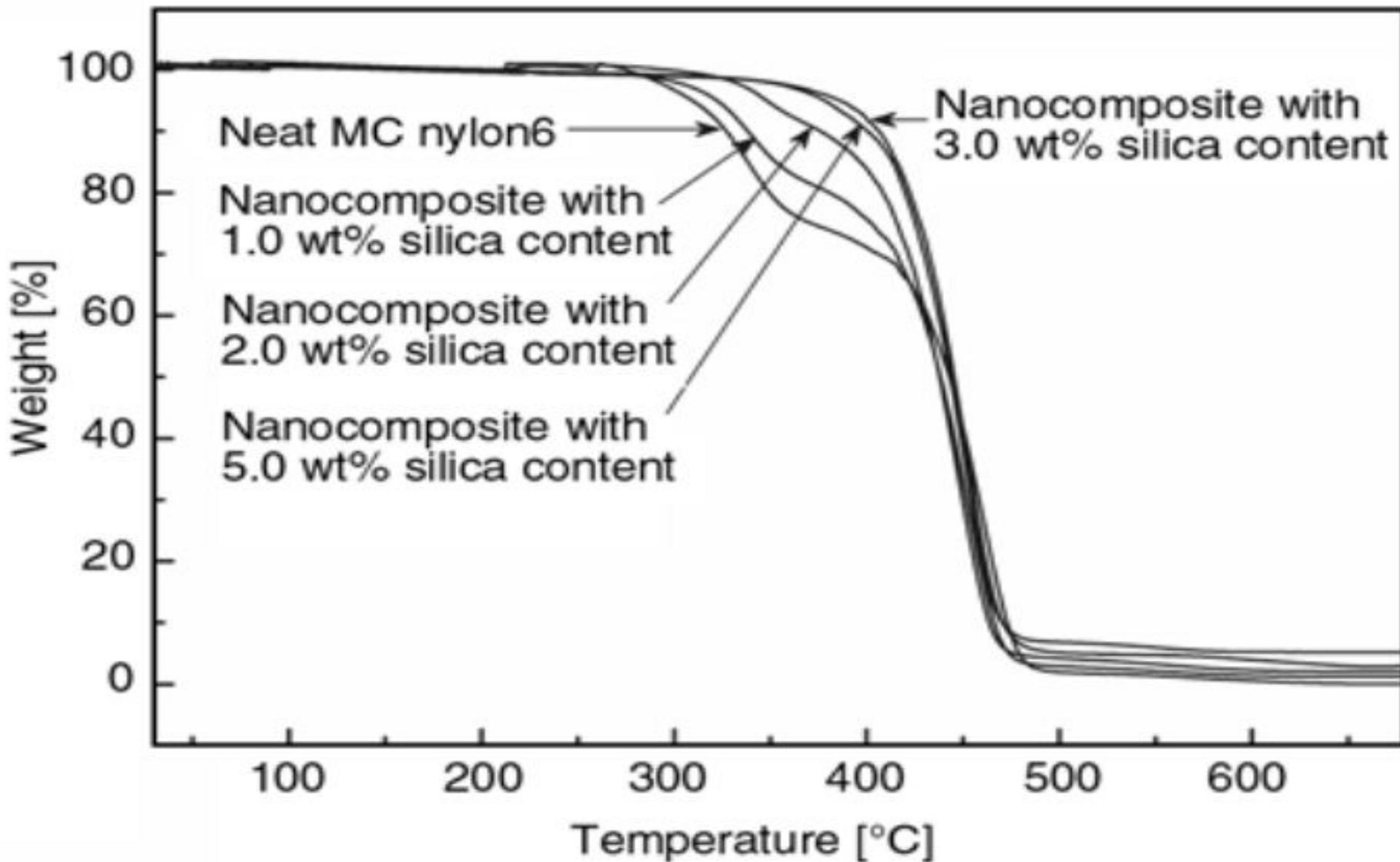
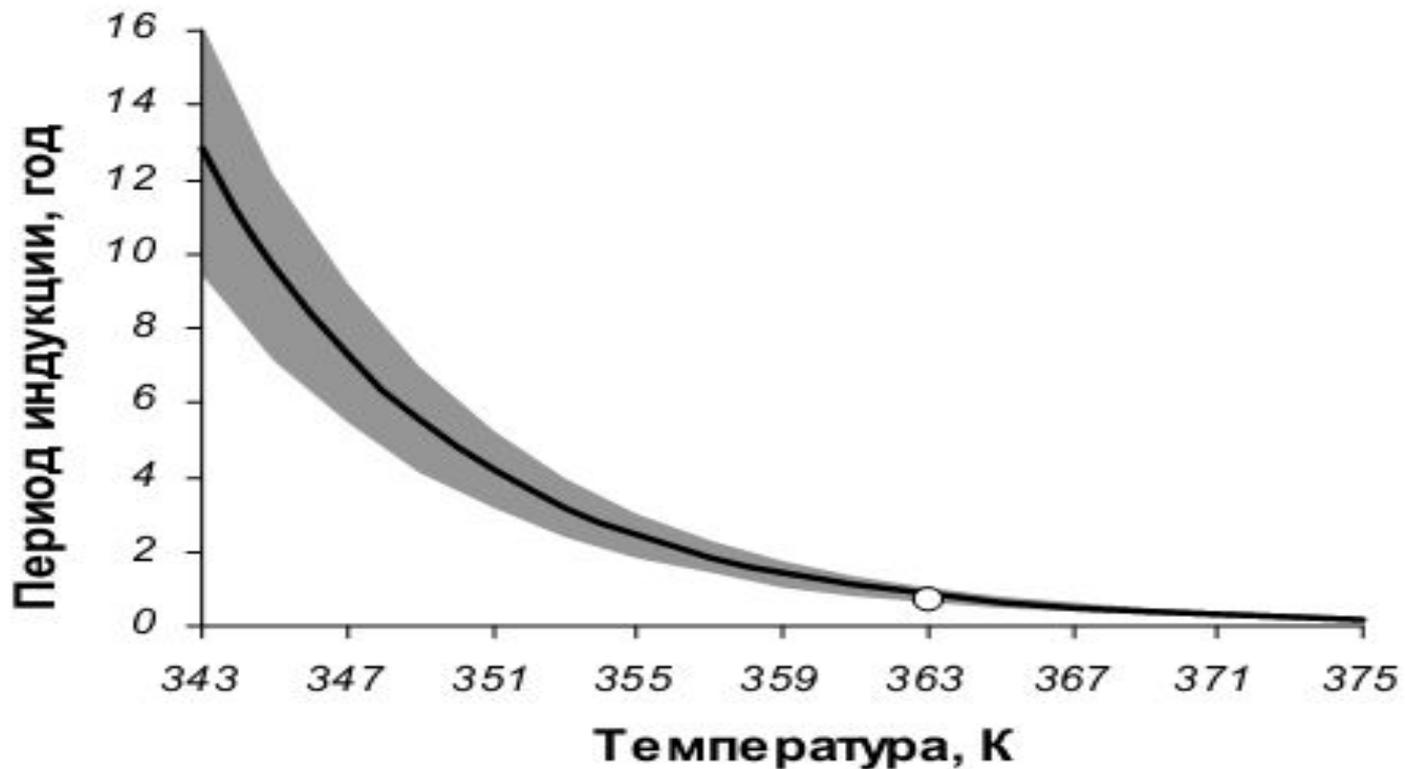


Рис. TGA измерения потери воды из полиамида 6

Термическое поведение нанокompозитов на основе ПА 6 и монтмориллонита



Прогноз периода индукции полиэтилена с АО Naugard 76 для различных температур. Доверительные интервалы с достоверностью 0,85 показаны затемненными областями, а среднее значение черной кривой. Контрольное значение показано белой точкой. Концентрация АО равна 0,025% масс.



ДЕРИВАТИВНАЯ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЯ (ДТГ)

ДТГ регистрирует скорость изменения массы вещества во времени. Кривая ДТГ записывается в виде ряда пиков, положение которых совпадает по температурной шкале со ступенями кривой ТГ.

Дериватография - комплексный метод исследования химических и физико - химических процессов, основанная на сочетании дифференциального термического анализа (ДТА) с физическими или физико-химическими методами, например с термогравиметрией,. Одновременное определение происходящих в веществе с тепловым эффектом превращений и изменений его массы позволяет однозначно установить характер процессов, что невозможно сделать по результатам только ДТА или другого термического метода. Например, когда фазовое превращение, сопровождаемое тепловым эффектом, происходит без изменения массы.

Дериватограмма

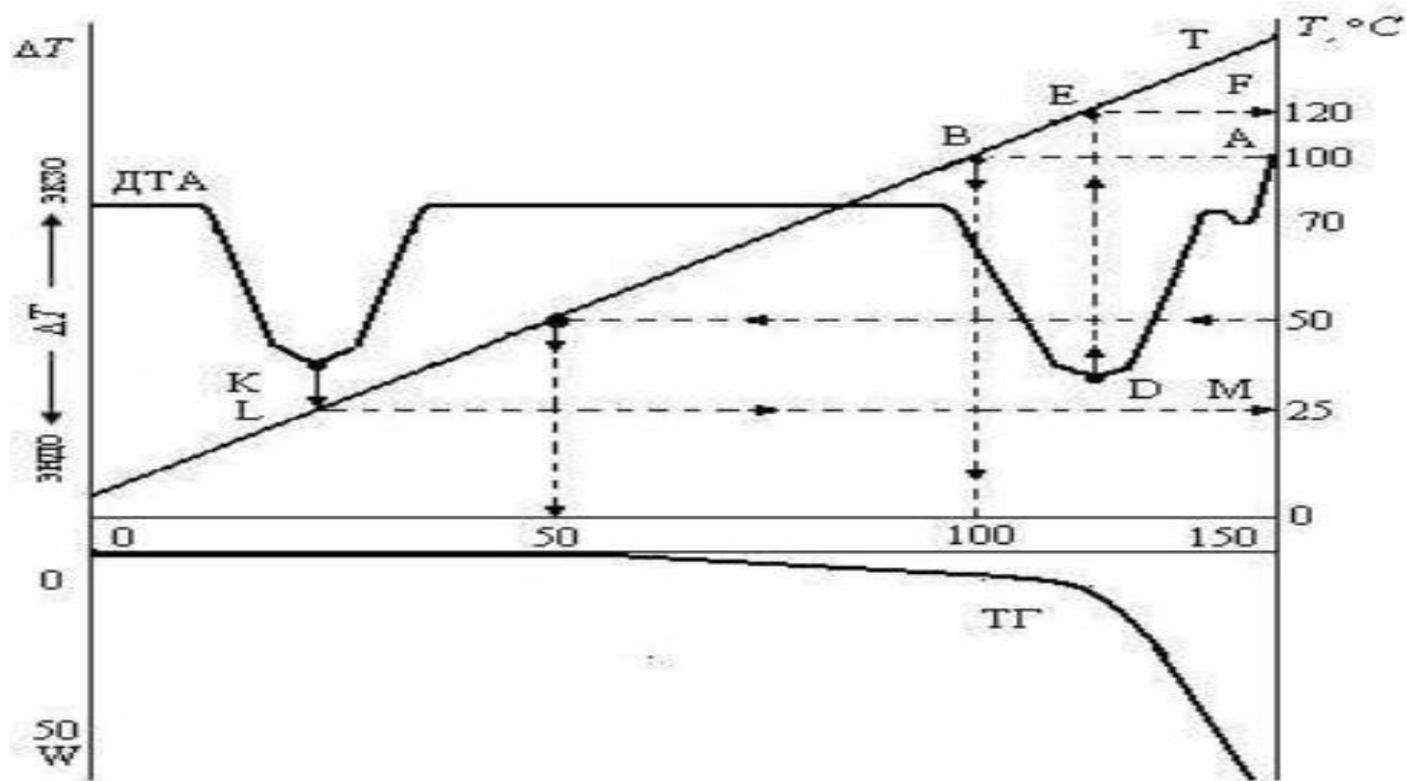


Рис. - Типичные кривые ТГ и ДТА

ДСК и ТГА для полиамидов

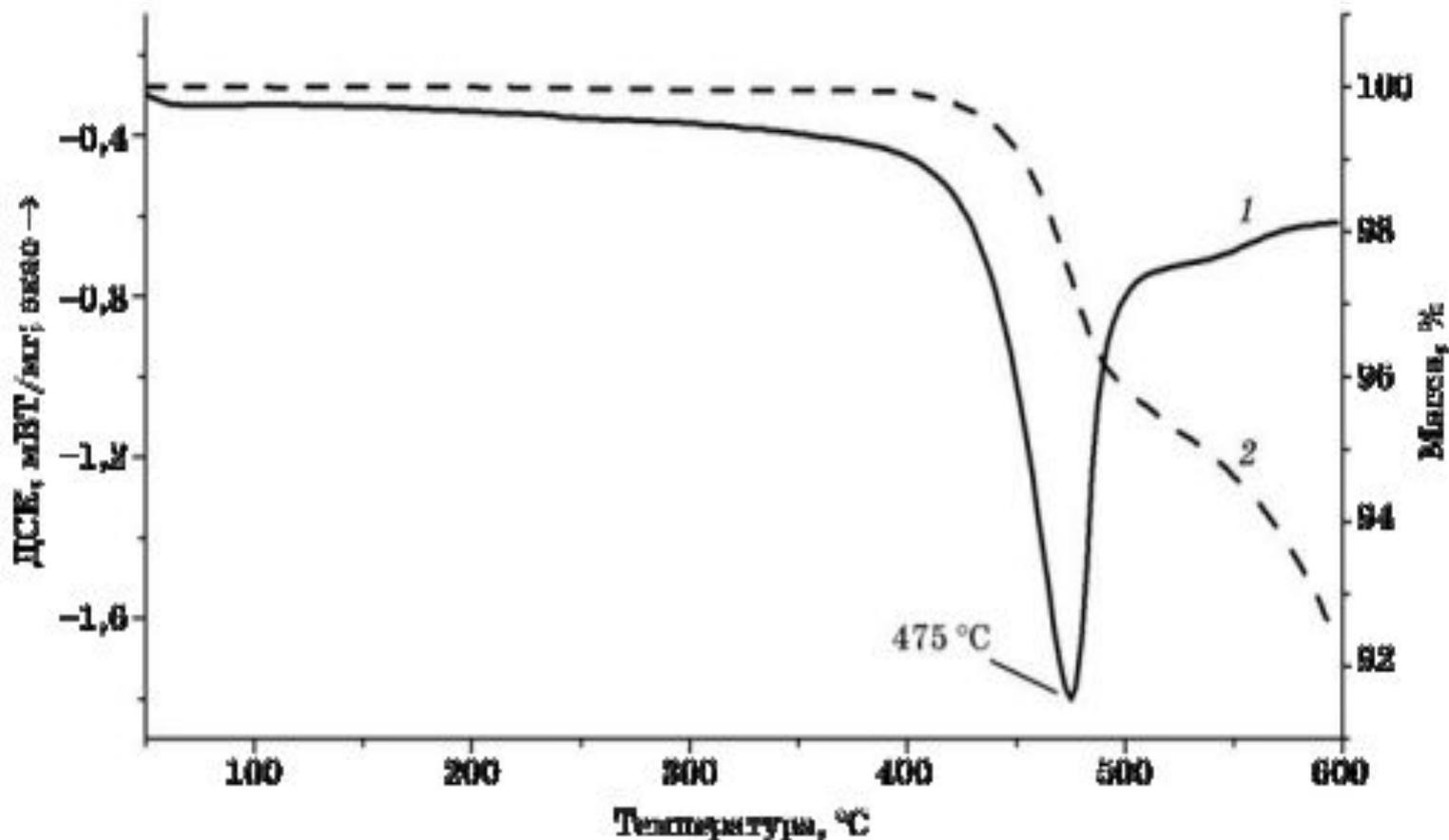


Рисунок 4 – Кривые ДСК (1) и ТГ (2) полиамида-6 с добавкой $\text{CuNH}_4(\text{PO}_3)_4$ (475°C - температура деструкции стабилизированного полиамида).

С помощью кривых ДТГ можно определить температурные пределы реакции и температуру, соответствующую максимальной скорости реакции. Математической обработкой кривых ТГ и ДТГ можно рассчитать кинетические параметры процесса **деструкции** вещества: **энергию активации** E_a и **порядок реакции** n .

Предложено несколько методов расчета, из которых наибольшее применение нашли метод Фримена и Кэрола и метод двойного логарифмирования.

Метод Фримена и Кэрола. Согласно этому методу **для текущей скорости разложения** конденсированного вещества ω_T , соответствующей температуре T , в данный момент времени t справедливо выражение:

$$\omega_T = -dG/dT = (Z/\beta)e^{E_z/RT} G^n \quad (3)$$

где G — масса образца, расходуемого в реакции, мг;

T — температура, К;

Z — предэкспонента в уравнении Аррениуса;

β — скорость нагрева, К/мин;

R — универсальная газовая постоянная, кДж/(моль*К).

Если уравнение (3) применить для двух температур при постоянной скорости нагрева $\beta = \text{const}$, то после логарифмирования и вычитания одного из другого получаются следующие выражения:

$$\Delta \lg \omega_T = n \Delta \lg G - (E_a / 2,303R) \Delta (1/T), \quad (4)$$

или

$$\Delta \lg \omega_T = n \Delta \lg G - (E_a / 2,303R) \Delta (1/T), \quad (5)$$

где $\omega_T = \omega_T \beta$
(6)

Таким образом, из одной кривой ТГ могут быть найдены величины E_a и n .

Для этого необходимо построить зависимости $\lg \omega/T$ от $\lg G$ и $\lg \omega/T$ от $1/T$.

По тангенсу угла наклона первой из них находят порядок реакции n , второй — энергию активации $E_a = 2,303 R \cdot \text{tg } \alpha$.

Метод двойного логарифмирования. При постоянной скорости нагревания с учетом того, что термоокислительная деструкция полимеров протекает, как правило, по реакции первого порядка, справедливо уравнение:

$$\ln[\ln(G_i/G)] = -\frac{E}{RT} + \ln\left[\frac{Z\Delta T}{\beta}\right], \quad (7)$$

где $\Delta T = T - T_i$ - постоянная величина; G_i и G - масса образца при температурах T_i и T . Построив графическую зависимость в координатах $\ln[\ln(G_i/G)] - 1/T$ и определив тангенс угла наклона полученной прямой, по уравнению $E_a = \text{tg}\alpha RT$ можно рассчитать E_a процесса термодеструкции полимера.

Равномерность прогрева печи обеспечивается программным управлением при скорости подъема температуры 0,5 — 20°C/мин;

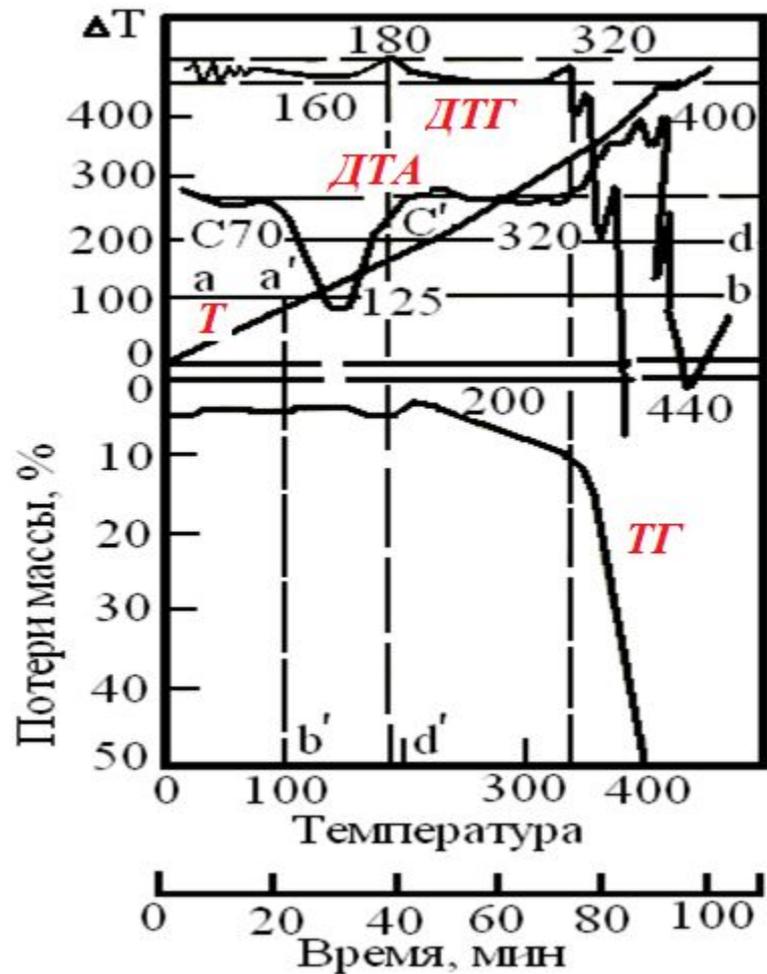
Максимальная температура печи составляет 1200 — 1500 °С.

С помощью дериватографа на одном образце

можно одновременно определять потерю массы (кривая ТГ), скорость изменения массы (кривая ДТГ), тепловые эффекты (кривая ДТА) и изменение температуры (кривая Т).

Типичные кривые, полученные на дериватографе, приведены на рис. 4.

Рис. 4 - Дериватограмма полиэтилена:
ТГ – термогравиметрическая кривая;
ДТГ – кривая дифференциального термогравиметрического анализа;
ДТА – кривая дифференциально-термического анализа;
Т – кривая изменения температуры



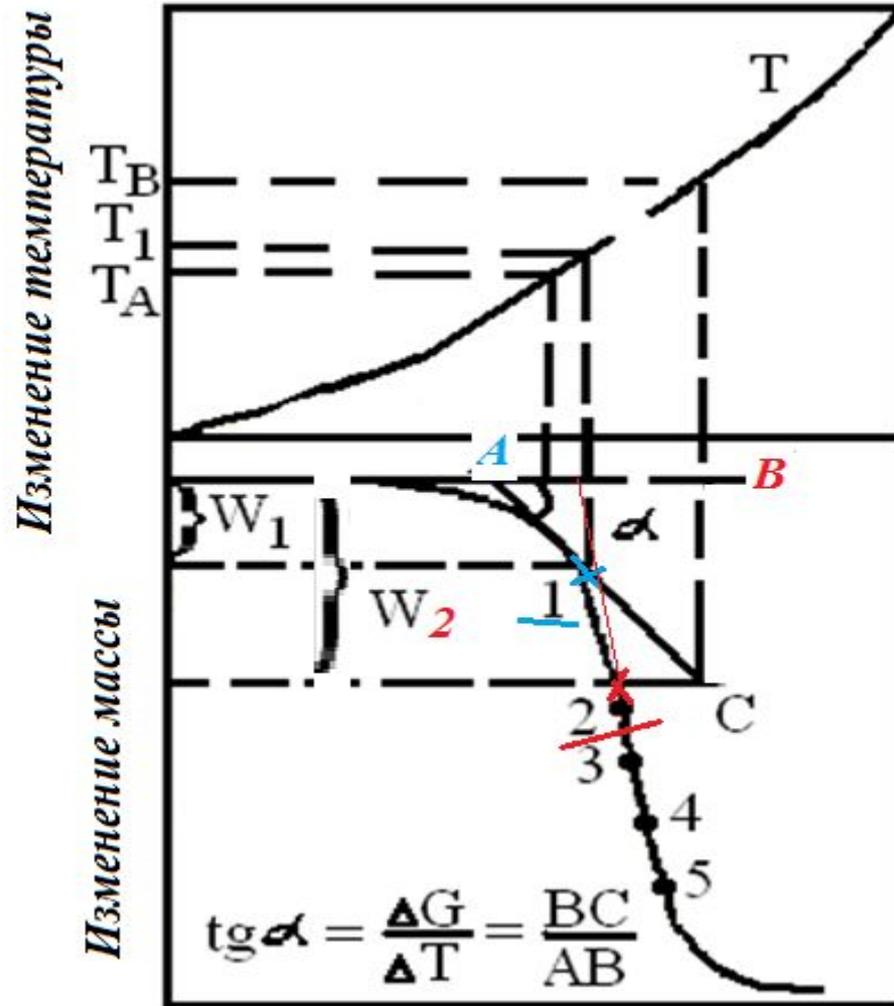


Рис. - Графическое определение скорости разложения полимера

ТГА

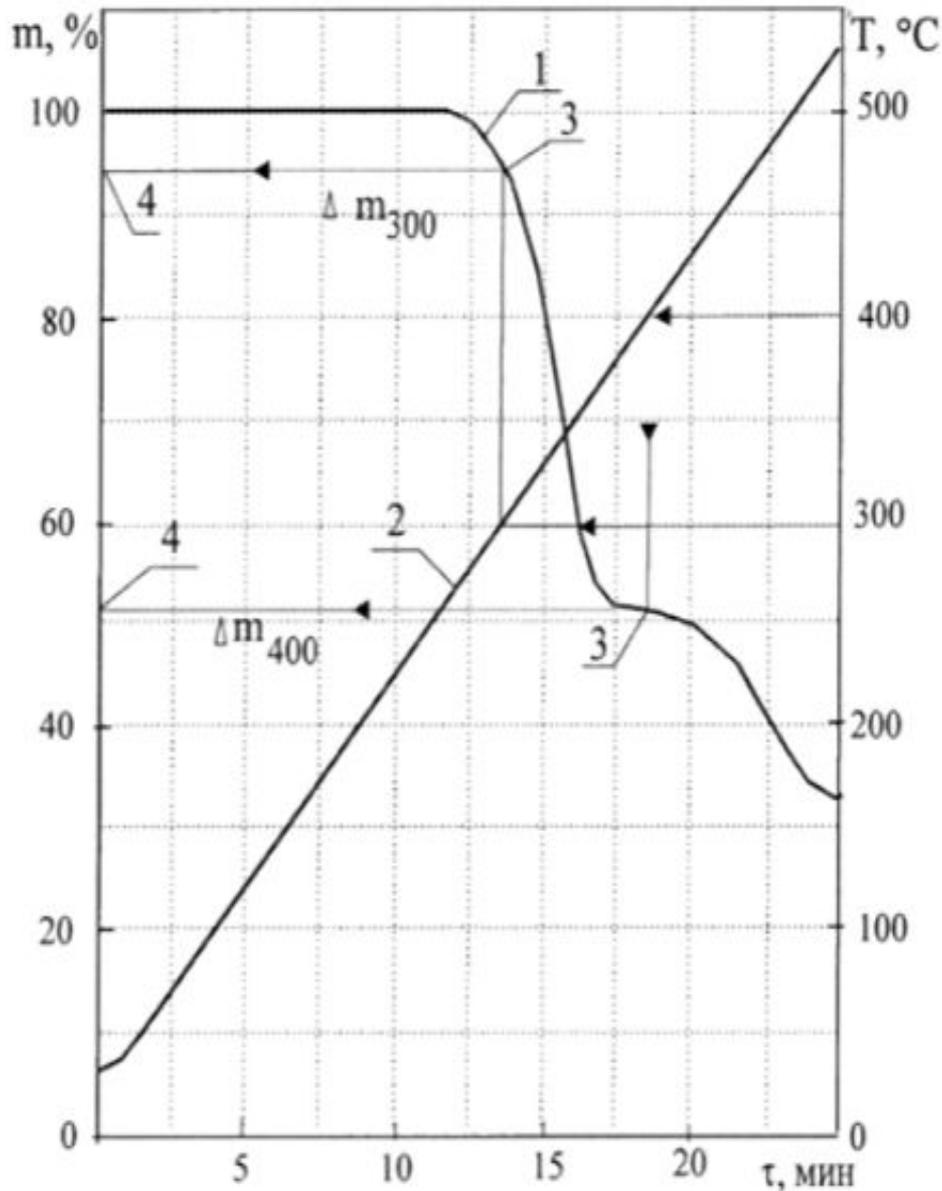


Рис.2- Схема определения характерных значений потерь массы при фиксированных значениях температур, где 1- ТГ- кривая (потеря массы), 2- температура, 3- характерные точки ТГ- кривой, 4- потеря массы при 300 °С и 400 °С.

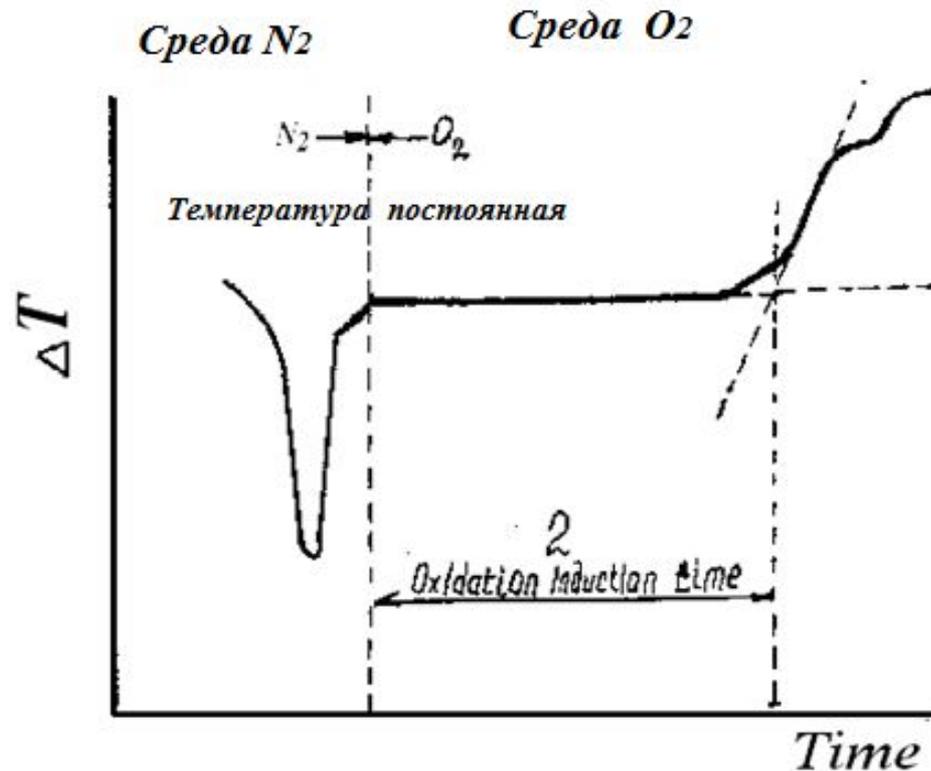
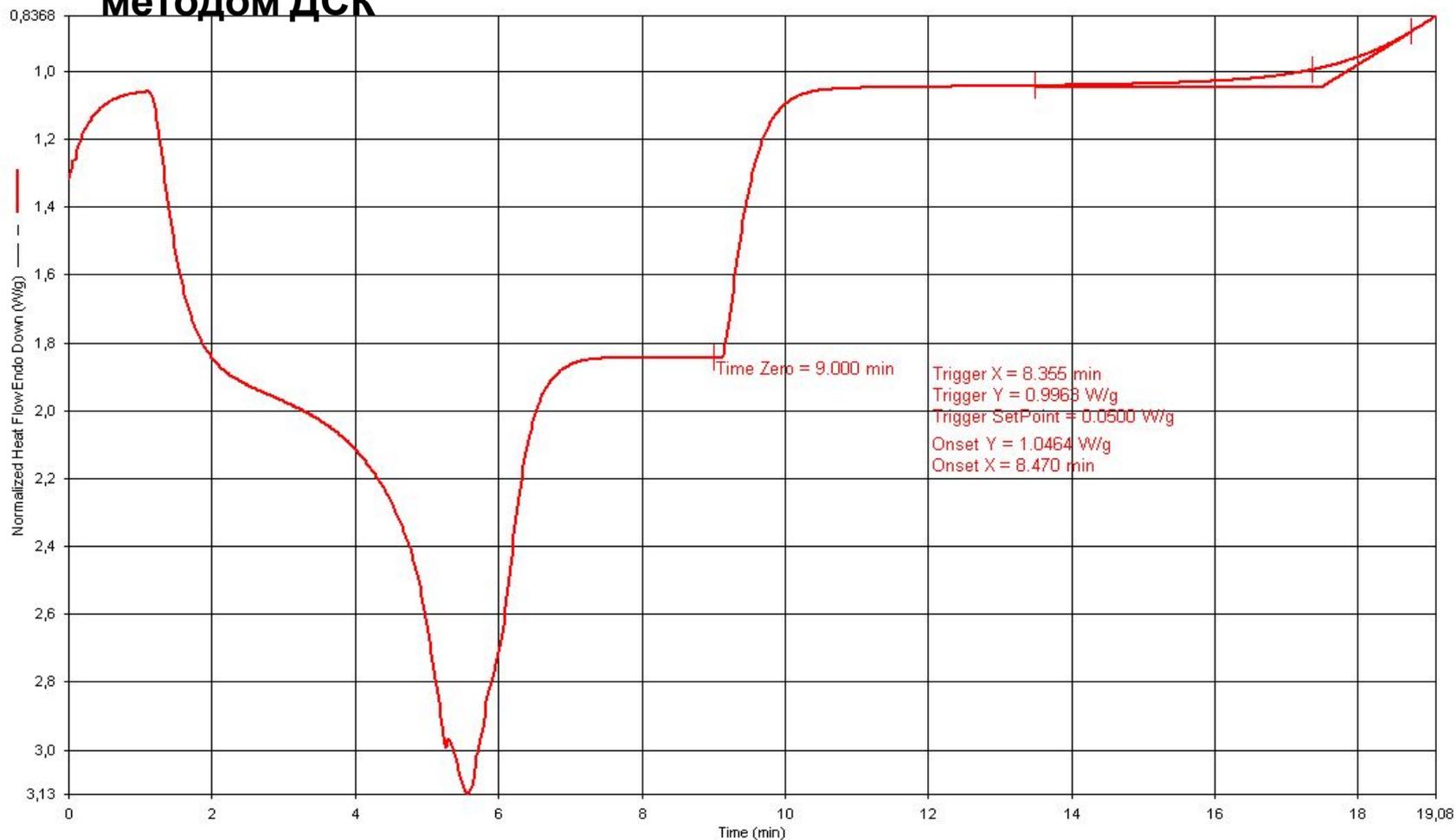


Рис.— Схема определения времени термостабильности методом ДТА (индукционного периода окисления, ИПО)

Определение индукционного периода окисления методом ДСК



Axis: x = 19.696 min y = 2.4074 W/g

NUM

Рис.– Кривая ДСК характерная для метода ИПО (индукционный период окисления при 200 С для ПП)

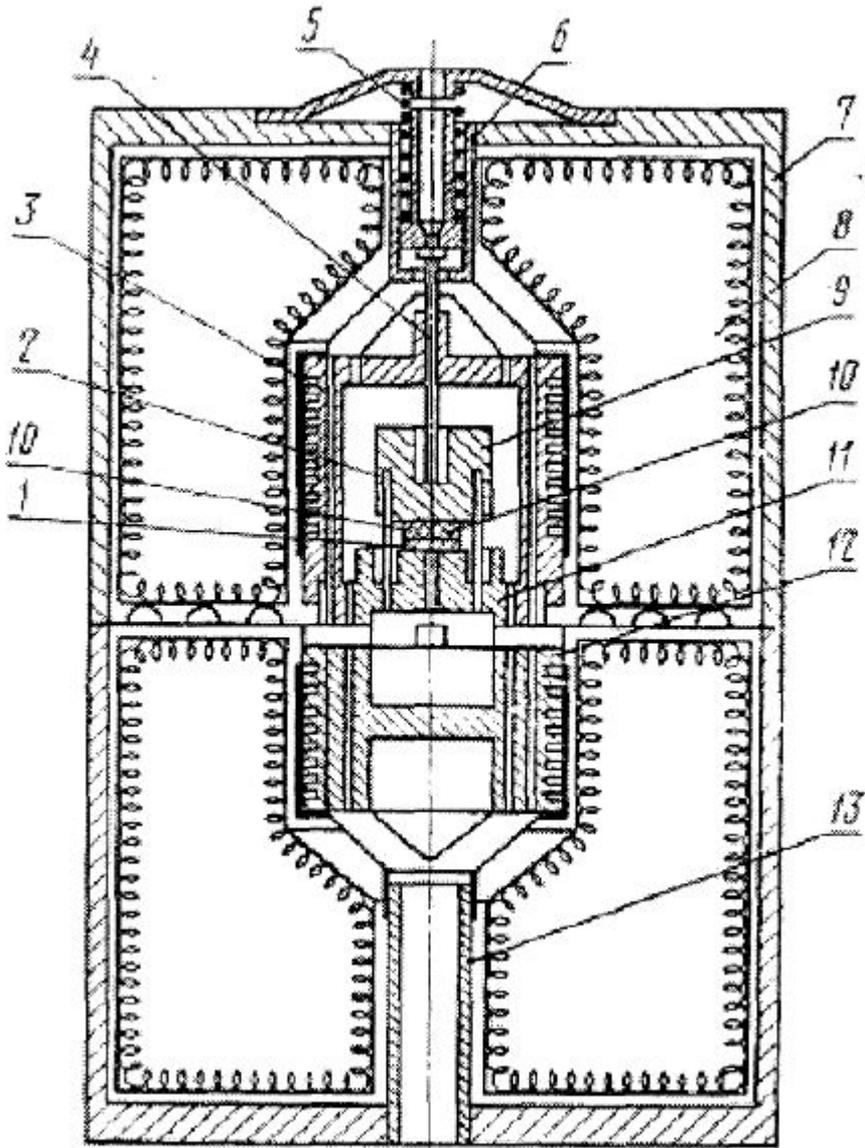
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ (ГОСТ 23630.1–79)

Сущность метода состоит в измерении теплового потока, поглощаемого образцом в процессе монотонного режима нагрева динамического калориметра, характеризуемого временем запаздывания температуры на тепломере с известной эффективной тепловой проводимостью.

Образец материала для испытания должен быть в форме диска диаметром 15 мм, высотой 10 мм с прорезью 0,5 мм в диаметральной плоскости для компенсации температурного расширения. Метод реализован в приборе

ИТ - λ - 400, обеспечивающем измерение теплоемкости с погрешностью не более 10%.

Конструкция измерительной ячейки прибора ИТ-λ-400:



1 – тепломер; 2 – термопара;
3 – адиабатная оболочка; 4 – прижим;
5 – пружина; 6 – входной патрубок;
7 – корпус; 8 – теплозащитная оболочка;
9 – стержень; 10 – **образец**; 11 –
основание; 12 – нагревательный блок;
13 – выходной патрубок

При подготовке к измерению образец взвешивают с погрешностью не более 0,001 г, измеряют высоту и диаметр образца с погрешностью не более 0,01 мм. Контактные поверхности образца, основания и стержня

протирают бензином (спиртом), затем на них наносят слой кремнийорганической жидкости марки ПФМС-4, если в НТД на пластмассу нет иных указаний.

Испытуемый образец устанавливают в прибор на тепломер, затем опускают стержень, прижимая его прижимом и пружинной и закрывают калориметр

Теплопроводность образцов (λ , Вт/(м·К)) для каждой температуры вычисляют по формуле:

$$\lambda = \frac{h}{P_o} (1 - \sigma_\beta),$$

где h – высота образца, м; P_o – тепловое сопротивление образца, м²·К/Вт;
 σ_β – поправка на тепловое расширение образца, которую вычисляют по формуле:

$$\sigma_\beta = \beta \Delta t,$$

где β – справочное значение коэффициента линейного теплового расширения, К⁻¹; Δt – температурный интервал испытания, К.

Тепловое сопротивление образца (P_o) вычисляют по формуле:

$$P_o = \frac{n_o S}{n_T K_T} (1 + \sigma_c) - P_k,$$

где S – площадь поперечного сечения, м²; P_k – поправка, учитывающая тепловое сопротивление контактов и определяемая из градуировки прибора; n_o – перепад температуры на образце, число делений шкалы гальванометра; n_T – перепад температуры на тепломере, число делений шкалы гальванометра; K_T – коэффициент пропорциональности, характеризующий эффективную тепловую проводимость рабочего слоя тепломера, определяемый из градуировки прибора; σ_c – поправка на теплоемкость образца.

Поправку на теплоемкость (σ_c) вычисляют по формуле

$$\sigma_c = \frac{c_o m_o}{2(c_o m_o + c_c m_c)},$$

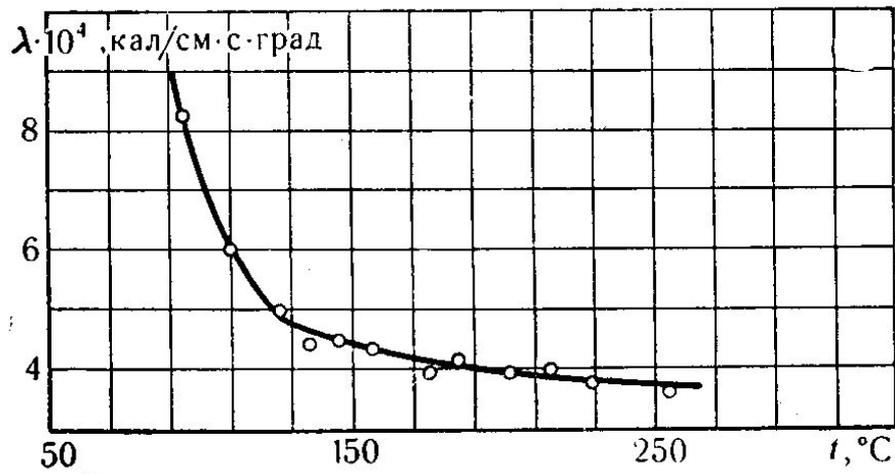
где c_o – удельная теплоемкость образца, Дж/(кг·К); c_c – удельная теплоемкость стержня, Дж/(кг·К); m_o – масса образца, кг; m_c – масса стержня, кг.

Температуру (\bar{t}) в градусах Цельсия, к которой относят измеренное значение теплопроводности, вычисляют по формуле

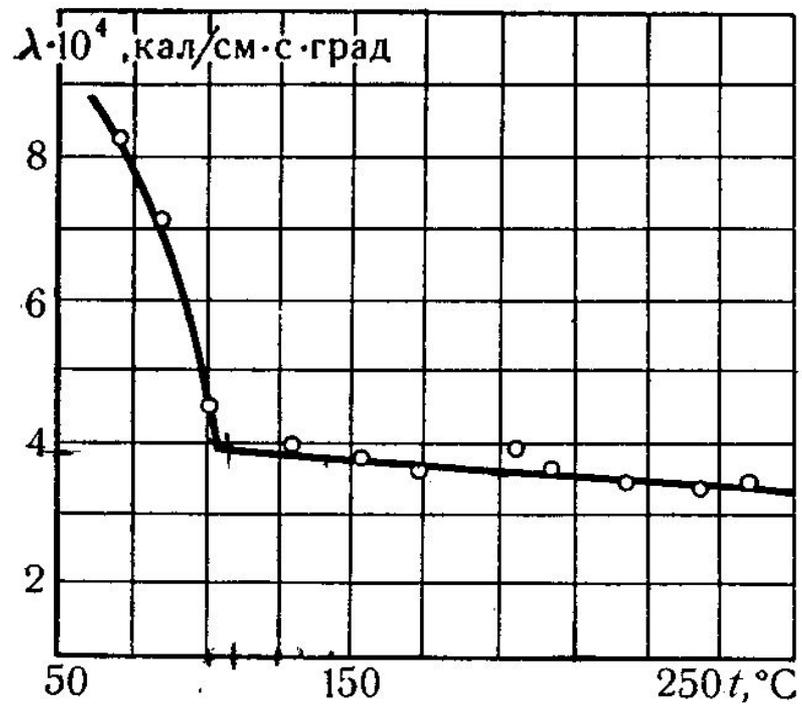
$$\bar{t} = t_c + 0,5 A_t K_u n_0,$$

где t_c – температура стержня, К; A_t – температурный коэффициент термомпары, К/мВ; K_u – чувствительность гальванометра, мВ/делений; n_0 – показания гальванометра (деления шкалы).

За результат испытания принимают среднее арифметическое значение теплопроводности не менее чем трех образцов, допускаемое расхождение между которыми должно быть указано в нормативно-технической документации на пластмассу.



ПЭВД (ПЭНП)



Зависимость коэффициента
теплопроводности от температуры

ПЭНД (ПЭВП)

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЖИДКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ОТ СКОРОСТИ СДВИГА И ТЕМПЕРАТУРЫ**

Процессы производства изделий из полимерных материалов (например, экструзия) протекают, как правило, когда материал находится в жидкой фазе, и сопровождаются неизотермическим сдвиговым течением жидкости по каналам различной формы

Следует сказать, что жидкие полимерные материалы в большинстве своем относятся к классу неньютоновских жидкостей.

Эффективная вязкость расплавов полимеров довольно высока. Это приводит к тому, что в процессе сдвигового течения выделяется тепло за счет диссипации механической энергии вязкого трения. Мощность тепловыделений бывает столь высокой, что приводит к значительному повышению температуры в потоке и вызывает необратимые структурные изменения. По данным в [8], до 80...85% затрат энергии на перемещение полимера в пластикационном цилиндре с помощью шнека превращается в тепло и вызывает приращение температуры рабочей среды на 100...150 °С. Температурное приращение, в свою очередь, зависит от теплофизических характеристик полимерного материала.

Для расчета рациональных режимных параметров, обеспечивающих выполнение заданных ограничений на распределение температурного поля в сдвиговом потоке, применяют методы математического моделирования. При этом в математические модели входят теплофизические и реологические свойства материалов в качестве параметров. Известные на сегодняшний день подобные математические модели учитывают в лучшем случае зависимость этих параметров от температуры. Однако теплофизические характеристики полимерного материала в процессе переработки зависят еще и от других физических величин.

Известно, что реологические характеристики, например, эффективная вязкость жидкого полимерного материала, существенно зависят от скорости сдвига.

В ориентированных аморфных и кристаллических полимерах, и в процессе деформации каучуков появляется анизотропия теплопроводности. При этом степень анизотропии сильно зависит от степени ориентации. Теплопроводность в направлении деформации оказывается во всех случаях выше, чем теплопроводность в изотропном состоянии, а также в направлении, перпендикулярном ориентации.

При сдвиговом течении неньютоновской полимерной жидкости возникает также анизотропия ее теплофизических свойств, вследствие ориентирования макромолекул полимерного материала вдоль направления сдвига.

Таким образом, для выбора рациональных режимов процессов изготовления изделий из полимерных материалов необходимо учитывать зависимость их теплофизических характеристик и от температуры, и от скорости сдвига.

В настоящее время методы экспериментального определения теплофизических характеристик жидкостей при сдвиговом течении активно разрабатываются и развиваются как в России, так и за ее пределами.

Все известные в настоящее время методы можно разделить на следующие группы:

1. Методы, заключающиеся в измерении теплофизических характеристик жидкостей при их ламинарном течении в трубках и капиллярах

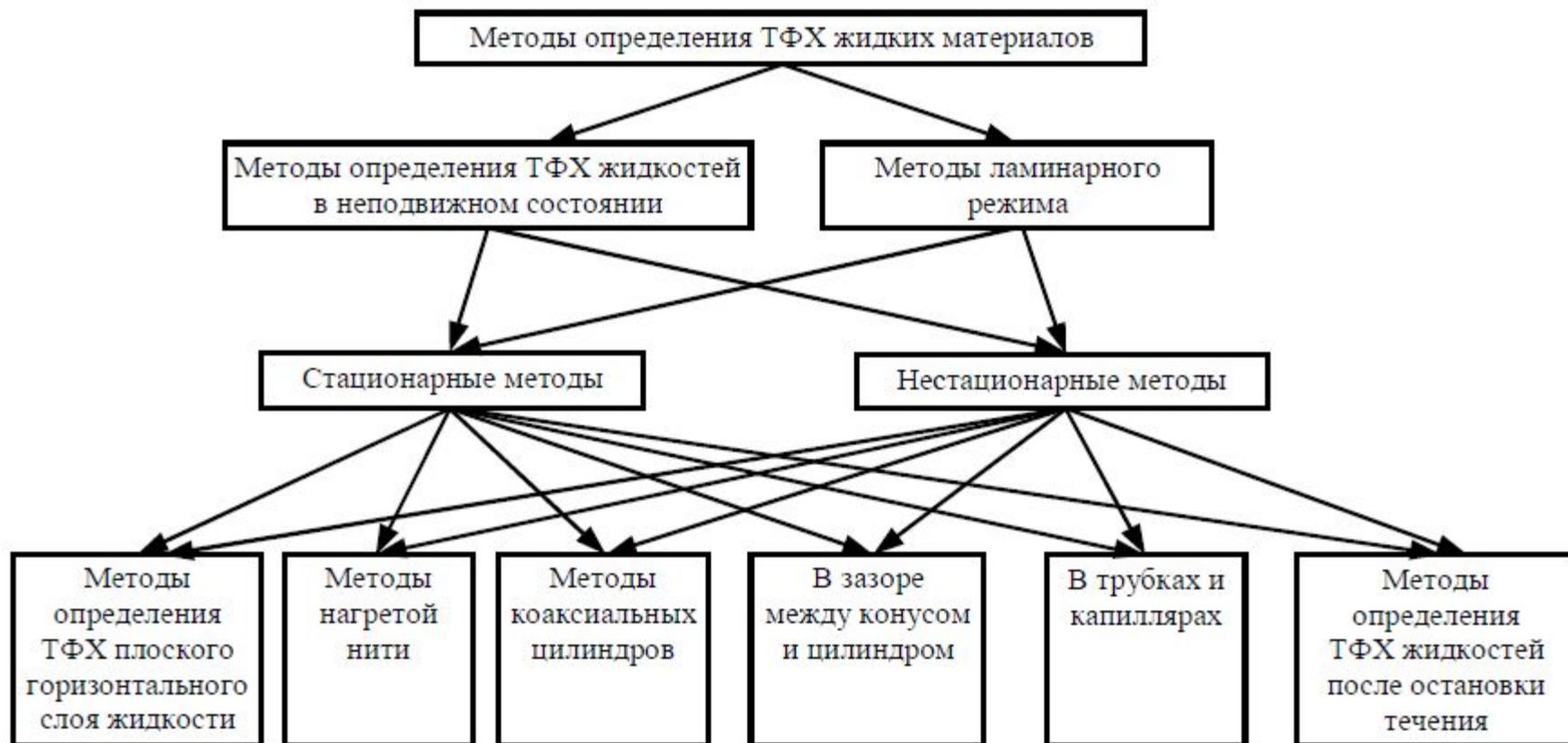
2. Методы, основанные на измерении теплофизических характеристик жидкостей (обладающих значительными временами релаксации) сразу после остановки их течения.

3. Методы, заключающиеся в определении теплофизических характеристик жидкостей при сдвиговом течении в зазоре между коаксиальными цилиндрами.

4. Методы, основанные на измерении теплофизических характеристик при сдвиговом течении в зазоре между пластиной и конусом.

Все указанные методы могут быть как стационарными, так и нестационарными.

Классификация методов измерения компонентов тензоров теплофизических характеристик растворов и расплавов полимерных материалов при сдвиговом течении



В связи с тем, что профиль скорости $v(r)$ ньютоновской и большинства неньютоновских жидкостей по сечению трубы имеет параболическую форму и зависит от наличия местных гидравлических сопротивлений, а также длины прямолинейных участков, речь может идти только о средней скорости сдвига в потоке, определяемой как отношение средней скорости течения $\bar{v} = g / (\pi R^2)$ к радиусу R капилляра или трубы, где g – расход жидкости

В приборах, работа которых основана на стационарных методах, распределение температуры в образце не зависит от времени. Теплопроводность вычисляется по формуле :

$$\lambda = \frac{Q}{T_1 - T_2} K_{\phi}, \quad (1.1)$$

где Q – количество тепла, проходящего в единицу времени от изотермической поверхности с температурой T_1 к изотермической поверхности с температурой T_2 ; K_{ϕ} – коэффициент формы образца.

В том случае, когда все величины, входящие в формулу (1.1), определяются на основании измерений, методы называются абсолютными. Если для определения теплопроводности применяют эталонный материал с известными теплофизическими характеристиками, то такие методы называются относительными.

Стационарные методы определения теплофизических характеристик:

Метод плоского горизонтального слоя

Метод коаксиальных цилиндров

Метод нагретой проволоки

Метод плоского горизонтального слоя

На наружных поверхностях однородной плоской стенки толщиной δ поддерживаются постоянные температуры T_1 и T_2 , причем $T_1 > T_2$ при неизменном значении теплового потока Q . Измерив эти значения, теплопроводность λ вычисляется по формуле (1.1). Если в установившемся режиме тепловой поток будет проходить последовательно через два плоских слоя различных веществ, он создаст в них градиенты температур, обратно пропорциональные теплопроводностям. Исследуемая теплопроводность λ_x найдется как

$$\lambda_x = \lambda_{\text{э}} \frac{\delta_x (t_1^{\text{э}} - t_2^{\text{э}})}{\delta_{\text{э}} (t_1^x - t_2^x)}, \quad (1.2)$$

где λ_x и $\lambda_{\text{э}}$ – соответственно теплопроводность анализируемого и эталонного вещества; δ_x и $\delta_{\text{э}}$ – толщина слоя анализируемого и эталонного веществ; $t_1^x - t_2^x$ – перепад температур в слое исследуемого вещества; $t_1^{\text{э}} - t_2^{\text{э}}$ – перепад температур в слое эталонного вещества.

При использовании формулы (1.2) величину теплового потока измерять не нужно, необходимо измерить только перепады температур в слое анализируемого и эталонного веществ. (относительный метод)

Метод коаксиальных цилиндров

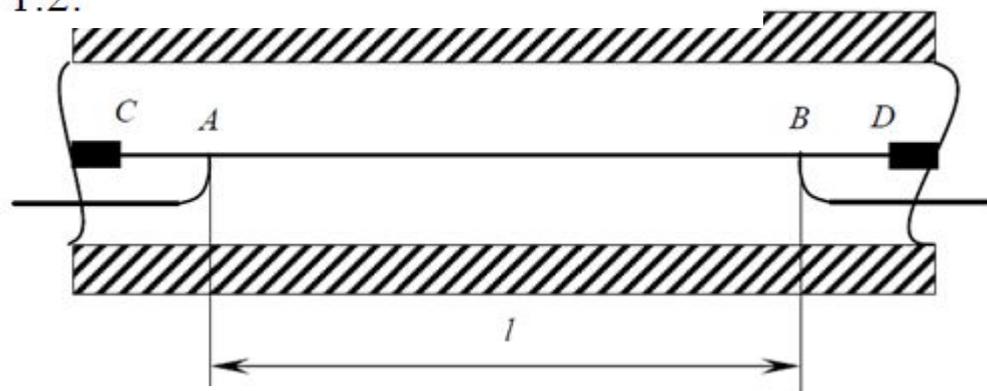
Рассматривая перенос тепла через жидкость или газ, помещенные в зазор между двумя коаксиальными цилиндрами, получают формулу для определения теплопроводности [43]:

$$\lambda = \frac{Q \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l (t_1 - t_2)}, \quad (1.3)$$

где d_1 и d_2 – наружный диаметр внутреннего цилиндра и внутренний диаметр наружного цилиндра соответственно; l – длина цилиндров; t_1 и t_2 – температура внутреннего и наружного цилиндров, причем $t_1 > t_2$. Эта формула справедлива при изотермических условиях вдоль измерительных цилиндров, т.е. когда их длина достаточно велика.

Метод нагретой проволоки

Если вместо внутреннего цилиндра в методе коаксиальных цилиндров поместить проволоку небольшого диаметра, порядка 0,1 мм, используя ее в качестве нагревателя и термопреобразователя сопротивления, уменьшив при этом размеры внешнего цилиндра с целью исключения конвективного теплообмена, то получаем метод нагретой проволоки. Схема измерительного устройства, реализующего данный метод, представлена на рис. 1.2.



Внутренний цилиндр *CD* представляет собой тонкую платиновую проволоку. Она должна быть помещена строго по оси наружного цилиндра, которым является либо стеклянная, либо кварцевая трубка, либо медный блок с высверленным в нем каналом, по оси которого натягивается указанная проволока. Длина измерительного участка *l* фиксируется припаянными в точках *A* и *B* отпайками из тонкой платиновой проволоки. На поверхности трубки для измерения ее температуры наматывается термопреобразователь сопротивления. Перепад температур в стенке определяется расчетным путем.

Исследуемые жидкость

или газ заполняют промежуток между платиновой проволокой и цилиндром трубки. Смонтированная измерительная трубка помещается в термостат. Тепло от нагреваемой электрическим током проволоки радиально проходит через слой исследуемого вещества. После достижения теплового равновесия измеряются: сила тока и падение напряжения на платиновой проволоке для вычисления количества тепла, проходящего через слой анализируемого вещества; температура платиновой проволоки t_1 и температура на поверхности трубки, пользуясь которой, вычисляется t_2 – температура исследуемого вещества у внутренней поверхности трубки. Теплопроводность λ вычисляется по формуле:

$$\lambda = A \frac{Q}{t_1 - t_2},$$

где $A = \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l}$ – постоянная установки; d_1 и d_2 – диаметр платиновой проволоки и внутренний диаметр цилиндра соответственно; l – длина измерительного участка.

Нестационарные методы определения теплофизических свойств жидкостей

Нестационарные методы характеризуются изменением температурного поля исследуемого тела во времени. Нестационарность тепловых процессов обуславливается изменением энтальпии тела и связана либо с явлениями прогрева, либо охлаждения. При нестационарном режиме количество передаваемого тепла непостоянно во времени.

Нестационарные методы обычно основаны на математическом моделировании процесса переноса теплоты в одномерных образцах дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{1}{r^\gamma} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^\gamma \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right], \quad \tau > 0, \quad R_1 < r < R_2, \quad a - \text{const},$$

где τ – время; $T(r, \tau)$ – функция распределения температуры; a – коэффициент температуропроводности; r – координата; γ – коэффициент формы образца ($\gamma = 0, 1, 2$ соответственно для плоской, цилиндрической и сферической систем координат). Дополняя дифференциальное уравнение теплопроводности начальными и граничными условиями, получают краевую задачу теплопроводности.

Решения задачи — значения теплофизических характеристик коэффициентов температуропроводности $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ или тепловой активности $b = \sqrt{\lambda c\rho}$, где c — удельная теплоемкость; ρ — плотность материала образца.

Преимущества нестационарных методов: более быстрое определение всего комплекса теплофизических характеристик (a , λ , $c\rho$, b); часто позволяют избежать измерения тепловых потоков, проходящих через образец; требования к тепловой защите не такие строгие, как в традиционных стационарных методах. Однако к недостаткам таких методов можно отнести сложность расчетных формул, что приводит к необходимости применения численных методов для расчетов значений ТФХ, и связанную с этим сравнительно невысокую точность определения теплофизических характеристик.

Способ определения температуропроводности жидкости описан в авторском свидетельстве № 1495697. Используется сравнительный способ измерений. Исследуемая жидкость и жидкость сравнения с равными исходными температурами пропускаются с постоянными и равными расходами через теплообменные каналы. Температура стенок теплообменных каналов задается равной для обеих жидкостей. Выбирают сечение жидкости с равными избыточными температурами. Их удаления от начала теплообменных участков обратно пропорциональны температуропроводности жидкостей. Расчетная формула имеет вид

$$a = a_э \frac{l_э}{l_x},$$

где a – температуропроводность исследуемой жидкости; $a_э$ – температуропроводность жидкости сравнения; $l_э$ – расстояние от начала участка теплообмена до сечения, в котором контролируется температура жидкости сравнения; l_x – расстояние от начала участка теплообмена до сечения, в котором контролируется температура исследуемой жидкости.

К недостаткам данного метода следует отнести узкий диапазон температур (300...330 К), в котором проводятся измерения

Устройства второго типа используются для измерения коэффициента температуропроводности a , теплопроводности λ , объемной теплоемкости c_p и комплексного параметра $\mu \cdot a$ при ламинарном течении жидкости в трубе, стенку которой обогревают равномерно распределенным источником тепловой энергии (источником равномерно распределенного теплового потока)

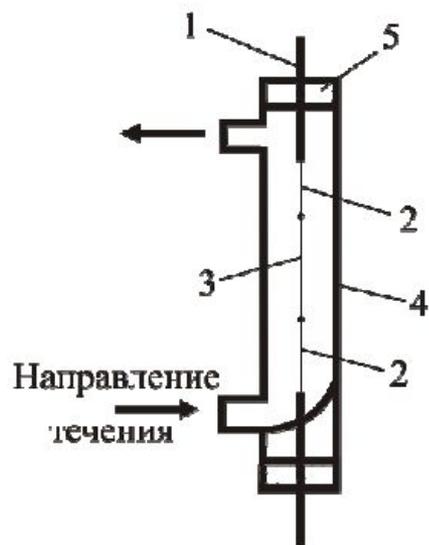


Рис. 1.3. Измерительное устройство для определения теплопроводности жидкости при течении в трубке

Измерительное устройство состояло из стеклянной трубки 4 (рис. 1.3), в которую через изоляторы 5 в направлении, совпадающем с осью трубки, вставлен тонкий проволочный нагреватель, состоящий из трех последовательно включенных участков 2 и 3. Участки 2 представляют собой проволочки из константана и выполняли функции охранных нагревателей, а участок 3 выполнен из никелевой проволоки радиусом r_1 и является одновременно и нагревателем и термопреобразователем сопротивления.

С помощью выводов 1 нагреватель включен в мостовую измерительную схему.

Метод измерения основан на зависимости температуры нагреваемой током проволочки из никеля 3 от

Температурное поле в трубке описывается следующими дифференциальными уравнениями]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + A, \quad 0 \leq r \leq r_1,$$

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \lambda \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \mu \left[\frac{\partial v_z}{\partial r} \right]^2, \quad r_1 \leq r \leq \infty,$$

где ρ , c_p – плотность и удельная теплоемкость жидкости; λ – ее теплопроводность; r – радиальная координата; T – температура; μ – динамическая вязкость жидкости; v_z – скорость потока жидкости в направлении оси трубки; A – объемная плотность тепловыделений в нагревателе.

Для исследования тепловых эффектов при сдвиговом течении анизотропных растворов полимеров в зазоре между коаксиальными цилиндрами предложен прибор, схема которого показана на рис.1.4.

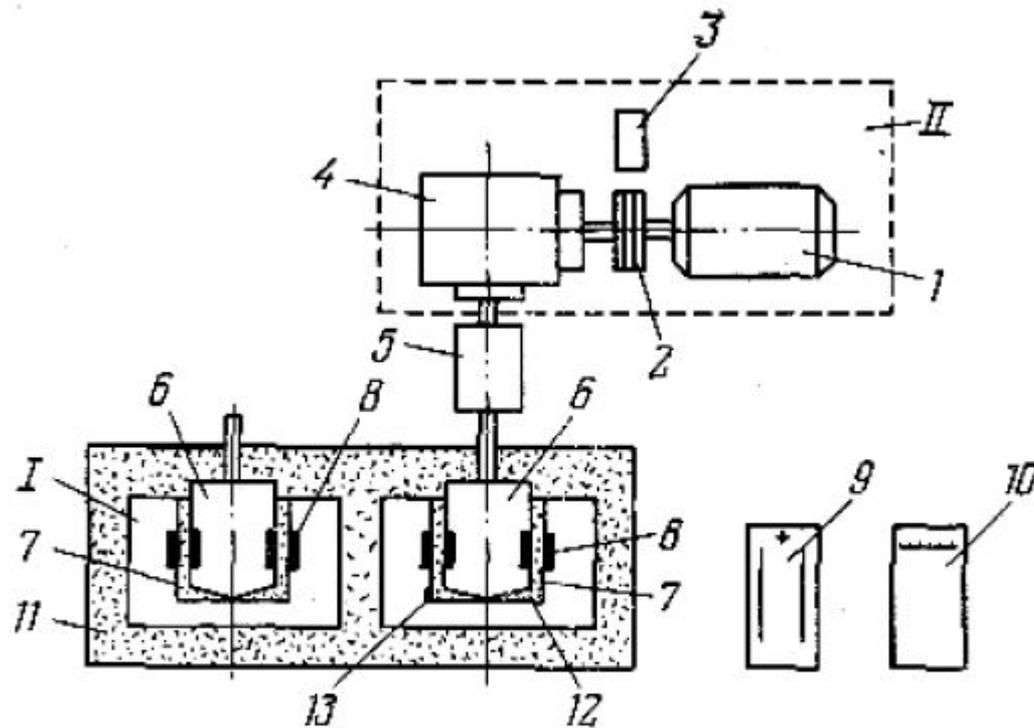


Рис. 1.4. Схема измерительной установки [70] для определения тепловых эффектов при сдвиговом течении

Прибор представляет собой комбинацию ротационного вискозиметра куэттовского типа (с рабочим узлом «цилиндр – цилиндр») и дифференциального калориметра, куда помещен рабочий узел вискозиметра. По конструктивному исполнению прибор состоит из измерительного блока I и привода II для задания требуемой скорости деформирования. Измерительный узел содержит два одинаковых блока, в которые помещены коаксиальные медные цилиндры 6, 7. Диаметр внутреннего цилиндра 39 мм, зазор между цилиндрами 0,5 мм.

На наружных поверхностях неподвижных цилиндров 7 и на внутренних вращающихся установлены датчики теплового потока 8.

Для контроля температуры в измерительный блок I помещена термопара 13.

Привод состоит из электродвигателя постоянного тока 1, электромагнитной муфты 2, коробки передач 4 и тормозного устройства 3.

Диапазон реализуемых скоростей сдвига от 4 до 100 с⁻¹. Для проведения исследований при повышенных температурах измерительный узел I помещен в термостат 11. Исследуемое вещество 12 загружается в зазоры между обоими цилиндрами 6 и 7 в одинаковых количествах.

Сигнал от датчиков теплового потока 8, возникающий при задании деформации или после прекращения течения, через токосъемник 5 подается на усилитель постоянного тока 9 и регистрируется самопишущим потенциометром 10.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРОВ

**КРИВЫЕ ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ И ОПИСЫВАЮЩИЕ
ИХ УРАВНЕНИЯ**

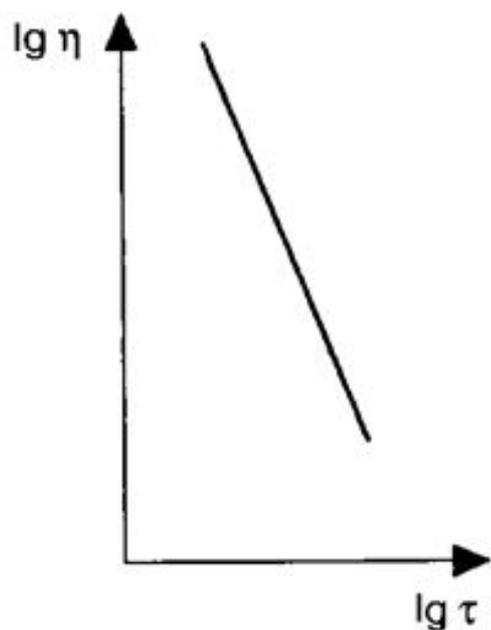
**ЭМПИРИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ ОСТВАЛЬДА –ДЕ ВИЛЛА,
КАРРО, ЭЛЛИСА И БИНГАМА**

Особенностью течения обычных полимерных расплавов с достаточно широким молекулярно-массовым распределением является аномалия вязкости, т. е. ее снижение при увеличении скорости и напряжения сдвига. Для относительно простого описания этой зависимости применяют ряд эмпирических зависимостей, содержащих два или три экспериментально определяющихся параметра. Одно из наиболее простых выражений — так называемый степенной закон или двухпараметрическое уравнение Оствальда–де Вилла описывающее зависимость эффективной вязкости от скорости сдвиговой деформации

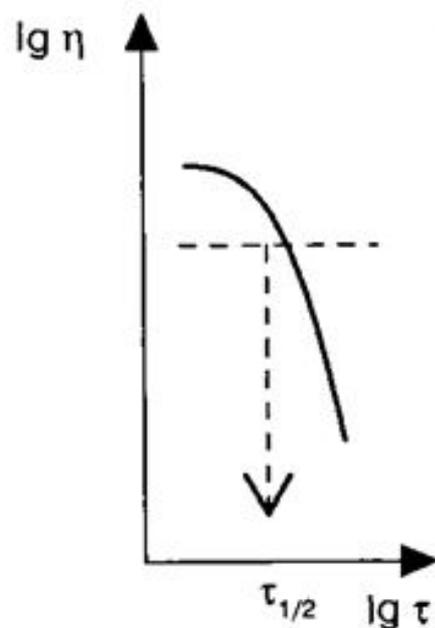
$$\eta(\dot{\gamma}) \approx K(\dot{\gamma})^{n-1}, \quad (34)$$

в котором K называют коэффициентом консистенции; n — индексом псевдопластичности или индексом течения ($n = d \lg \tau / d \lg \dot{\gamma}$, причем $n < 1$).

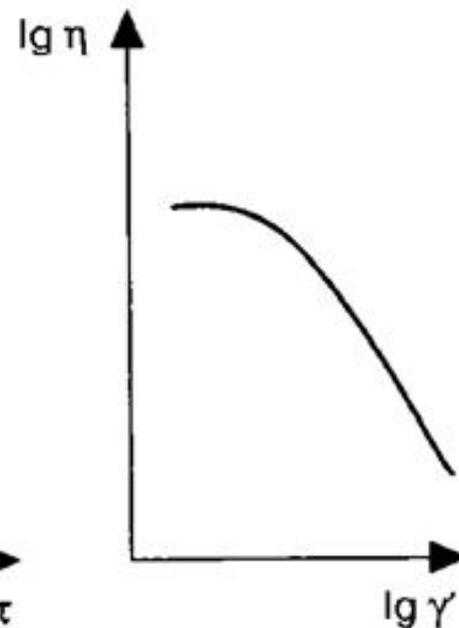
Зависимости вязкости от условий деформирования в соответствии со степенной моделью, моделями Эллиса и Карро



Степенная модель



Модель Эллиса



Модель Карро

Следует отметить, что вязкость по уравнению (34) снижается с ростом градиента скорости сдвига. При этом в широком интервале скоростей сдвига величина n не остается постоянной, а более или менее заметно уменьшается. Это уравнение, к сожалению, удовлетворительно работает только при $\dot{\gamma} \gg 0$, так как при значениях $\dot{\gamma}$ ниже $0,01 \text{ с}^{-1}$ вязкость почти всех расплавов полимеров перестает меняться и приближается к постоянному для каждого материала значению — η_0 , т. е. к наибольшей ньютоновской вязкости. Для определения наибольшей ньютоновской вязкости расплава полимера следует измерять ее при наименьших скоростях или напряжениях сдвига, которые позволяют возможности соответствующих приборов.

На практике эти значения можно получить методом экстраполяции зависимостей логарифма эффективной вязкости расплава от скорости или напряжения сдвига, как это представлено на рис. 2.71.



Преимущество степенного уравнения (36) состоит в том, что оно самое простое и им удобнее всего пользоваться при расчетах, хотя при $\dot{\gamma}' \rightarrow 0$ эффективная вязкость, рассчитываемая по этому уравнению, стремится к бесконечности.

Значительно более удовлетворительное описание экспериментальных кривых течения расплавов полимеров дает трехпараметрическое уравнение Карро (рис. 2.70):

$$\eta(\dot{\gamma}')/(\eta_0) = [1 + (\lambda\dot{\gamma}')^2]^{(n-1)/2},$$

согласно которому при малых $\dot{\gamma}'$ вязкость стремится к η_0 (наибольшей ньютоновской вязкости), а при больших $\dot{\gamma}'$ выполняется степенной закон с показателем степени, равным n . Считают, что $\eta \rightarrow \eta_0$, если $\lambda \geq 1$, где λ называют критерием Деборы, который выражается отношением времени релаксации полимерного расплава к времени эксперимента ($\Theta/\tau_{\text{эксп}}$).

При необходимости описать зависимость эффективной вязкости не от скорости, а от напряжения сдвига, применяют трехпараметрическое уравнение Эллиса (рис. 2.70):

$$\eta(\tau) = \eta_0/[1 + (\tau/\tau_{1/2})^{\alpha-1}], \quad (38)$$

где величина $\tau_{1/2}$ представляет собой напряжение сдвига, при котором начальная ньютоновская вязкость материала (η_0) падает вдвое, а α — показатель степени.

Течение жидкостей с пределом текучести — $\tau_{\text{пред}}$ (полимеров с дисперсными наполнителями, пастообразных субстанций) описывают уравнением Бингама:

$$\tau = \tau_{\text{пред}} K \dot{\gamma}' \text{ или } \eta(\dot{\gamma}') = \eta_{\text{пл}} + \tau_{\text{пред}} / \dot{\gamma}' \text{ при } \tau \geq \tau_{\text{пред}},$$

где $\eta_{\text{пл}}$ — пластическая вязкость,
или уравнением Кэссона:

$$\tau^{1/2} = \tau_{\text{пред}}^{1/2} + (\eta_{\text{пл}} \dot{\gamma}')^{1/2}.$$

Поскольку расплавы полимеров обладают вязкоупругостью, то текущий материал и в жидком состоянии способен деформироваться упруго.

Это приводит при течении по каналам к некоторым эффектам, которые могут быть обнаружены при исследовании расплавов (растворов) ПМ с использованием вискозиметров.

Один из наиболее распространенных типов вискозиметров - капиллярные. В них течение расплава идет в изотермических условиях, как правило по круглым каналам под действием заданного перепада давлений или постоянного напряжения сдвига (КВПД — одним из которых является ИИРТ). Другой тип - вискозиметры постоянного расхода жидкости или постоянной скорости сдвига (КВПР).

Существуют ротационные вискозиметры: течение идет в зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами, один из которых вращается, или в зазоре между неподвижной плоскостью и вращающимся конусом.

Каждый из указанных приборов отличается своими особенностями, которые необходимо учитывать для правильного измерения вязкости полимерного расплава. В капиллярных приборах под действием перепада давлений происходит сдвиговое течение полимерного расплава по каналу (капилляру) со скоростью, достигающей максимальных значений в центре канала. Максимальное значение скорости сдвига при этом достигается на стенке канала ($\dot{\gamma}_w$). На той же стенке канала возникают максимальные касательные напряжения сдвига (τ_w). При более или менее серьезном изменении сечения канала (в зоне перехода от цилиндрического материального цилиндра к капилляру) наблюдается достаточно существенная потеря давления, действующего на расплав — $\Delta P_{\text{вх}}$.

Этот факт нетрудно установить, измеряя изменение давления по длине канала измерительного прибора с помощью датчиков давления, как показано на рис. 2.74.

Из схемы, приведенной на рис. 2.74, понятно, что уже при вхождении расплава полимера в узкий канал происходит заметная потеря давления $\Delta P_{\text{вх}}$. Такая же, но меньшая по величине потеря наблюдается и при выходе расплава из канала $\Delta P_{\text{вых}}$. Потеря давления на выходе из канала обусловлена возникновением за счет проявления вязкоупругих свойств материала так называемых нормальных напряжений — τ_{11} и τ_{22} , т. е. напряжений, которые направлены не параллельно направлению течения (как обычные так называемые касательные напряжения — τ_{12}), а перпендикулярно (нормально) к нему.

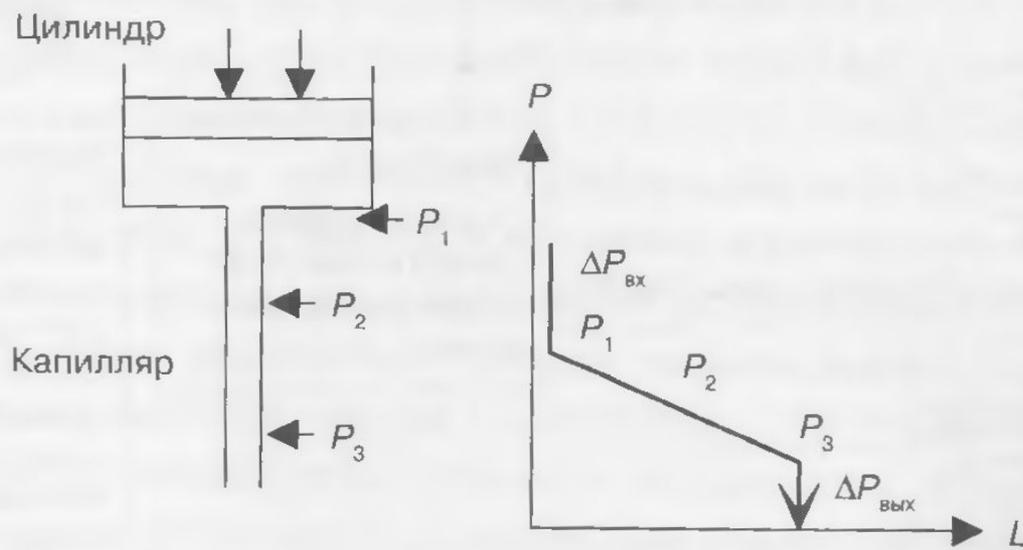


Рис. 2.74. Схема измерения давления (P) по длине (L) цилиндрического канала вискозиметра

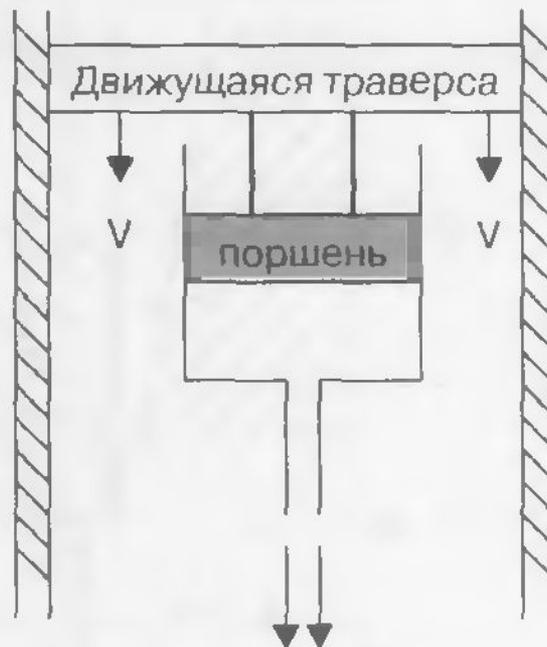
Капиллярные приборы

постоянного давления



Внешнее давление
(из баллона с газом)
Мультипликатор
Материальный
цилиндр
Капилляр
Выход расплава
полимера
(измеряется расход)

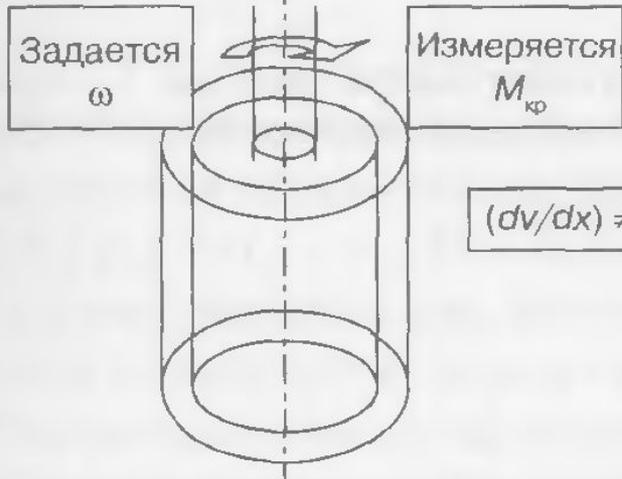
постоянного расхода



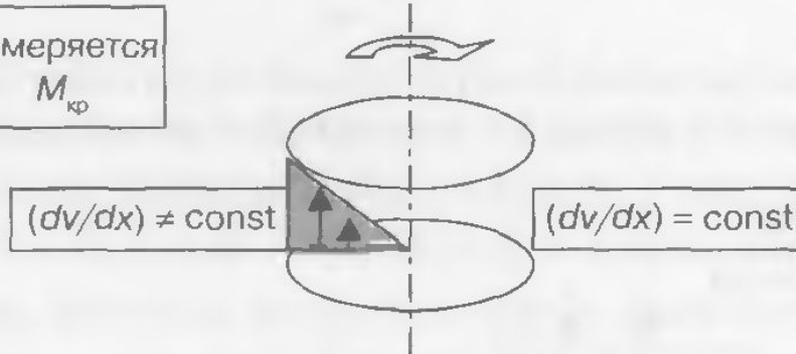
Ходовые
винты
Материальный
цилиндр
Капилляр
Выход расплава
полимера
(измеряется
расход)

Ротационные приборы

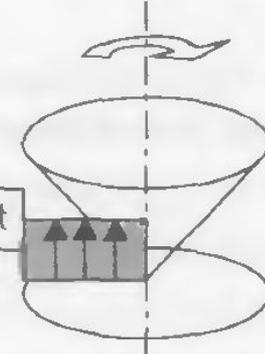
цилиндр-цилиндр
(вращается только
внутренний цилиндр)



диск-диск
(вращается только верхний диск)



конус-плоскость
(вращается только конус)



Режим постоянных скоростей сдвига (dv/dx)



Задается ω
Скорости сдвига (dv/dx) возрастают от центра к краю диска

Задается ω
Скорости сдвига (dv/dx) от центра к краю диска постоянны, что позволяет измерять не только касательные, но и нормальные напряжения

Режим постоянных напряжений сдвига (τ)

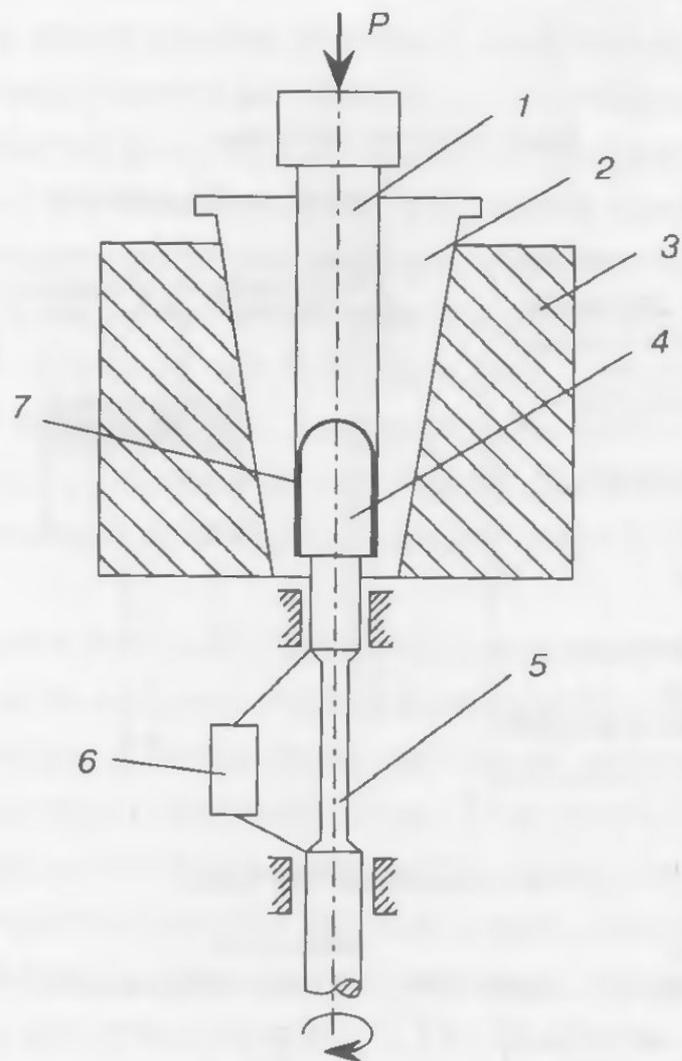
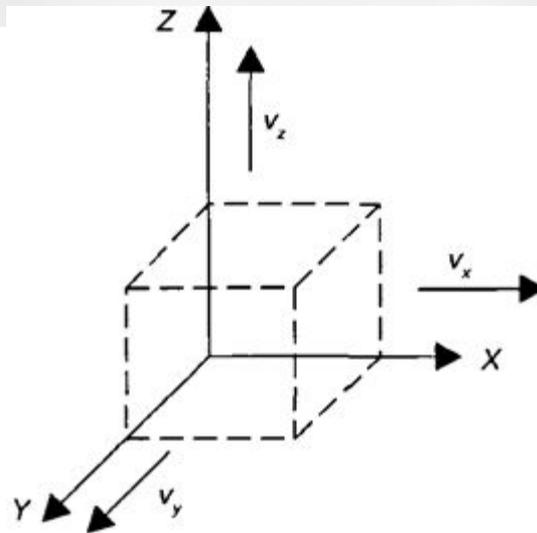


Рис. 2.73. Принципиальная схема измерительной части пластометра Канавца: 1 — пуансон; 2 — матрица; 3 — обойма; 4 — ротор; 5 — торсион; 6 — датчик крутящего момента; 7 — образец

Для лучшего представления особенностей проявления нормальных напряжений рассмотрим элементарный объем пространства в декартовых координатах (рис. 2.75), через который жидкость может протекать в направлениях x , y и z со скоростями v_x , v_y , v_z . Течение жидкости при сдвиге в направлении x осуществляется в результате действия напряжений в плоскости xy . Они называются касательными напряжениями и обозначаются — τ_{xy} . Аналогично, течение жидкости в направлении y (плоскость yz) или в направлении z (плоскость xz) осуществляются



за счет действия касательных напряжений τ_{yz} или τ_{xz} . Проявление жидкостью вязкоупругих свойств приводит не только к появлению касательных напряжений, но и к возникновению напряжений, направленных перпендикулярно (нормально) к поверхности, через которую идет течение. Для скорости v_x нормальное напряжение можно выразить как σ_{xx} , для скорости v_y — как σ_{yy} , для скорости v_z — как σ_{zz} .

Обычно для характеристики вязкоупругих свойств расплавов полимеров пользуются не абсолютными значениями σ_{xx} (или σ_{11}) и σ_{yy} (или σ_{22}), а их разностью $N_1(\dot{\gamma}_w) = \sigma_{11} - \sigma_{22}$. Проявление нормальных напряжений приводит, например, к существенному увеличению диаметра струи расплава (разбуханию), выходящей из капилляра (или из головки экструдера).

Потеря давления на входе в канал связана с возникновением в зоне входа растягивающих деформаций ($\epsilon_{\text{раст}}$) и напряжений ($\sigma_{\text{раст}}$), что приводит к проявлению так называемой продольной вязкости (или вязкости при растяжении расплава). Эту вязкость обычно измеряют на так называемых вискозиметрах растяжения расплава, в которых измеряют напряжения, возникающие при растяжении (с заданной скоростью или при заданном усилии) пленки расплава полимера, помещенной на поверхность горячей силиконовой жидкости (рис. 2.76).

Измерение величин потерь давления на входе и выходе позволяет определять не только касательные, но и нормальные напряжения и напряжения растягивающего течения. В частности, по значению потерь давления на выходе из капилляра $\Delta P_{\text{вых}}$ можно рассчитать так называемую первую разность нормальных напряжений:

$$\sigma_{11} - \sigma_{22} = N_1(\dot{\gamma}_w) = \Delta P_{\text{вых}} + \tau_w (d\Delta P_{\text{вых}} / d\tau_w) \quad (41)$$

или, что то же самое $N_1(\dot{\gamma}_w) = \Delta P_{\text{вых}} (1 + d \lg \Delta P_{\text{вых}} / d \lg \tau_w)$.

По величине потерь давления на входе $\Delta P_{\text{вх}}$ можно рассчитать величины скорости деформации растяжения ϵ' , $\sigma_{\text{раст}}$, $\eta_{\text{раст}}$:

$$\epsilon'_{\text{раст}} = 4(\gamma')^2 \eta / 3(n+1) \Delta P_{\text{вх}}, \quad (42)$$

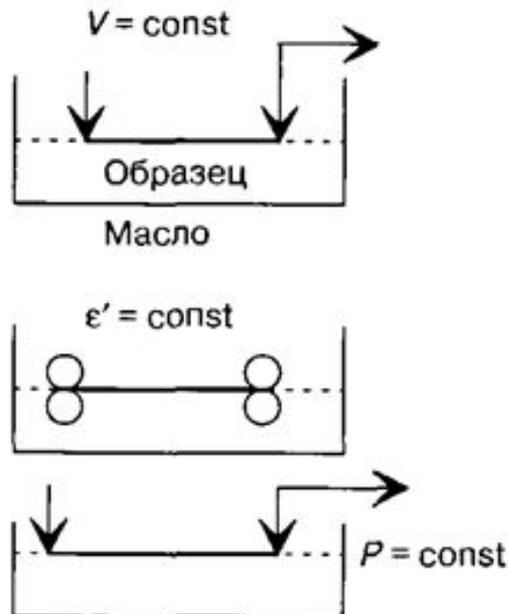
$$\sigma_{\text{раст}} = 3/8(n+1) \Delta P_{\text{вх}}, \quad (43)$$

$$\eta_{\text{раст}} = 9(n+1)^2 \Delta P_{\text{вх}} / 32 \eta \gamma', \quad (44)$$

где $\eta_{\text{раст}}$ — вязкость расплава при растяжении или «продольная» вязкость, значение которой определяет, например, поведение полимерных нленок при раздуве и растяжении.

Реометры для растяжения расплава

Растяжение расплава



Реометр для растяжения нити (волокна)

Растяжение нити

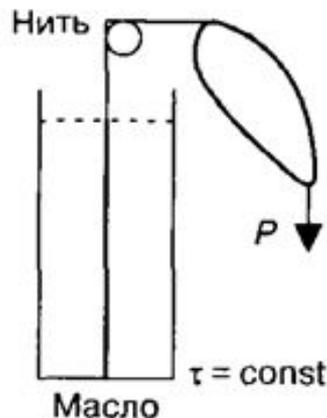


Рис. 2.76 Схемы основных типов реометров растяжения для расплавов полимеров

Потери давления на входе в канал и расчет поправки Бэгли

Для получения истинных неискаженных значений вязкости в экспериментальные значения, определяемые на капиллярных приборах, необходимо вносить поправки, главными из которых являются поправка на потерю давления на входе в капилляр (так называемая поправка Бэгли) и поправка, позволяющая определить значения скорости сдвига на стенке капилляра — γ'_w (так называемая поправка Рабиновича). Потери давления на входе в капилляр обусловлены возникновением в зоне входа вихревых течений, связанных с резким изменением диаметра и пропускной способности канала (рис. 2.77).

Учет этих потерь можно осуществлять, сравнивая зависимости расхода жидкости от давления, полученные при постоянном расходе на двух капиллярах одного диаметра, но разных длин. При этом предполагается, что при одном и том же расходе

вихри, возникающие в зоне входа, аналогичны. Поэтому, вычитая одну зависимость из другой, мы можем получить описание течения только на отрезке, представляющем собой разность длин длинного и короткого капилляров. Для этого на двух таких капиллярах получают кривые течения, а затем при постоянных значениях объемного расхода (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) сравнивают величины давления, при которых происходило течение в коротком и длинном канале (P_1, P_2, P_3, P_4), и рассчитывают истинную величину напряжений сдвига τ_w , пользуясь значениями $\Delta P_{\text{вх}}$ (рис. 2.78–2.79).

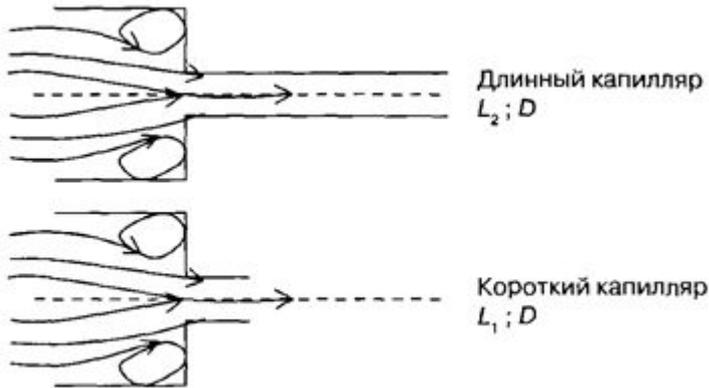


Рис. 2.78 Схема определения $\Delta P_{\text{вх}}$ методом 2-х капилляров

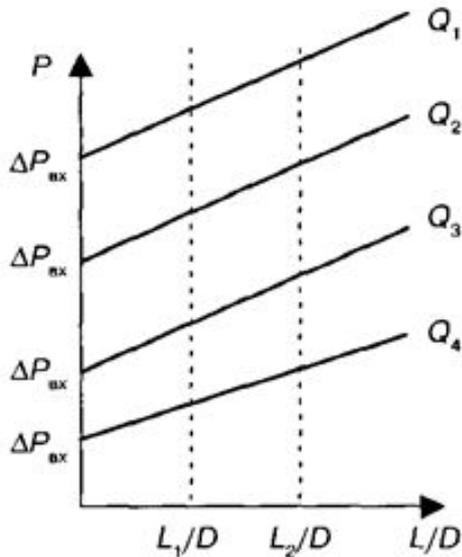


Рис. 2.79 Схема определения $\Delta P_{\text{вх}}$, соответствующих объемным расходам Q_I (т.е. \dot{V}_i)

Рис. 2.77 Образование вихревых течений в зоне входа в канал меньшего диаметра

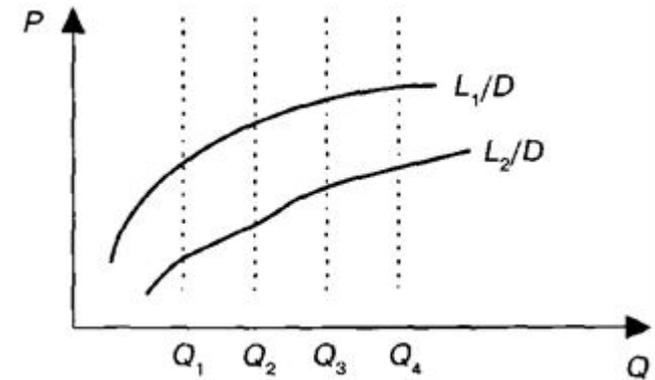


Рис. 2.78. Схема определения $\Delta P_{\text{вх}}$ методом двух капилляров

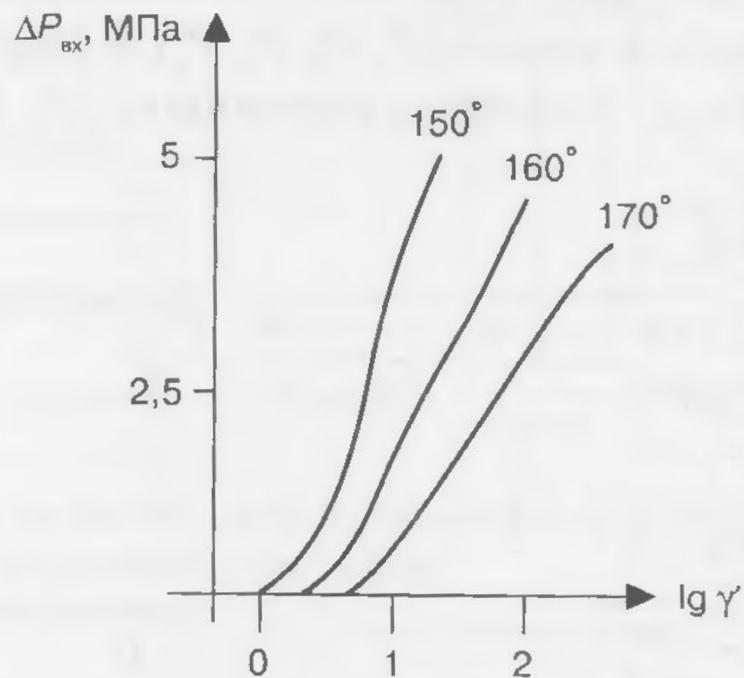


Рис. 2.80. Зависимость потерь давления на входе в капилляр от логарифма скорости сдвига. Числа у кривых — температура опыта

По зависимости $\Delta P_{вх}$ от $\lg \dot{\gamma}$ можно оценить упругость расплава полимера

Учет псевдопластичности и расчет поправки Вейссенберга

Необходимость второй поправки следует из того, что для правильной оценки сдвиговой вязкости расплава, текущего по каналу радиусом R , необходимо сравнивать значения напряжений и скоростей сдвига, измеренных в одной точке (лучше всего на стенке канала, где эти значения максимальны). В то же время определение величины объемного расхода полимера Q , позволяющего рассчитать скорость сдвига, обычно связано с измерением всего объема вытекающего расплава. Учет скорости сдвига именно на стенке можно осуществить по уравнению Рабиновича–Вейссенберга. Для ньютоновских жидкостей этот расчет не представляет сложностей. Скорость сдвига на стенке в этом случае равна

$$\gamma_w' = 4Q/\pi R^3.$$

Для неньютоновских жидкостей величина γ_w' должна учитывать величину индекса псевдопластичности n из степенного (41) или другого закона

$$\gamma_w' = (Q/\pi R^3)/[(3n+1)/n]$$

или более точно по формуле

$$\gamma_w' = (3Q/\pi R^3) + (\tau_w/\pi R^3)dQ/d\tau_w.$$

Введение поправки заключается в следующем — кривая течения, построенная в координатах $\lg \gamma' - \lg \tau_w$, смещается вверх на расстояние, равное величине производной $d \lg \gamma' / d \lg \tau_w$ (рис. 2.81). Если $n \neq \text{const}$, то для разных участков кривых течения подставляются свои значения.

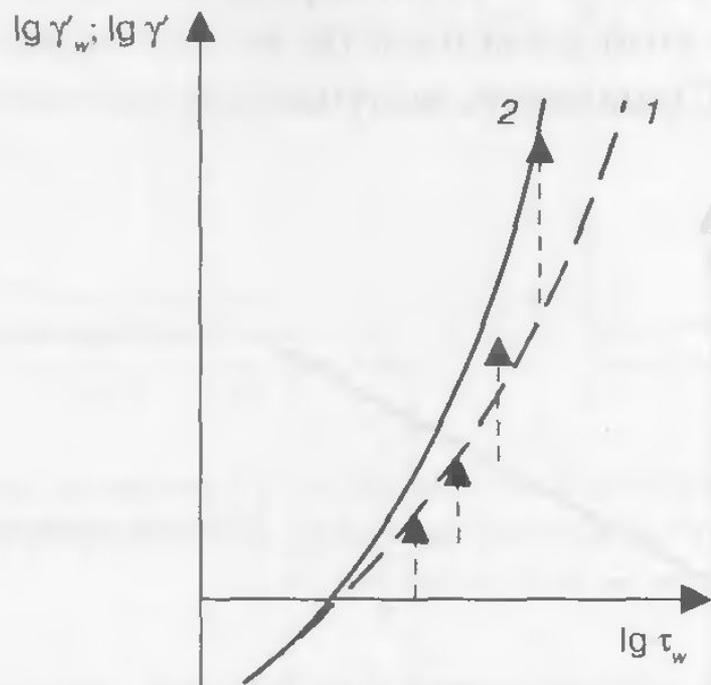


Рис. 2.81. Схематическое представление введения поправки Вейсенберга для построения истинной кривой течения: 1 — предварительная кривая в координатах $\lg \gamma' - \lg \tau_w$; 2 — окончательная кривая течения в координатах $\lg \gamma'_w - \lg \tau_w$

В ряде случаев при исследовании реологического поведения композиций на основе термопластичных полимеров, содержащих смазки или пластификаторы, существует опасность некорректной интерпретации данных, полученных при капиллярной вискозиметрии, за счет проскальзывания текущей жидкости по стенке капилляра. В этом случае применяется так называемый метод трех капилляров одинаковой длины, но разных диаметров, или поправка Муни. Для введения этой поправки необходимо учесть возможное скольжение полимерного расплава по стенке со скоростью $V_{\text{скольж}}$. В этом случае можно воспользоваться формулой закона Пуазейля, описывающей расход ньютоновской жидкости по каналу:

$$Q = \pi R^4 \Delta P / 8 \eta L$$

где Q — расход полимера; R — радиус капилляра; L — его длина; ΔP — перепад давления; η — вязкость жидкости.

Если уточнить формулу закона Пуазейля с учетом расхода, связанного с проскальзыванием: $Q = \pi R^4 \Delta P / 8 \eta L + \pi R^2 V_{\text{скольж}}$, и разделить обе части уравнения на величину $\pi R^3 \tau_w$ (где $\tau_w = R \Delta P / 2L$), то получим выражение, позволяющее учесть скорость скольжения и реальную величину вязкости расплава:

$$Q / (\pi R^3 \tau_w) = 1/4 \eta + (1/R) V_{\text{скольж}} / \tau_w.$$

На рис. 2.82 приведена зависимость приведенного расхода по каналу от обратной величины его радиуса. Чем шире канал, тем вклад течения выше. Для канала бесконечного радиуса (при $1/R \rightarrow 0$) он определяет весь расход. Значит, отрезок, отсекаемый на ординате этой зависимости, можно определить как истинную величину вклада течения. Сравнить полученные значения следует при $\tau_w = \text{const.}$



Рис. 2.82. Зависимость приведенного расхода от обратного радиуса капилляра для оценки поправки Муни при скольжении расплава по стенке

РАЗБУХАНИЕ СТРУИ РАСПЛАВА ПРИ ВЫХОДЕ ИЗ КАНАЛА (Барус-эффект)

Особенности поведения расплава полимера при течении по круглым каналам выражаются и в разбухании струи экструдата (Барус-эффект). Есть несколько уравнений, позволяющих связать первую разность нормальных напряжений $N_1(\dot{\gamma}_w) = \sigma_{11} - \sigma_{22}$ со степенью разбухания экструдата (D/D_0):

по Бэгли и Даффи:

$$\sigma_{11} - \sigma_{22} = 2 \tau_w [(D/D_0)^4 - (D/D_0)^{-2}]^{1/2}$$

по Грессли и др.

$$\sigma_{11} - \sigma_{22} = 2^{0,5} \tau_w [(D/D_0)^4 - (D/D_0)^{-2}]^{0,5}$$

по Таннеру

$$\sigma_{11} - \sigma_{22} = 2 \tau_w [(D/D_0)^6 - 2]^{0,5}$$

Сравнивая значения D/D_0 , полученные при различных значениях γ' , можно построить зависимость N_1 от γ' (83, б) или от τ_w . С увеличением отношения длины капилляра к его диаметру величина разбухания падает и при $L/D > 20$ перестает зависеть от длины канала (рис. 2.83, а).

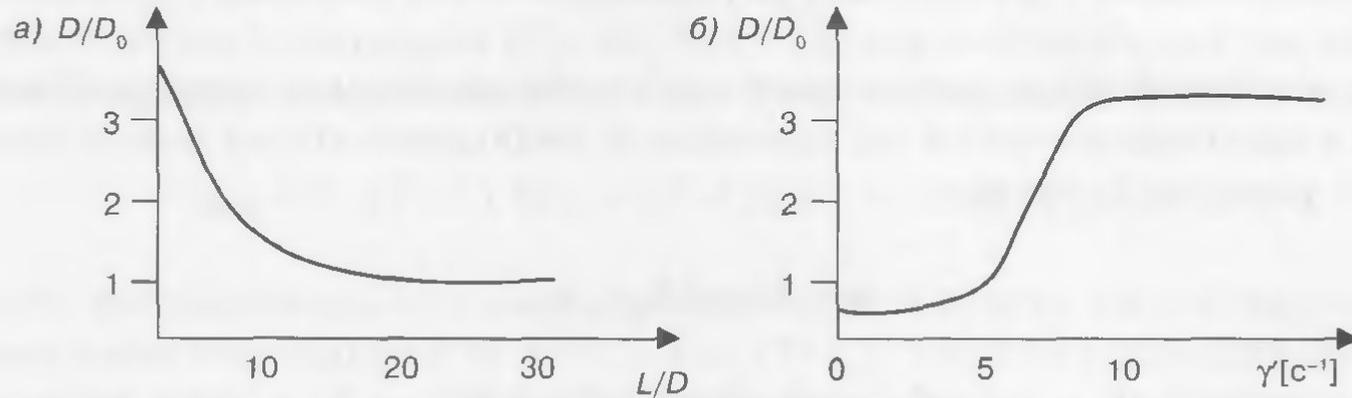
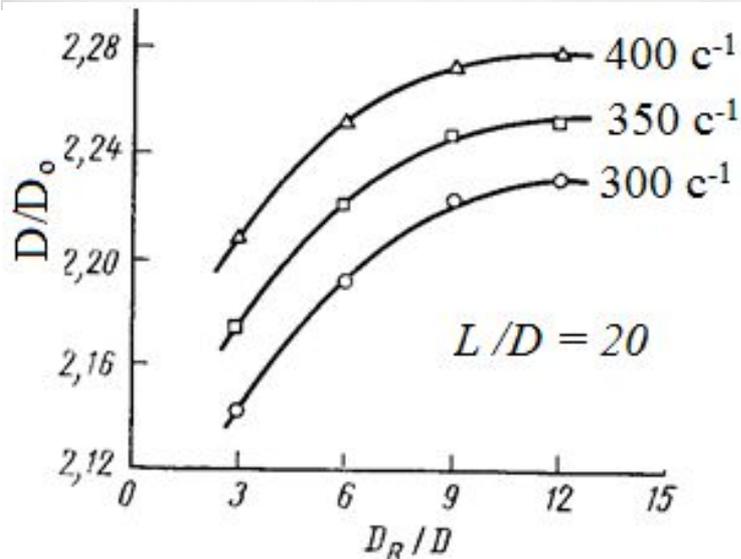
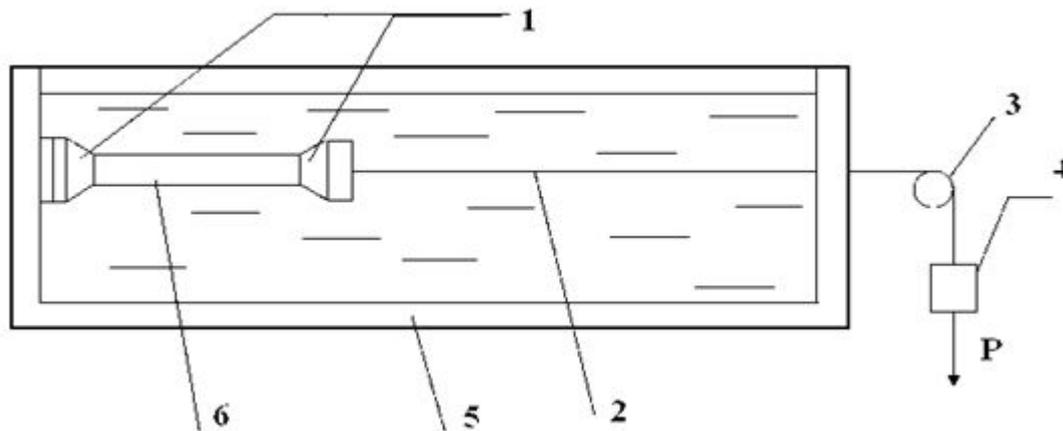


Рис. 2.83. Схематические зависимости коэффициента разбухания струи экструдата, выходящего из капилляра, от соотношения его длины и диаметра (а) и от величины скорости сдвига (б)



Коэффициент разбухания струи экструдата ПЭВП при 180°C в зависимости от отношения диаметра резервуара (D_R) к диаметру капилляра (D_0)



Цилиндрические образцы (5 шт.) для испытаний получают на сдвиговом Вискозиметре ИИРТ на капилляре с диаметром отверстия 2 мм при 200 °С и нагрузке 5 кг.

Образцы получают в строго контролируемых условиях при времени прогрева материала 10 минут.

Образец цилиндрической формы получают на вискозиметре ИИРТ:

капилляр $d_k = 2$ мм, $l_k = 8$ мм, $P = 5$ кг; $L_{обр} = 50$ мм;

Рабочая зона образца после запайки его концов в зажимы около 30 мм; отношение $l_0/d_0 \geq 5$ (необходимо для минимизации влияния концевых эффектов).

Образец запаивают в концевые зажимы и помещают в ванну с силиконовым маслом для термостатирования. Плотность масла \approx плотности исследуемого полимера при температуре опыта (для компенсации влияния силы тяжести на прогиб образца)

Растягивающий груз подбирают в каждом эксперименте для установления времени деформации до 15 мин.

Груз нормируют по площади поперечного сечения образца, то есть по начальному растягивающему напряжению:

$$\sigma_0 = F/S_0,$$

где F – груз ($5 \div 5,5$ г), S_0 – площадь поперечного сечения, d_0 – диаметр образца.

Образец растягивают до заданных значений полной деформации ε ($100 \div 150$ %), в момент достижения заданного значения ε вырезают участок образца $l_n = 30 \div 100$ мм, который свободно сокращается в течение $30 \div 50$ мин (но не более 60 мин).

Длина сокращающегося образца замеряется через каждые 25 с первые 2 мин, а затем через 50 с.

Обратимая деформация образца к моменту времени t : $\alpha = \ln (l_o / l_k),$

где l_o – начальная длина отрезанного участка образца, с которой начинали проводить его сокращение, l_k – длина, до которой сократился вырезанный участок образца.

Полная деформация по Генки $\ln \varepsilon = \ln \alpha + \ln \beta,$

где $\ln \beta$ – вязкая (необратимая) составляющая полной деформации, равная

$$\ln \beta = \ln \varepsilon - \ln \alpha$$

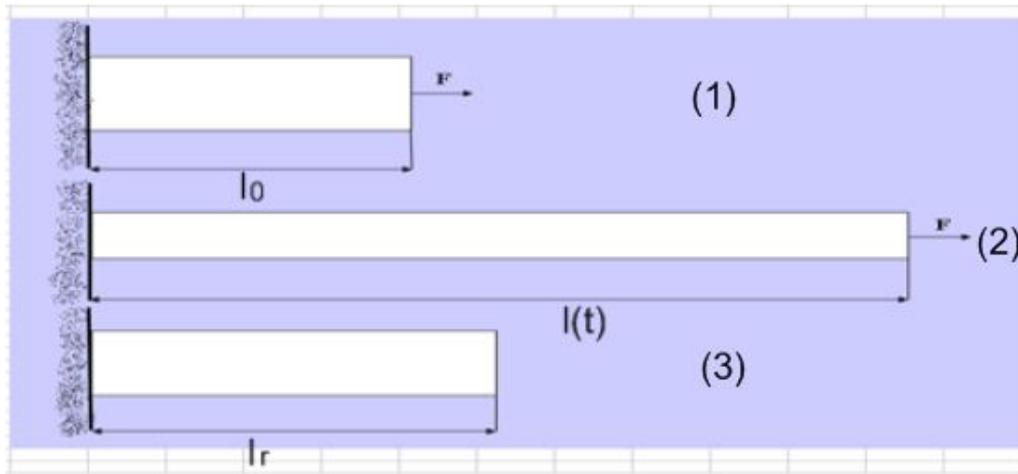


Схема однородного растяжения образцов

- 1 – исходный образец l_0
- 2 – образец в процессе однородного растяжения $l(t)$
- 3 – образец после однородного сокращения l_k

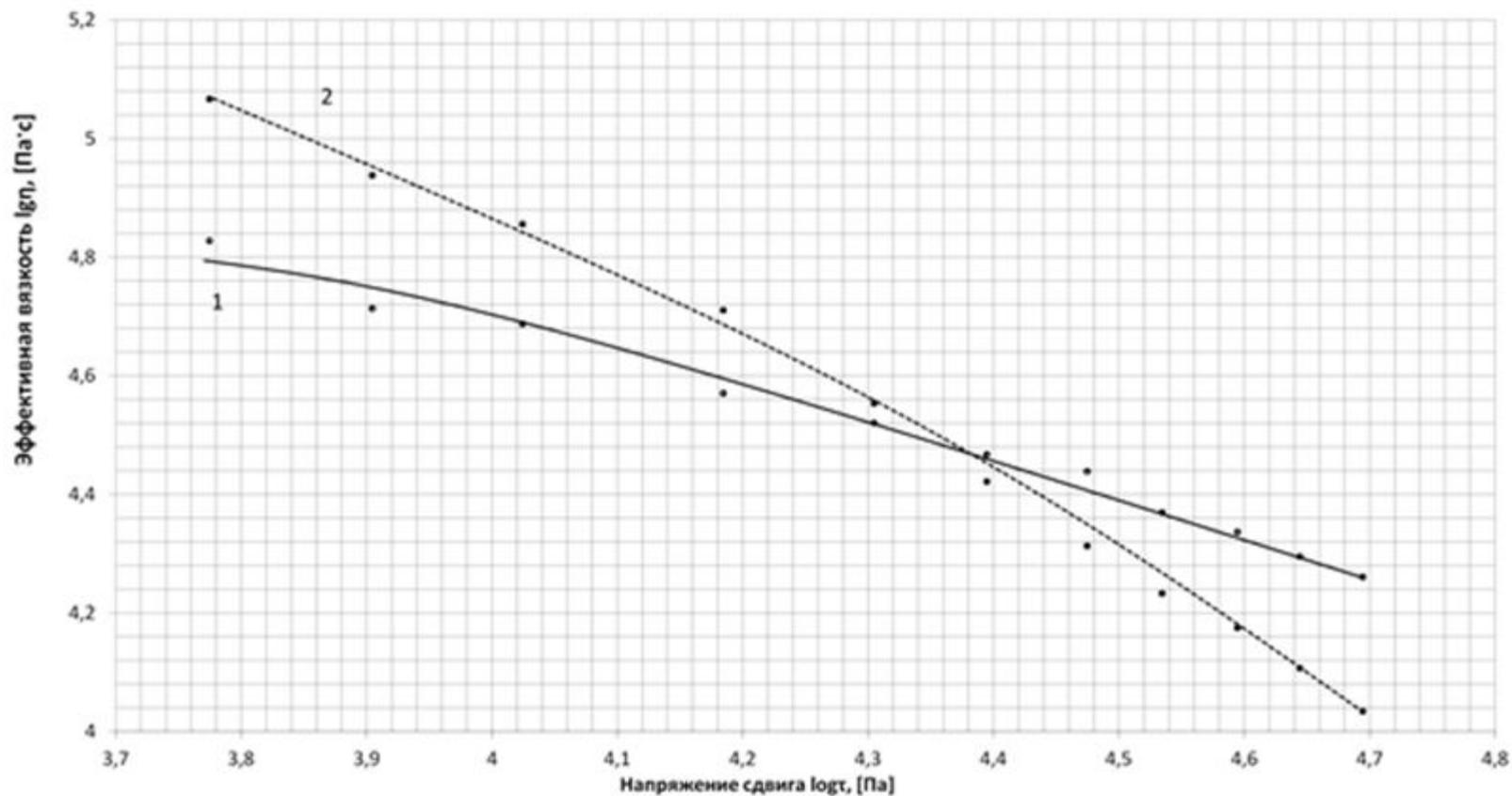
Рассчитывают полную деформацию ε в *каждый текущий момент времени*: $\varepsilon = l(t) / l_0$,
 где $l(t)$ – изменение длины образца в процессе растяжения,
 l_0 – начальная длина образца.

Рассчитывают полную деформацию по Генки – $\ln \varepsilon$

Строят графики изменения полной деформации по Генки $\ln \varepsilon$ от времени ($\ln \varepsilon = f(t)$).

Каждый из 5 –ти образцов из подготовленных на ИИРТе, растягивают до одного из заданных значений полной деформации ($\varepsilon = 2, 3, 4, 5, 6, 7$). В процессе сокращения образца измеряют длину до тех пор, пока она практически не перестанет изменяться ($\approx 30 \div 60$ мин.)

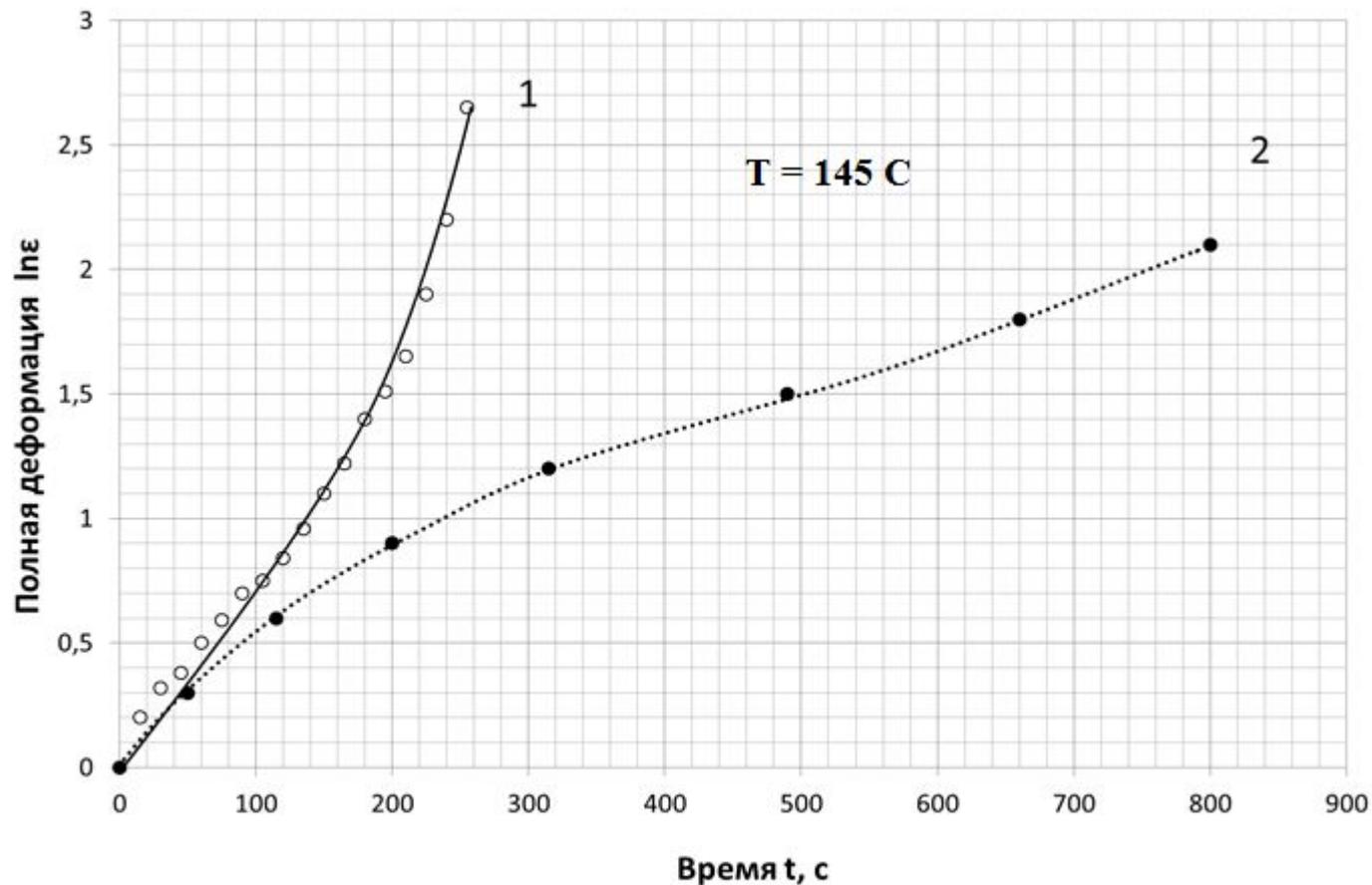
**Кривые течения ПЭВП типа ПЭ 80 (ПТР = 0,52 г/10 мин) и
ПЭ 63 (ПТР = 0,50 г/10 мин)**



1. ПЭ 100

2. ПЭ 63

Изменение полной деформации $\ln \varepsilon$ во времени t при растяжении образцов трубных марок ПЭ100 и ПЭ 63 при начальном растягивающем напряжении $\sigma = 4$ кПа.



1. ПЭ 100

2. ПЭ 63

Диаграмма полной, вязкой и обратимой деформаций для ПЭ63 (273-79,п. 4095) при 185°С

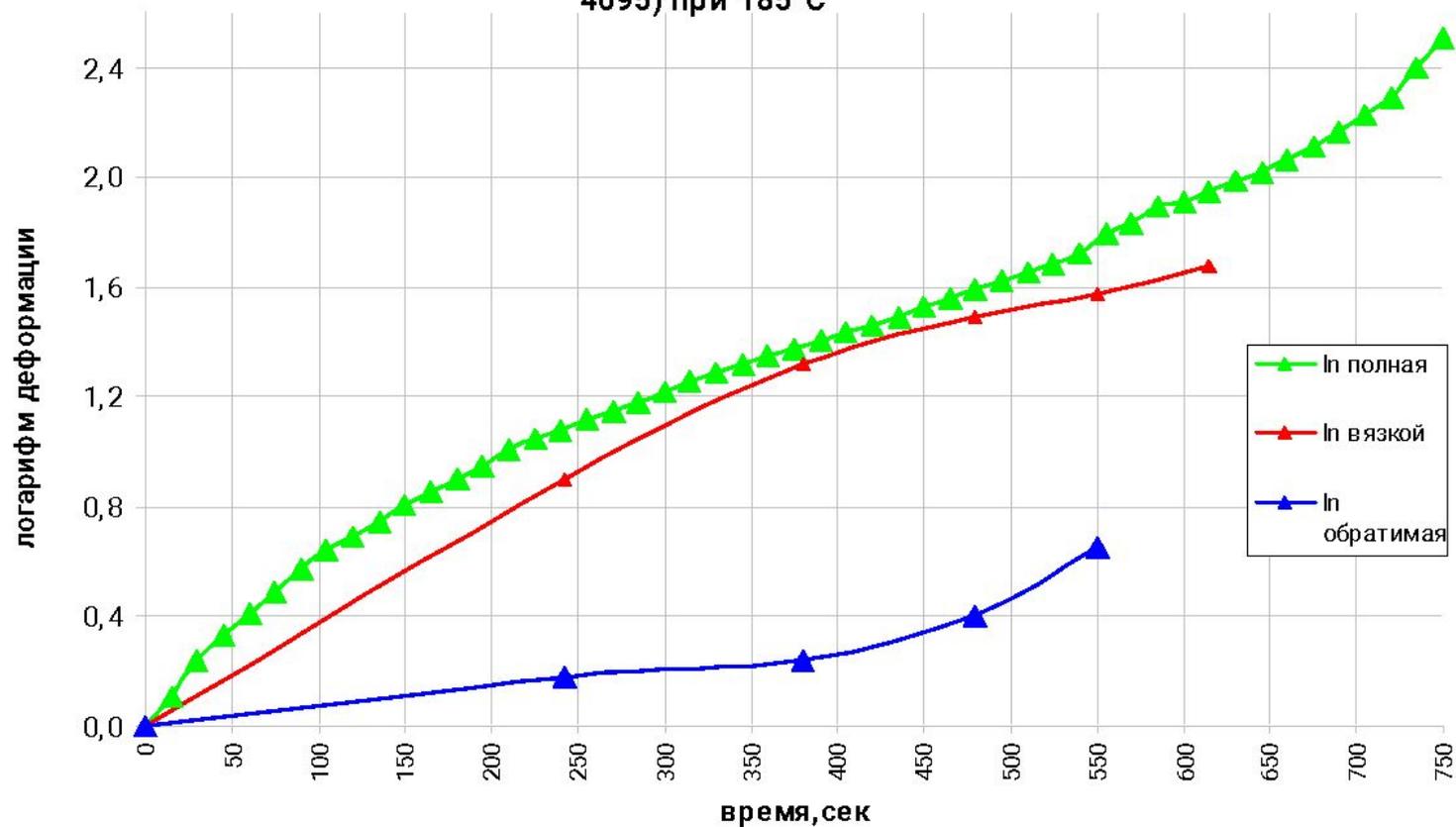
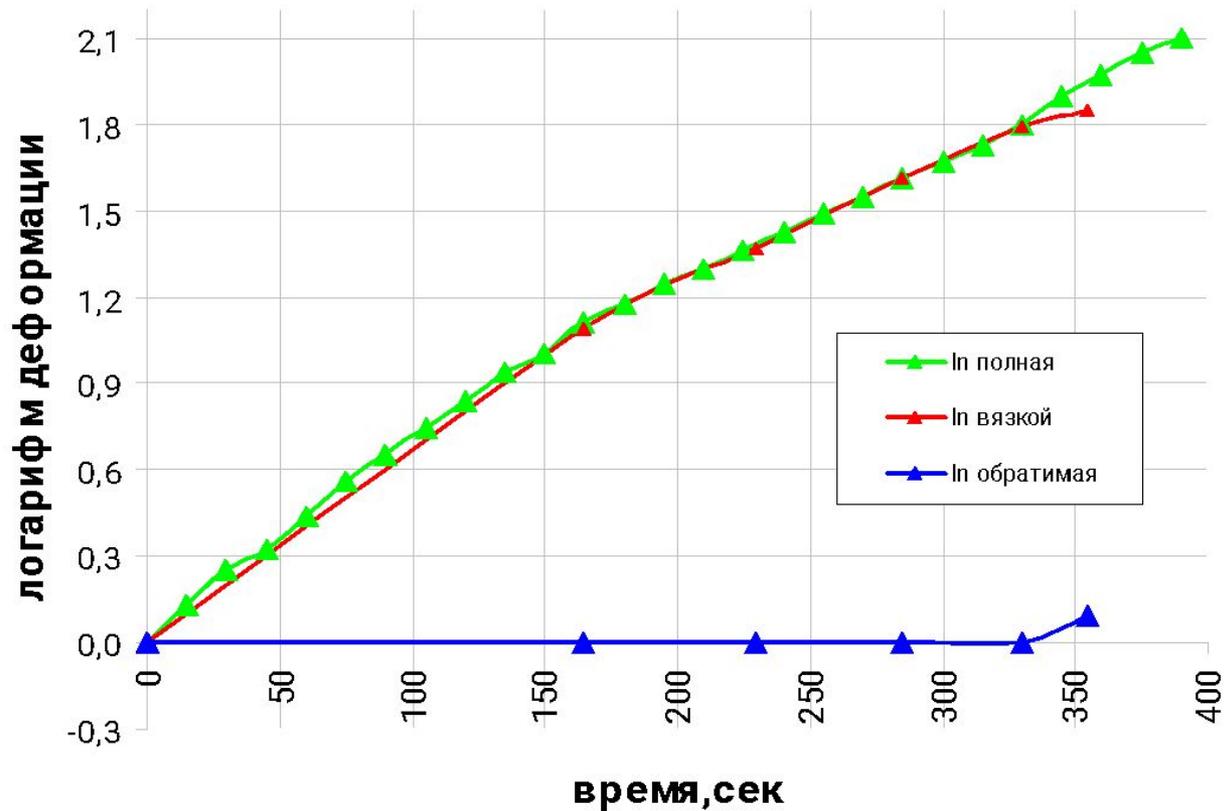
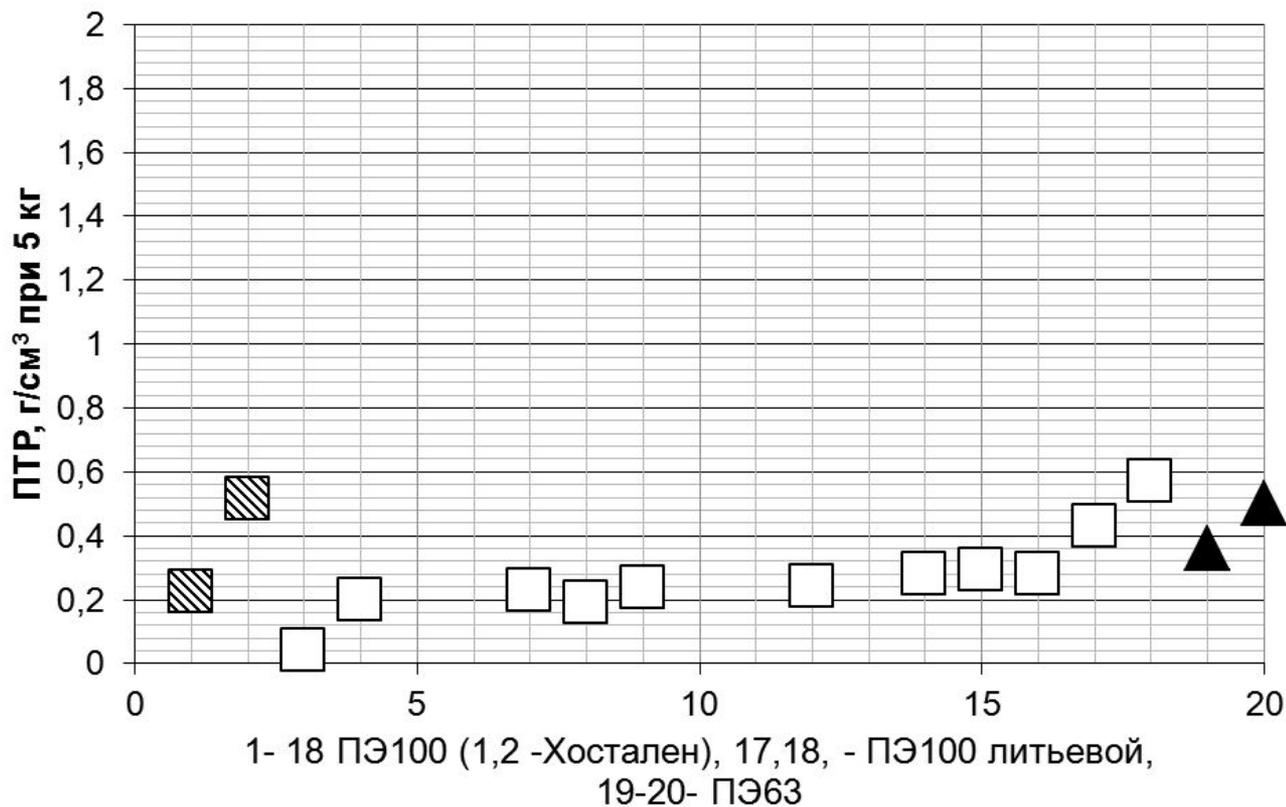
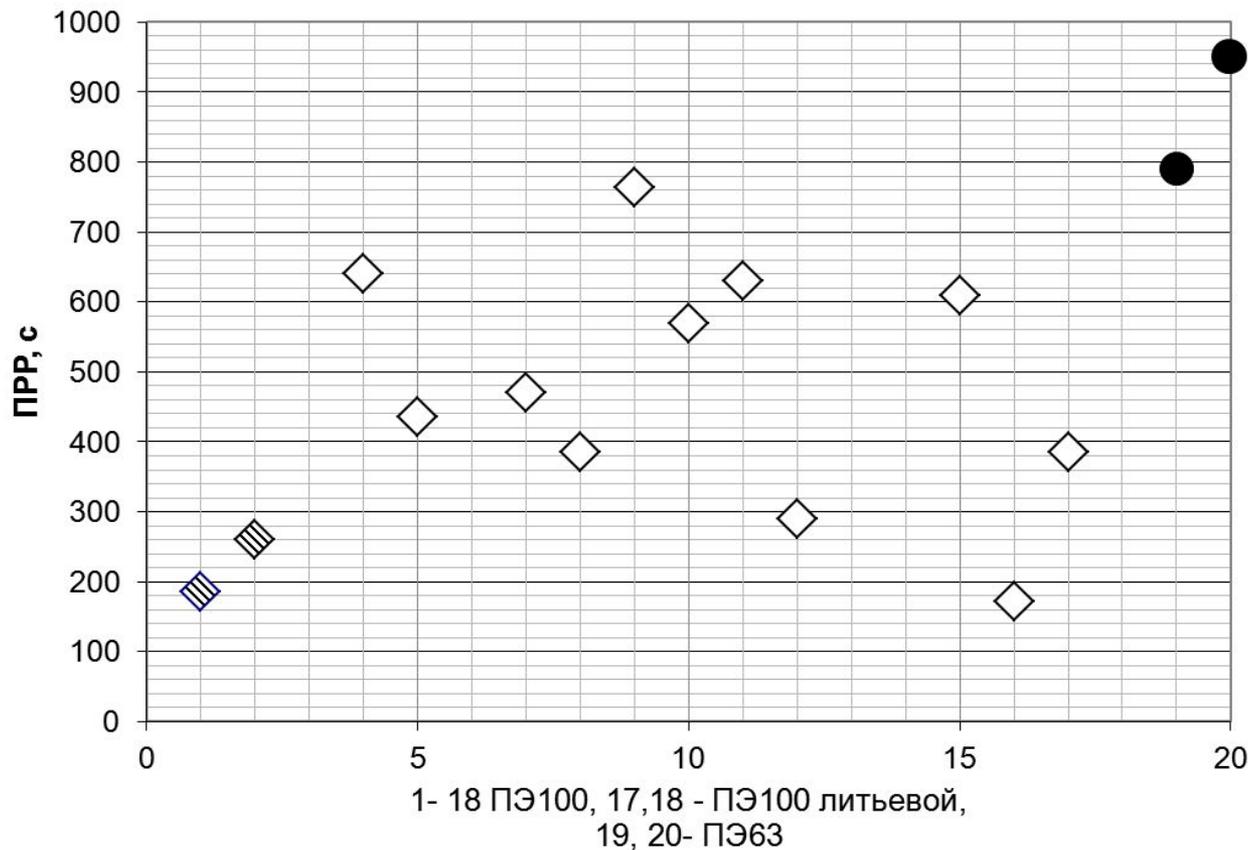


Диаграмма полной, вязкой и обратимой деформаций для ПЭ80 (PE4PP25B, п.4153) при 185°C





Значения ПТР ПЭВП различных фирм производителей
Штриховкой отмечены бимодальные марки ПЭ100 фирмы Базель, белым - ПЭ100 перечисленных выше фирм-производителей, черными треугольниками обозначены мономодальные марки отечественных производителей.



Значения ПРР* ПЭВП различных фирм производителей
Штриховкой отмечены бимодальные марки фирмы Базель, белым все остальные бимодальные марки с различными импортными фирмами-производителями, черными кружками обозначены мономодальные марки отечественных производителей.

* ПРР (показатель растяжения расплава) при 7-ми кратном удлинении, с

Определение инжекционной характеристики литьевой машины (ТПА)

Для корректной оценки процесса литья при моделировании необходимо учитывать соответствие формы для литья выбираемого ТПА или оценить фактическое состояние ТПА, которое определяется в частности зависимостью максимальной скорости впрыска от давления, называемой ***инжекционной характеристикой машины (ИХ)***

Обычно предполагается отсутствие теплопереноса и механического взаимодействия между пресс-формой и ТПА, хотя в реальности эти явления могут оказывать существенное влияние на ход процесса литья и качество полученных изделий.

Для заполнения форм на ТПА необходимо, чтобы **давление** создаваемое в **узле инъекции превышало сумму потерь давления в расплаве** на всех участках пути от цилиндра машины до самой удаленной точки формующей полости литьевой формы.

При малых скоростях течения расплава по каналам формы эти потери вследствие охлаждения могут достигать больших величин.

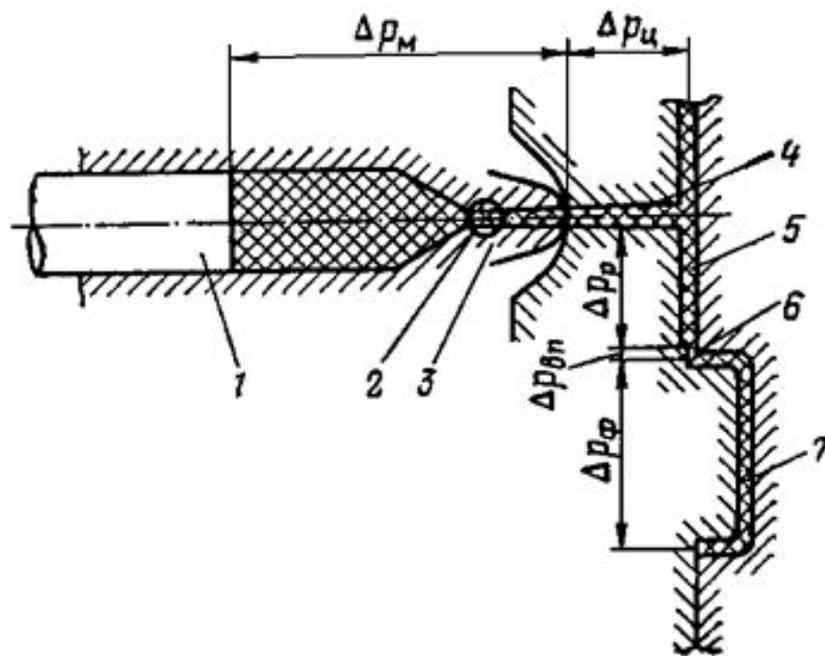
В результате этого застывание формуемого материала может произойти до заполнения формы.

Поэтому процесс заполнения следует вести с высокой скоростью, что возможно при применении высоких давлений.

В паспортах на ТПА инжекционная способность характеризуется величиной давления, создаваемого шнеком при впрыске (номинальное давление литья, $P_{\text{ном}}$), и объемной скоростью впрыска, равной объему отливки ($V_{\text{отл}}$, деленному на время впрыска ($t_{\text{впр}}$)).

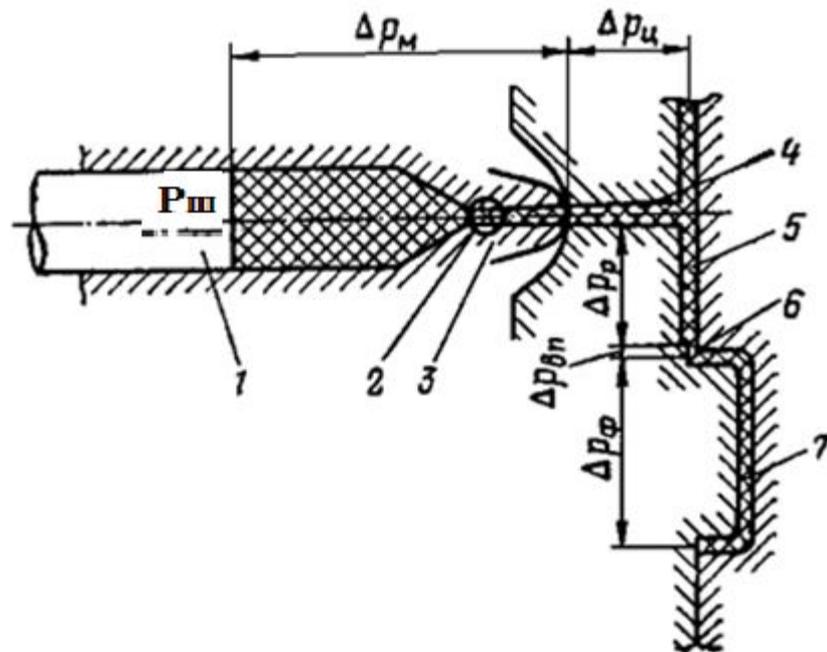
В паспортах на ТПА отсутствуют сведения о том, как с повышением давления изменяется скорость впрыска, поэтому необходимо экспериментально определять характеристики узлов инжекции.

В соответствии с формулой $N = Q \cdot \Delta P$ мощность узла инжекции ТПА (N) должна быть достаточной для того, чтобы на стадии заполнения формы обеспечить объемную скорость (Q) при перепаде давления в системе, равном ΔP .



Расчетная схема литьевой формы

- 1 - поршень литьевой машины;
- 2 - запорное устройство;
- 3 - сопло;
- 4 - центральный литник;
- 5 - разводящий канал;
- 6 - впускной литник;
- 7 - изделие



Расчетная схема литейной формы

- 1 - поршень литейной машины;
- 2 - запорное устройство;
- 3 - сопло;
- 4 - центральный литник;
- 5 - разводящий канал;
- 6 - впускной литник;
- 7 - изделие

Для анализа работы ТПА на стадии заполнения, рассмотрим процесс формирования изделия, схема которого представлена на рис. 2 (поз. 7). Создаваемое поршнем давление ($P_{ш}$) расходуется на преодоление сопротивления в самой машине (ΔP_m), включающего потери давления в запорном устройстве, сопле и на участках литейной формы, показанных на схеме. Условие заполнения расплавом формующей полости записывается в виде неравенства: $P_{ш} > \Delta P_m + \Delta P_c + \Delta P_r + \Delta P_{вп} + \Delta P_f$.

Т.к. для расчета используется ИХ, полученная путем измерения давления расплава после выхода из сопла, ΔP_m можно из этого неравенства исключить, т.е.:

$$P_{ш} > \Delta P_c + \Delta P_r + \Delta P_{вп} + \Delta P_f.$$

Рассмотрим каждое из слагаемых, входящих в правую часть формулы

Потери давления в канале центрального литника ($\Delta P_{\text{ц}}$)

Не будет большой ошибкой, если $\Delta P_{\text{ц}}$ рассчитывать по формуле для определения потерь давления в цилиндрических каналах:

$$\Delta P_{\text{ц}} = 2 \tau_w l / r,$$

*где l и r - длина и средний радиус центрального литника соответственно
 τ_w - напряжение сдвига на стенке канала, которое находится по кривой течения при рассчитанной для канала литника скорости сдвига*

$$\dot{\gamma} = 4Q / (\pi r^3),$$

где Q - объемная скорость течения,

Потери давления в разводящем канале $\Delta P_{\text{р}}$ рассчитываются по той же формуле с использованием эквивалентного радиуса канала ($r_{\text{э}}$):

$$r_{\text{э}} = \sqrt{2 f^2 / (\pi * \Pi)}$$

где f и Π - площадь и периметр поперечного сечения канала

Если в форме несколько разводящих литниковых каналов, то при определении скорости сдвига расход определяется как $V_{отл} / \text{число каналов}$.

Потери давления во впускных каналах ($\Delta P_{вп}$) рассчитывают по формуле:

$$\Delta P_{вп} = \sigma_{вп} \Pi_{вп} / f_{вп},$$

где $\Pi_{вп}$, $f_{вп}$ - периметр и площадь поперечного сечения впускного канала;
 $\sigma_{вп}$ - усилие сдвига на стенке впускного канала.

Значение $\sigma_{вп}$ находится по графику зависимости

$$\lg \sigma_{сдв} = f(\lg \gamma_{сдв}^{\bullet})$$

Для определения потерь давления в формующей полости ($\Delta P_{ф}$) используется

формула:
$$\Delta p_{ф} = \frac{2L\tau_m}{\delta(1 - \sqrt{t_{вп}/t_{охл}})}$$

где L - длина пути течения расплава от впуска до наиболее удаленной точки формующей полости;

δ - высота формующей полости, принимаемая равной толщине изделия;

τ_m - предельное напряжение сдвига на смачиваемой поверхности формующей полости, рассчитываемое по результатам опытов на литьевой форме со спиральным каналом ;

$t_{вп}$ - время впрыска расплава в формующую полость, определяемая по объемной скорости впрыска с учетом числа одновременно заполняемых полостей;

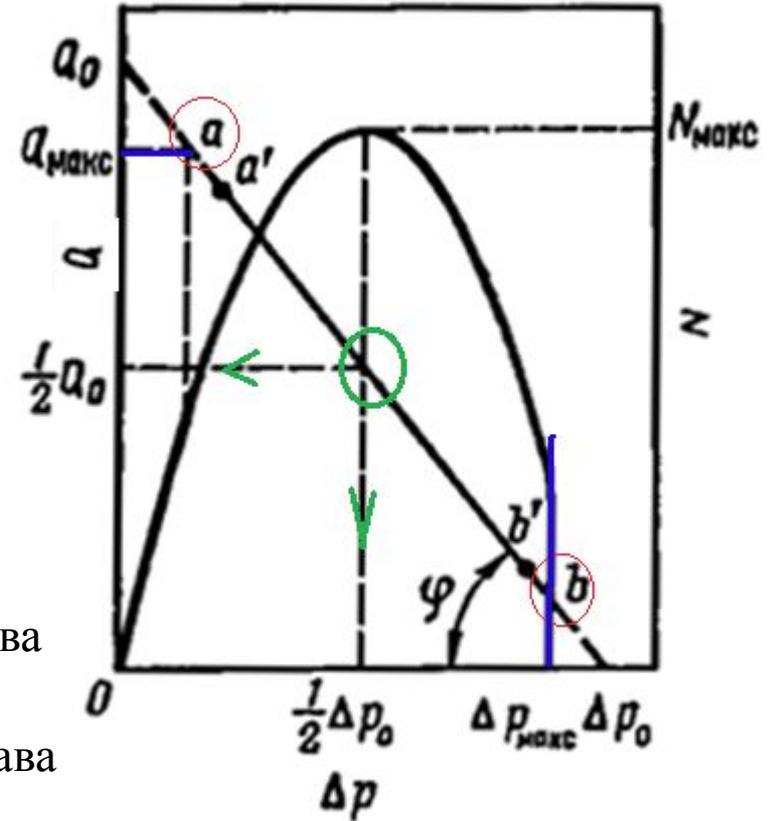
$t_{охл}$ - время охлаждения изделия до температуры извлечения из формы.

Инжекционная характеристика литьевой машины

Её получают путем построения графиков зависимости скорости впрыска (Q) от давления расплава, измеренного на выходе из сопла литьевой машины ($Q - \Delta P$)

Экспериментальные данные аппроксимируется отрезком прямой линии $a' - b'$, имеющим угол наклона φ . При свободном выдавливании расплава в атмосферу ($\Delta P = 0$) находится максимальная скорость впрыска ($Q_{\text{макс}}$); если выход для расплава перекрыт ($Q = 0$), то измеряется максимальное давление за соплом $\Delta P_{\text{макс}}$.

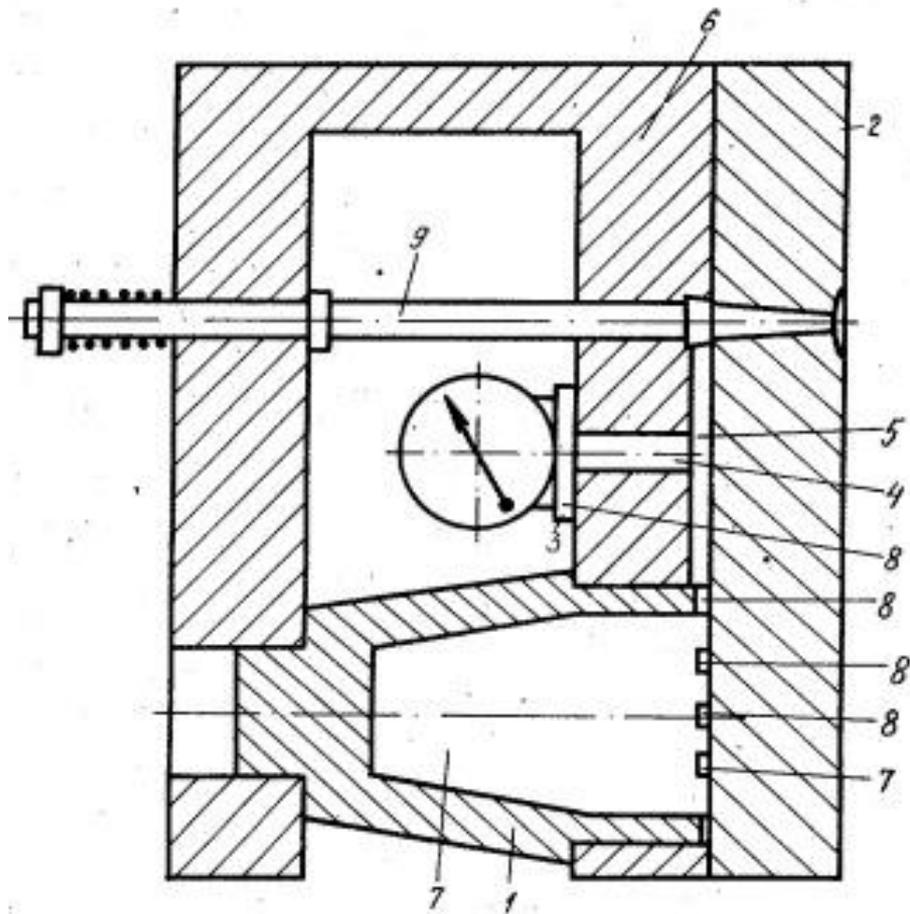
Проведя через точки $(0; Q_{\text{макс}})$ и $(\Delta P_{\text{макс}}; 0)$ параллельные осям координат прямые, найдем точки a и b , вблизи которых получить экспериментальные данные очень сложно. Таким образом, инжекционная характеристика литьевой машины представляется в виде прямой $a - b$ и двух прямых отрезков, параллельных осям координат.



При регулировании задаваемых на машине технологических параметров соответственно изменяется ИХ.

Для расчета литьевых форм - характеристика, получаемая при заданных на ТПА максимальных значениях ΔP и Q

Схема устройства для определения инжекционной характеристики литейной машины



- 1 – подвижная полуформа
- 2 – неподвижная полуформа
- 3- датчик давления с измерительным штоком
- 4 – измерительный шток
- 5 – канал литниковой системы
- 6 – подвижная плита
- 7 – рабочая полость для сбора расплава
- 8 – дросселирующие каналы
- 9 - толкатель

Литьевой блок со сменными капиллярами имитирует сопротивление литниковой системы и полости формы.

Сопротивление течению изменяют путем замены капилляров.

Объемную скорость впрыска определяли по массе продавленного через капилляр материала.

Давление измеряют за соплом литьевой машины.

Размеры литниковой втулки и камеры замера давления были выбраны таким образом, чтобы не создавать большого сопротивления течению; положение датчика давления (смещение относительно литниковой втулки) обеспечивает замер давления без динамической составляющей.

Энергию, которая затрачивается на продавливание расплава через капилляр, рассчитывали по формуле: $N = p \cdot Q$ (Q - объемный расход расплава, $\text{см}^3/\text{с}$;

p - давление расплава, МПа).

Предельную мощность для исследуемого инъекционного узла получали при максимальных давлении в гидроцилиндре и скорости впрыска.

$$Q = Q_0 - Q_0 * \Delta P / \Delta P_0$$

$$N = - (Q_0 / \Delta P_0) \Delta P^2 + Q_0 * \Delta P.$$

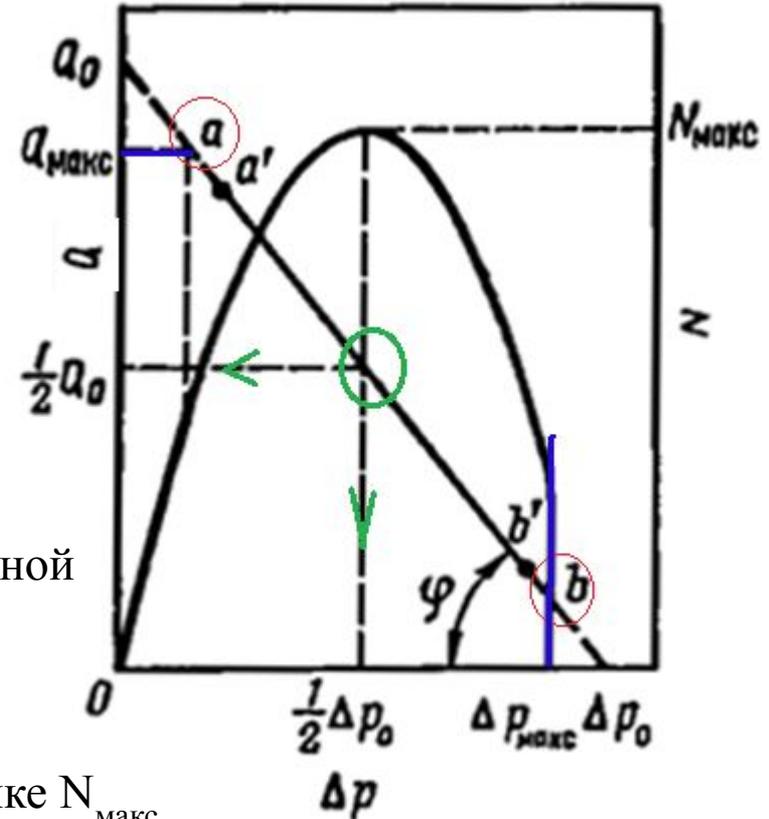
Максимальное значение N равно $1/4 Q_0 * \Delta P_0$.
Графически функция $N = f(Q, \Delta P_0)$ представляет собой параболу (см. рис.) с вершиной в точке $N_{\text{макс}}$.

Опуская из вершины параболы перпендикуляр на горизонтальную ось, находим на инжекционной характеристике точку, соответствующую максимальной мощности впрыска.

С увеличением угла наклона (φ) точка $N_{\text{макс}}$ смещается влево, а с уменьшением - вправо.

Во втором случае величина перепада давления в точке $N_{\text{макс}}$ равная $1/2 \Delta P_0$, будет возрастать, и когда она достигнет значения $\Delta P_{\text{макс}}$ (при $\text{tg } \varphi = 1/2 Q_0 / \Delta P_{\text{макс}}$), точка, соответствующая максимальному значению мощности впрыска, совпадает с крайней правой точкой инжекционной характеристики (точкой b).

При дальнейшем уменьшении точка максимума выходит за пределы экспериментальных данных, и наибольшая мощность впрыска наблюдается также в точке b .

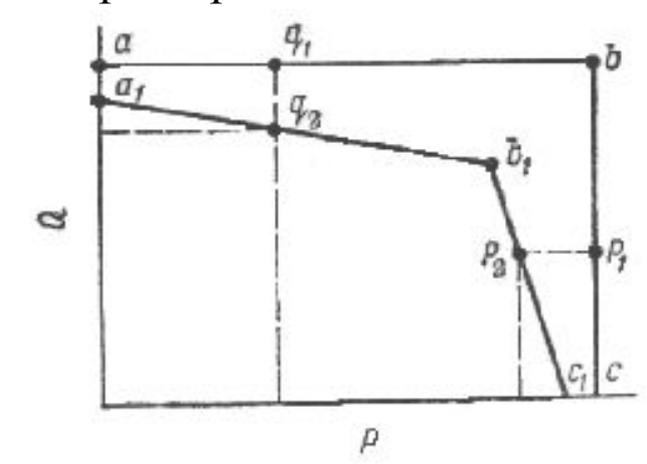
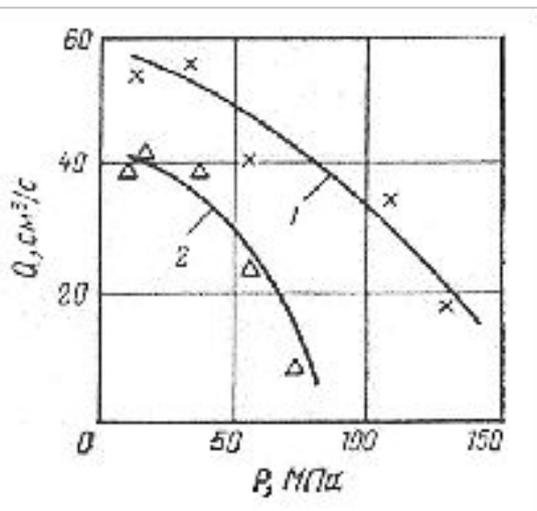


Если режим процесса соответствует левой ветви параболы, то с возрастанием сопротивления в форме N увеличивается.

Справа от $N_{\text{макс}}$ повышение сопротивления течению сопровождается снижением мощности впрыска. Вероятно, при малом ($\text{tg } \varphi < 1/2 Q_0 / \Delta P_{\text{макс}}$) реализуемая мощность всегда возрастает с повышением преодолеваемого сопротивления, если оно не превышает $\Delta P_{\text{макс}}$. При $\Delta p > \Delta P_{\text{макс}}$ течение становится невозможным и продавливание расплава прекращается.

Для стадии заполнения такая инжекционная характеристика является наиболее целесообразной.

Зависимость объемного расхода от давления литья



Инжекционные характеристики ТПА
KuASy 25/32 новой (1) и после 2 лет эксплуатации