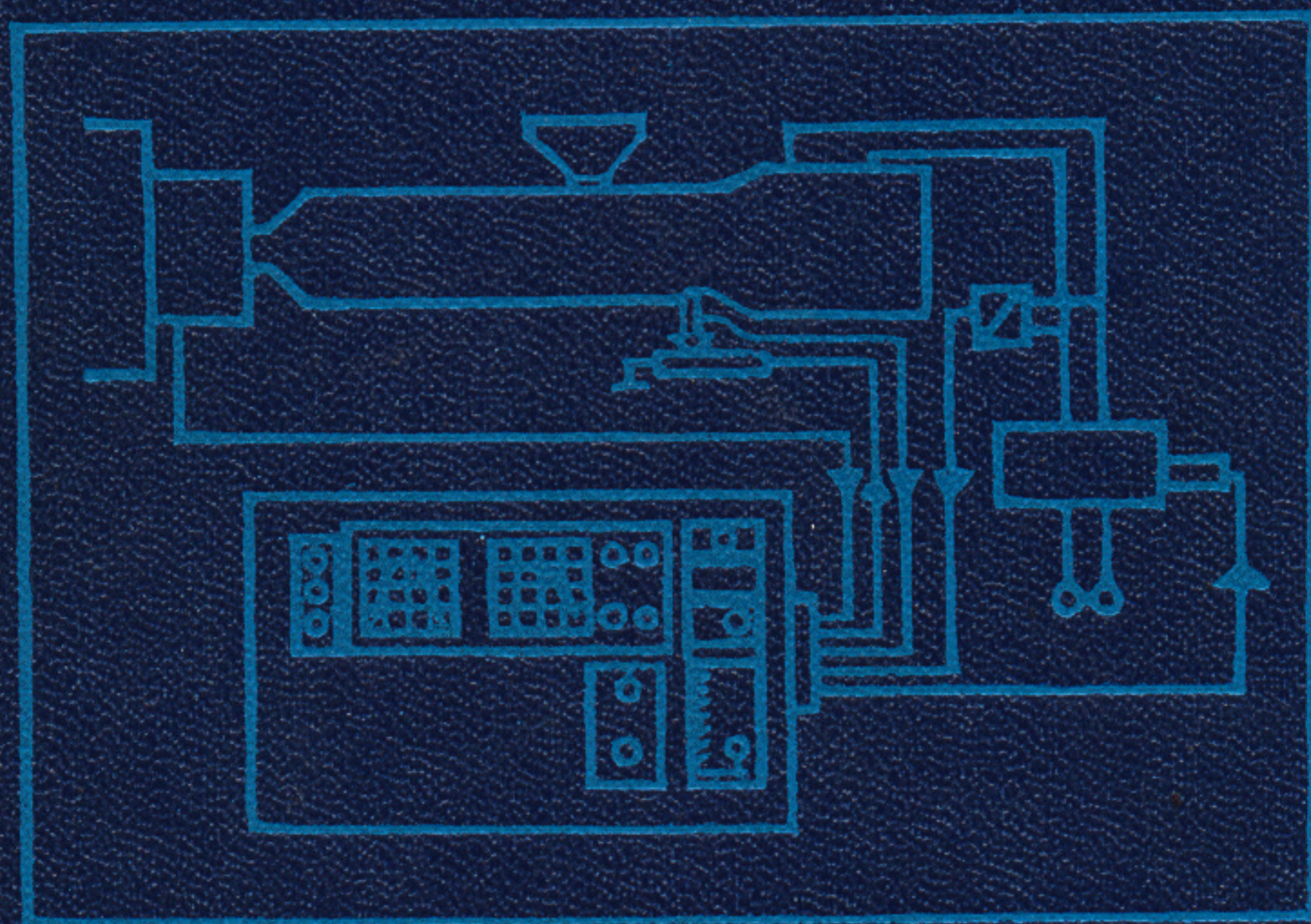


Калинчев Э.Л., Калинчева Е.И., Саковцева М.Б.

# ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПЛАСТМАСС ПОД ДАВЛЕНИЕМ



Калинчев Э.Л., Калинчева Е.И., Саковцева М.Б.

---

# **ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПЛАСТМАСС ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

Расчет и конструирование



МОСКВА

«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

1985

Рецензент канд. техн. наук *И. Д. Симонов-Емельянов*

**Калинчев Э. Л., Калинчева Е. И., Саковцева М. Б.**

**К17** Оборудование для литья пластмасс под давлением: Расчет и конструирование — М.: Машиностроение, 1985. — 256 с., ил.  
В пер.: 1 р. 40 к.

Дано описание разнообразного литейного оборудования, изготавливаемого отечественными и зарубежными предприятиями. Подробно изложены процессы переработки пластмасс под давлением. Приведены расчеты параметров литейных машин и конструкций их инжекционных и прессовых узлов. Указаны методы расчета производительности отдельных машин, участков и цехов, а также методы сравнения литейного оборудования по комплексу показателей. Большое внимание уделено разработке систем автоматического управления литейными машинами.

Для инженерно-технических работников, занимающихся расчетом, проектированием и эксплуатацией литейных машин в различных отраслях машиностроения.

К 2801020000-518  
038 (01)-85 290-86

ББК 35.71  
6П5

**Эрик Леонидович Калинчев,  
Елизавета Ивановна Калинчева,  
Марина Борисовна Саковцева**

### **ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПЛАСТМАСС ПОД ДАВЛЕНИЕМ. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ**

Редактор А. В. Почтарева  
Художественный редактор С. С. Водниц  
Обложка художника М. Н. Кузминой  
Технический редактор Ф. П. Мельниченко  
Корректор Т. В. Багдасарян

ИБ № 3875

Сдано в набор 22.02.85. Подписано в печать 14.11.85. Т-18794. Формат 60×90<sup>1/16</sup>.  
Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ.  
л. 16,0. Усл. кр.-отт. 16,0. Уч.-изд. л. 19,7. Тираж 6000 экз. Заказ 63. Цена 1 р. 40 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение»,  
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени  
Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгения Соколовой  
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

© Издательство «Машиностроение», 1985 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Литье под давлением — один из наиболее распространенных способов изготовления изделий из пластмасс. Это объясняется большой универсальностью способа и литейных машин, высокой производительностью машин и высокой степенью их механизации и автоматизации.

Увеличение объемов производства пластмасс и применения их в различных отраслях народного хозяйства требует совершенствования литейных машин, что достигается оптимизацией их параметров (главный фактор повышения технико-экономических показателей машин), а также внедрением на машинах современных средств управления процессом литья. На современном этапе развития это может базироваться только на фундаментальных знаниях о процессах литья пластмасс под давлением.

Авторы книги в течение многих лет занимались теоретико-экспериментальным изучением процессов литья пластмасс под давлением и на этой основе разработали подходы к расчету и конструированию литейных машин, основанные на знании механизма формования и математическом описании физических и физико-химических процессов, протекающих при литье пластмасс.

В книге изложены теоретические основы, физические процессы литья и их математическое описание с учетом полного комплекса технологических свойств пластмасс, особенностей конструкции машины и оснастки. Впервые изложены теоретические основы метода разработки параметров литейных машин: дан системный подход к анализу параметров, приведены методы расчета оптимальных параметров машин и рациональной оснастки с учетом особенностей процессов литья и свойств пластмасс, методы оптимизации параметров машин и метод сравнения машин по параметрам, методы расчета производительности производственных участков.

В книге рассмотрены основные конструктивные решения прессовых и инжекционных узлов литейных машин и методы их расчета и конструирования. Показано действие промышленных роботов в литейном процессе. Отражена существенная роль разработки автоматического управления технологическим процессом литья в увеличении производительности переработки пластмасс литьем под давлением, в повышении качества и стабильности размеров и свойств получаемых изделий.

В книге изложены технологические принципы автоматического управления процессом литья, основанные на управлении как механизмом процессов формования, так и физико-химическими процессами формования структур, влияющих на качественные показатели изделий. Проанализированы системы автоматического управления технологическими параметрами и отдельными цикловыми операциями, изложены технологические основы разработки самонастраивающихся автоматических систем управления.

Отзывы и замечания по содержанию книги просьба направлять по адресу: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Издательство «Машиностроение».

- $a$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $B$  — быстроходность;  
 $V$  — влажность, %;  
 $C_v$  — удельная теплоемкость при постоянном объеме,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  
 $\gamma$  — деформация при сдвиге;  
 $\dot{\gamma}$  — скорость сдвига,  $\text{с}^{-1}$ ;  
 $\delta$  — толщина слоя,  $\text{м}$ ;  
 $E$  — энергия активации течения,  $\text{Дж}/\text{моль}$ ;  
 $E$  — модуль упругости,  $\text{Па}$ ;  
 $\epsilon_p$  — относительное удлинение при разрыве, %;  
 $F$  — сила, усилие,  $\text{Н}$ ;  
 $F_0$  — критерий Фурье;  
 $g$  — главный вектор массовых сил,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  
 $H$  — высота, ход, перемещение,  $\text{м}$ ;  
 $h$  — толщина, глубина,  $\text{м}$ ;  
 $\eta_N(T, P, V, \bar{M})$  и  $\eta_{\dot{\gamma}}(T, P, V, \bar{M})$  — ньютоновская  $N$  и эффективная при скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  вязкости полимера с молекулярной массой  $\bar{M}$  при температуре  $T$ , давлении  $P$  и влажности  $V$ ,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  
 $\theta_{\dot{\gamma}}(T, P, V, \bar{M})$  — характерное время релаксации полимера с молекулярной массой  $\bar{M}$  при скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , температуре  $T$ , давлении  $P$  и влажности  $V$ ,  $\text{с}$ ;  
 $\bar{\theta}$  — относительная температура;  
 $K$  — константа релаксационного процесса;  
 $L, l, B, D(d), R(r)$  — длина, ширина, диаметр, радиус,  $\text{м}$ ;  
 $L_{кр}$  — удельная теплота кристаллизации,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  
 $\bar{M}$  — молекулярная масса полимера;  
 $M_{кр}$  — крутящий момент,  $\text{Н}\cdot\text{м}$ ;  
 $m$  — масса,  $\text{кг}$ ;  
 $m_0$  — константа реологического уравнения в форме степенного закона,  $\text{Па}\cdot\text{с}^n$ ;  
 $N_{в.р}$  — мощность,  $\text{Вт}$ ;  
 $n$  — показатель степени в степенном законе течения (индекс течения); частота вращения,  $\text{об}/\text{мин}$ ;  
 $\text{ПТР}$  — показатель текучести расплава,  $\text{г}/10 \text{ мин}$ ;  
 $\pi$  — постоянная уравнения состояния,  $\text{Па}$ ;  
 $P$  и  $\Delta P$  — давление и перепад давлений,  $\text{Па}$ ;  
 $\rho, Q$  — плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , объемный расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $q, q_V$  и  $q_g$  — удельный тепловой поток, удельное тепло за счет внутренних источников и диссипативных выделений,  $\text{Вт}/\text{м}$ ;  
 $q_{гд}, q_H$  и  $q_{пл}$  — производительность гидродвигателя,  $\text{м}^3/\text{с}$ , подача насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ , пластикационная производительность,  $\text{кг}/\text{ч}$ ;  
 $R$  — газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ ;  
 $R'$  — постоянная уравнения состояния,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  
 $S$  — площадь,  $\text{м}^2$ ;  
 $\sigma_p$  и  $\sigma_t$  — разрушающее напряжение и предел текучести при растяжении,  $\text{Па}$ ;  
 $T_c, T_{пл}, T_{кр}, T_{ф}, T_{\delta}, T_{ц}$  и  $T_o$  — температура стеклования, плавления, кристаллизации, формующего элемента, слоя, по которому течет расплав в формующем элементе, в центральном слое канала формующего элемента и начальная температура материала,  $\text{К}$ ;  
 $t$  — время,  $\text{с}$ ;  
 $\tau$  — напряжение сдвига,  $\text{Па}$ ;  
 $V$  — скорость,  $\text{м}/\text{с}$ ;  
 $v$  — объем,  $\text{м}^3$ ;  
 $\omega$  — постоянная уравнения состояния,  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЛИТЬЯ ПЛАСТМАСС ПОД ДАВЛЕНИЕМ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Основная задача переработки пластмасс литьем под давлением — получение высококачественных изделий (по внешнему виду, прочностным и деформационным показателям, размерной стабильности и пр.) при максимальной производительности. Выполнение этих требований определяется свойствами пластмасс, условиями переработки, конструктивными и технологическими возможностями литьевых машин [1, 5, 11].

Условия переработки зависят от свойств пластмасс, технологических параметров переработки, а также от технических и технологических показателей литьевых машин. На современном этапе развития производства дальнейшее повышение качества литьевых изделий и увеличение производительности переработки возможно в результате создания машин, параметры и конструкция которых учитывают специфику свойств перерабатываемых пластмасс, особенности литьевого процесса и обеспечивают различные технологические режимы литья, позволяющие получать изделия с требуемыми свойствами, а также в результате автоматизации управления технологическим процессом литья.

Разработка современного высокопроизводительного оборудования основывается на знаниях о механизме, особенностях и закономерностях процессов (гидродинамических, тепловых, формирования надмолекулярной структуры пластмасс и др.), протекающих при литье, а также на математическом описании, адекватно моделирующем литьевые процессы с учетом полного комплекса технологических свойств пластмасс. Математическое описание литьевых процессов позволяет создавать современные средства автоматического управления литьевыми машинами — числовое программное управление, которое стабилизирует все основные технологические параметры процесса, и системы самонастройки технологических параметров по заданному критерию качества изделий.

### 1.1 НАЗНАЧЕНИЕ ЛИТЬЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Литьем под давлением изготавливают изделия из пластмасс разнообразной конфигурации и ассортимента; по массе — от десятых долей грамма до 200 кг, по толщине стенки — от десятых долей миллиметра до нескольких десятков сантиметров. Этим методом

перерабатывают большой ассортимент пластмасс (несколько десятков видов) с различными физическими, химическими и технологическими свойствами. Поэтому литьевые машины создают универсальными по параметрам для изготовления широкого ассортимента изделий и специализированными по конструкциям для переработки разных пластмасс. Универсальность машин по параметрам достигается созданием широкой гаммы типоразмеров машин, различающихся технологическими параметрами и технико-экономическими показателями.

Каждый типоразмер машины предназначен для изготовления определенного ассортимента изделий по массе и размерам. Специализация литьевых машин по пластмассам достигается созданием нескольких конструкций отдельных узлов машин (например, шнекового пластилятора: цилиндра, шнека и его наконечника) и оснастки для переработки пластмасс разных групп (пластмассы по свойствам объединяют в группы), а также оснащением машины устройствами для осуществления дополнительных режимов работы для переработки пластмасс определенной группы и специализированным вспомогательным оборудованием.

Специализация литьевых машин по изготавливаемым изделиям проводится при большом объеме выпуска изделий, например, создают специальные литьевые машины для изготовления авторучек, обуви, фитингов, труб, бутылок и т. д. В числе изготавливаемых деталей встречаются нехарактерные, например, имеющие большую площадь (размеры) при малом объеме отливки или, наоборот, большой объем отливки при малой площади (толстостенные детали), детали со сложной арматурой и др. В этих случаях используют специальные модифицированные машины. Модификация достигается комбинацией прессовых и инжекционных узлов машин различных типоразмеров. При этом общее число типоразмеров машин увеличивается по сравнению с основным в 2—3 раза.

Переработка пластмасс литьем под давлением заключается в размягчении пластмассы до вязкотекучего состояния (в котором она приобретает способность пластически деформироваться, т. е. течь в проходных каналах сопла, литниковой системы и формы) в нагревательном (пластикационном) цилиндре машины и в последующей инжекции (перемещении или впрыске) под действием приложенного внешнего давления горячего расплава в охлаждаемую форму (для термопластов), в которой материал приобретает требуемую конфигурацию и затвердевает, при этом фиксируется форма изделий. Температура цилиндра и формы регулируется и изменяется в зависимости от свойств перерабатываемой пластмассы и режима переработки, обеспечивающего получение изделий с необходимыми эксплуатационными свойствами.

Литьевая машина состоит из следующих основных узлов: инжекционного, прессового, привода и управления (рис. 1.1, а). Инжекционный узел (рис. 1.1, б) включает бункер 9 для подачи пластмассы в машину, нагревательный (инжекционный) цилиндр 8, шнек 7, сопло 6, гидроцилиндр впрыска 12 с поршнем 11 для по-

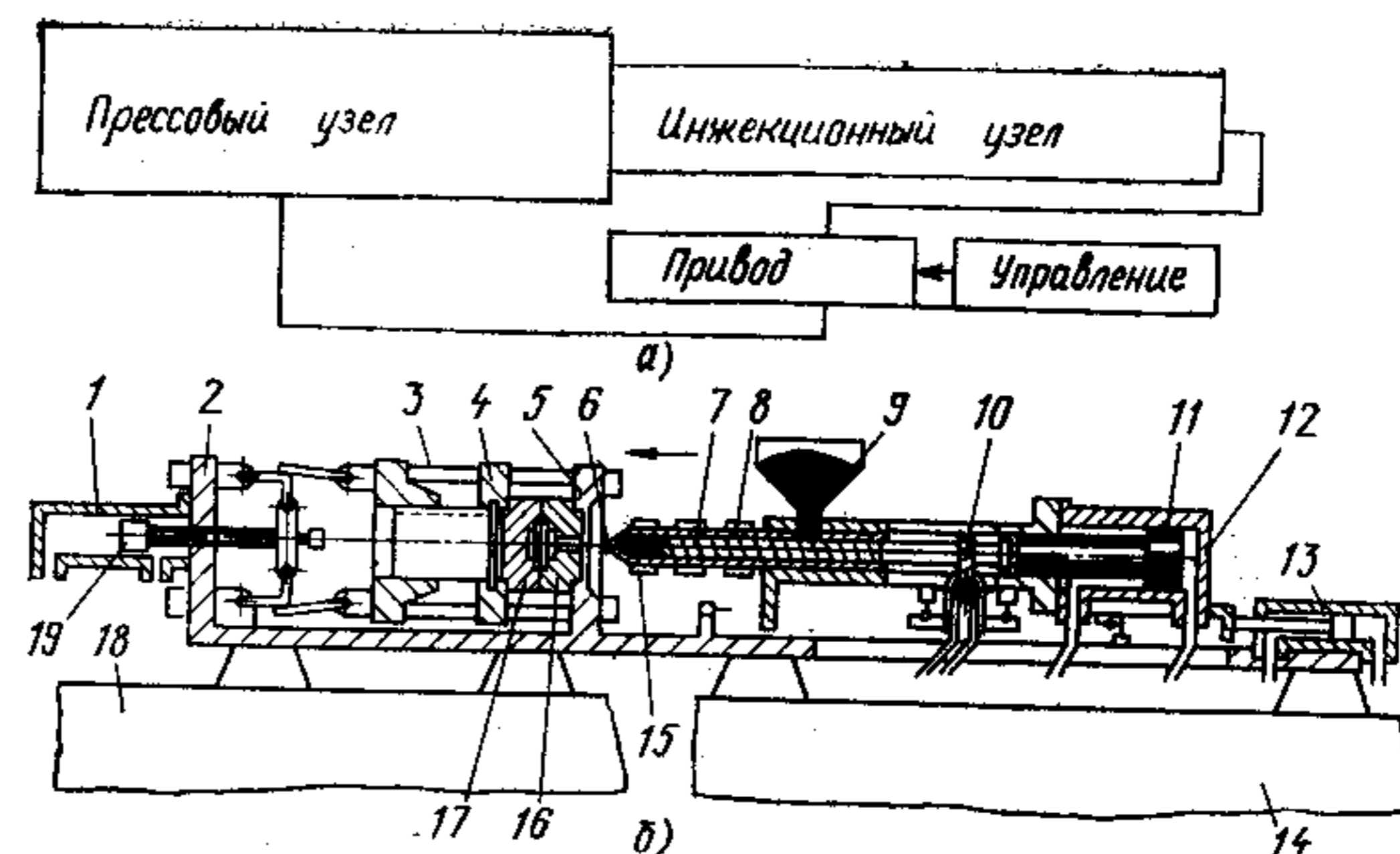


Рис. 1.1. Литьевая машина со шнековой пластикацией:  
а — узлы машины; б — принципиальная схема

ступательного движения шнека при впрыске, привод 10 вращательного движения шнека при пластификации, гидроцилиндр 13 для перемещения инжекционного узла, станину 14. Основное назначение инжекционного узла: пластикация пластмассы (размягчение и нагревание до требуемой температуры), впрыск (перемещение) подготовленной при пластикации дозы расплава в форму под действием развиваемого в гидроцилиндре впрыска давления, создание давления формования регулированием давления в гидроцилиндре впрыска.

Инжекционный узел имеет следующие параметры: пластикационная производительность  $q_{пл}$ , диапазон температур пластикационного цилиндра  $T_{н.д. max} - T_{н.д. min}$ , частота вращения шнека  $n$ , объемная скорость впрыска  $Q_{впр}$  (время впрыска  $t_{впр}$ ), диаметр шнека  $D$ , ход шнека  $H_{ш}$ , противодействие пластикации  $P_{пл}$ , давление литья  $P_{л}$ .

Прессовый узел включает переднюю плиту 5 с полуформой 16, подвижную плиту 4 с полуформой 17, колонны 3, по которым перемещается подвижная плита, заднюю неподвижную плиту 2 с гидроцилиндром 1 смыкания с гидропоршнем 19, станину 18.

Основное назначение прессового узла: обеспечение возможности изготовления изделий разных размеров в пределах определенного ассортимента, перемещение подвижной плиты вперед для смыкания полуформ, создание усилия запирания формы для предотвращения ее раскрытия под действием давления, возникающего в форме при формовании пластмассы, перемещение подвижной плиты назад для раскрытия полуформы.

Прессовый узел имеет следующие параметры: площадь литья  $S$ , ход подвижной плиты  $H_x$ , высота формы  $H_{ф}$ , расстояние между колоннами в свету, максимальное расстояние между плитами  $H_{пл}$ , регулирование расстояния между плитами  $h_p$ , усилие запирания

формы  $F$ , усилие раскрытия формы  $F_p$ , быстроходность  $B$ , жесткость  $C$ .

Назначение привода — механизация основных технологических и вспомогательных операций, обеспечение требуемых параметров и режимов литья. Назначение управления — обеспечение выполнения технологического процесса в требуемой последовательности при заданных технологических условиях и различных режимах литья, стабилизация и оптимизация параметров процесса.

Литьевая машина работает следующим образом. Пластмасса гранулированная или порошкообразная из бункера поступает в загрузочную часть нагревательного цилиндра, захватывается вращающимся шнеком и транспортируется по цилиндру в его переднюю часть. При продвижении пластмасса пластицируется (размягчается) за счет тепла от внешних нагревателей  $15$  и тепла, выделяющегося при ее деформировании в витках шнека. Накапливаемый в передней части цилиндра расплав отодвигает шнек назад — возникает противодавление при пластикации. Под действием давления, развиваемого в гидроцилиндре смыкания, подвижная плита прессового узла перемещается вперед и полуформы смыкаются. После закрытия формы с заданным усилием запирающий инжекционный цилиндр под действием усилия, развиваемого гидроцилиндром  $13$ , перемещается вперед и сопло прижимается к форме. Далее под действием усилия, развиваемого гидроцилиндром впрыска, шнек движется вперед, и подготовленная при пластикации доза расплава подается в форму. Пластмасса в форме в течение определенного промежутка времени выдерживается под внешним давлением. При выдержке под внешним давлением из инжекционного цилиндра в форму поступают новые порции расплава для компенсации усадки пластмассы в результате охлаждения. По окончании выдержки под давлением сопло отводится от формы. Вращение шнека может начаться сразу по окончании выдержки под давлением или по истечении некоторого времени в зависимости от режима литья. По окончании охлаждения пластмассы в форме подвижная плита под действием давления, развиваемого в штоковой полости гидроцилиндра  $1$ , отходит назад и форма раскрывается. Отлитая деталь извлекается из формы.

Конструкция одноцилиндрового инжекционного узла со шнековой пластикацией (см. рис. 1.1, б) в настоящее время наиболее распространена. При такой конструкции процессы пластикации и впрыска разделены. Это так называемая конструкция с предварительной пластикацией. На двухцилиндровых машинах с предварительной пластикацией пластмасса пластицируется в отдельном нагревательном пластикационном цилиндре  $2$  (рис. 1.2, а, б). Из этого цилиндра расплавленная пластмасса поступает в инжекционный цилиндр  $1$ , а оттуда под действием поршня впрыскивается в форму. Предварительная пластикация пластмассы может осуществляться в отдельном цилиндре с поршнем (см. рис. 1.2, а) или со шнеком (см. рис. 1.2, б). На машинах без предварительной пластикации поршневого типа при движении поршня пластмасса продвигается вдоль цилиндра, при этом нагревается до требуемой тем-

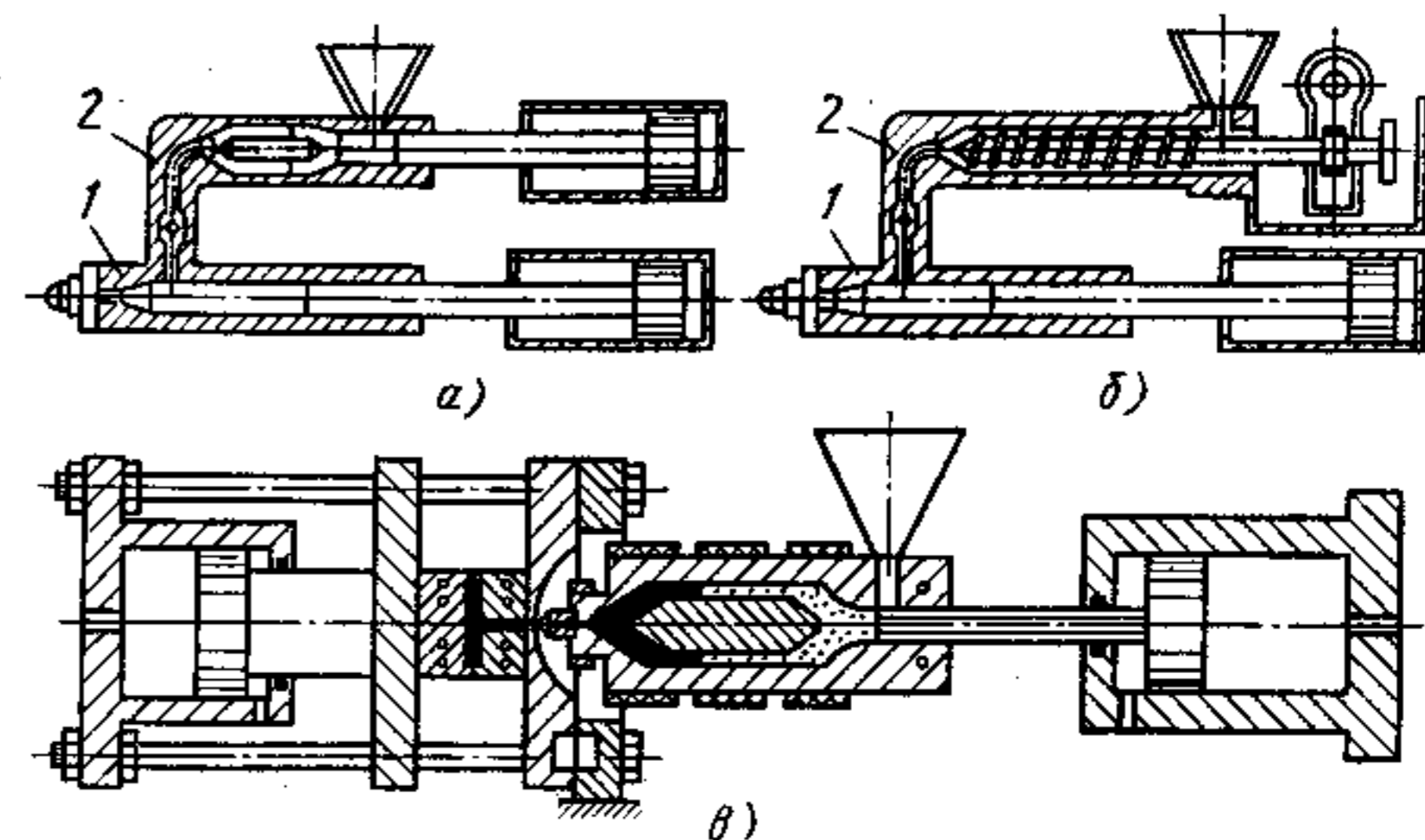


Рис. 1.2. Схемы инжекционного узла литьевой машины с предварительной поршневой (а) и шнековой (б) пластикацией и без предварительной пластикации поршневого типа (в)

пературы и под давлением впрыскивается в замкнутую форму (рис. 1.2, в).

Прессовые узлы литьевых машин выполняют горизонтальными и вертикальными. По конструкции их можно подразделить на простые (механизмы перемещения и запирающие формы совмещены) и заблокированные (механизмы перемещения и запирающие формы разделены). Механизмы перемещения формы по конструктивным признакам делятся на гидравлические (пневматические), рычажные и электромеханические, а механизмы запирающие формы — на гидравлические и рычажные.

Увеличение объема потребления пластмасс во всех отраслях народного хозяйства предусматривает совершенствование литьевых машин. На современном этапе развитие и совершенствование литьевых машин идет по следующим направлениям: увеличение объема вмещения отливаемых деталей (свыше 20 л); оптимизация параметров машин; совершенствование конструкции рабочих органов и оснастки с учетом особенностей процесса литья и специфики свойств пластмасс для улучшения технологических возможностей машин; внедрение систем автоматического управления технологическим процессом литья с обратной связью и с применением ЭВМ для обеспечения возможности реализации различных режимов литья, повышения и стабилизации качества отливаемых деталей; повышение производительности оборудования увеличением его быстроходности, интенсификацией процесса литья, внедрением многопозиционных машин; разработка новых литьевых способов переработки пластмасс; увеличение надежности и снижение энергозатрат на единицу выпускаемой продукции; увеличение качества комплектующих гидро- и электропривода (снижение массы, уменьшение размеров, применение аппаратов с дистанционным управлением и др.).

Литьевые процессы можно разделить на процессы пластикации и формования. При пластикации пластмасса в нагревательном

цилиндре разогревается, переходит из твердого в вязкотекучее состояние и приобретает температуру, при которой имеет реологические свойства, обеспечивающие ее легкое формование и при которой образуется структура пластмассы, обеспечивающая ее хорошие эксплуатационные свойства [4].

Основные требования, предъявляемые к процессам пластикации, заключаются в обеспечении требуемой температуры расплава при максимальной однородности по объему и в обеспечении минимального содержания деструктированного материала в подготовленной для формования порции расплава. Для выполнения этого требования подбирают конструкцию инжекционного узла и режим пластикации. Процессы пластикации в инжекционных цилиндрах поршневого и шнекового типов существенно отличаются. Пластикация в инжекционном цилиндре поршневого типа осуществляется главным образом за счет теплопередачи от внешних источников тепла. Проходя по цилиндру, пластмасса незначительно перемешивается и поэтому имеет заметные температурные колебания в поперечном сечении порции и по ее длине. В шнековых пластикаторах пластмасса пластицируется в результате теплопередачи от внешних нагревателей цилиндра и под действием внутреннего тепла, выделяющегося при его сдвиговом деформировании в каналах шнека. В шнековых пластикаторах пластмасса подвергается интенсивному перемешиванию. Это выравнивает температуру по сечению подготовленной порции пластмассы. Однако некоторая температурная неоднородность по длине порции, подготовленной для впрыска, сохраняется.

При пластикации пластмасс протекают следующие физические процессы: нагревание, плавление, изменение объема пластмассы при воздействии температуры (тепловое расширение), сжатие расплава и уплотнение гранул или порошка (в результате изменения глубины канала шнека при постоянном шаге или изменения шага при постоянной глубине и под действием внешнего давления), сдвиговое деформирование пластмассы. Могут протекать процессы деструкции. Процессы пластикации определяются главным образом теплофизическими свойствами пластмасс: параметрами, определяющими процесс нагревания (теплопроводность, температуропроводность, удельная теплоемкость); параметрами, определяющими процесс плавления; параметрами объемного расширения и сжатия, определяющими процессы изменения объема пластмасс при воздействии температуры и при сжатии, а также объемными характеристиками сыпучих материалов (насыпная плотность, гранулометрический состав и др.), определяющими процессы уплотнения гранул или порошка. Частично на процессы пластикации влияет вязкость перерабатываемых пластмасс.

Пластикация — предварительная операция и от нее зависит важный технологический параметр — температура пластмассы, поступающей на формование, и температурная однородность. Температура определяет свойства расплава (реологические), которые, в свою очередь, определяют процессы формования (гидродинамиче-

ские, образование структуры пластмассы). В связи с этим от процесса пластикации зависит гидродинамика процесса формования и его стабильность, а также качество отливаемых изделий и стабильность их свойств. Процесс пластикации определяет пластикационную производительность литьевой машины (параметр машины).

При формовании пластмассе придается требуемая конфигурация изделия в процессе ее течения (в вязкотекучем состоянии) в замкнутой полости формирующего инструмента (формы) под действием внешнего фактора (давления). Приобретенная конфигурация далее фиксируется в результате перевода пластмассы в твердое состояние за счет охлаждения (для термопластов).

При формировании пластмасс литьем под давлением протекают разнообразные физические процессы: деформирование пластмасс (при заполнении литниковой системы и формы и при последующей подпитке формы после ее заполнения), сопровождающееся развитием обратимой пластической и высокоэластической деформации, а также ориентацией макромолекулярных цепей в направлении течения материала; релаксационные процессы высокоэластической деформации и ориентации макромолекул (после прекращения течения по окончании заполнения формы); процессы конвективно-кондуктивного теплообмена (при охлаждении после соприкосновения горячей расплава с холодными стенками формы); изменение объема пластмасс при изменении температуры и давления. При формировании протекают сложные физико-химические процессы: стеклование, кристаллизация кристаллизирующихся полимеров и формирование надмолекулярной (физической) структуры пластмасс, которая определяет эксплуатационные свойства изделий.

Процессы формования определяются следующими свойствами: 1) реологическими — вязкостными, определяющими процесс вязкого течения с развитием необратимой пластической деформации; высокоэластическими, определяющими процесс развития и накопления высокоэластической деформации при течении; релаксационными, определяющими процессы релаксации параметров вязкого течения (касательных и нормальных напряжений), высокоэластической деформации и ориентации макромолекул; 2) теплофизическими — параметрами, определяющими процессы охлаждения, стеклования и кристаллизации, объемного расширения и сжатия пластмасс [9].

Процессы формирования надмолекулярной структуры пластмасс зависят от их фундаментальных свойств: молекулярного строения (химического состава и способа соединения атомов в макромолекуле), межмолекулярного взаимодействия, гибкости макромолекул, молекулярных характеристик (молекулярной массы, молекулярно-массового распределения), свободного объема, а также от реологических и теплофизических свойств. На процессы формирования структуры пластмасс существенное влияние оказывают параметры формования (температура материала и формы, давление, скорость и напряжение сдвига при течении, скорость охлаждения).

Процессы формования имеют важное значение. Гидродинамические и теплофизические процессы формования определяют основ-

ные параметры литьевых машин: давление литья, усилие запирания формы, жесткость, пластикационную производительность, зависящую от продолжительности охлаждения изделия, быстроходность. Процессы формирования структуры пластмасс, протекающие при формовании, оказывают определяющее влияние на эксплуатационные свойства изделий. Условие реализации технологических режимов формования для получения изделий с заданными свойствами в зависимости от условий эксплуатации определяет конструктивные особенности литьевых машин.

## 1.2 ПРОЦЕССЫ ФОРМОВАНИЯ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

### 1.2.1. Изменение давления в процессе формования

Формование пластмассы (полимера) начинается с ее поступления в форму. Продвижение расплава пластмассы в проходных каналах сопла, литниковой системы и формы сопровождается образованием в них перепадов давлений. Перепады давлений затрачиваются на вязкое течение в каждом элементе системы сопло—форма и на входные эффекты (например, в сопле), которые обусловлены вязкоупругими свойствами расплава полимеров. По мере продвижения расплава в полости формы перепады давлений возрастают, что приводит к повышению давления в заполняемых частях формы, в литниковой системе, в сопле и на его входе. Вместе с тем растет сопротивление, которое оказывает расплав шнеку или поршню (в зависимости от типа инжекционного цилиндра), перемещающему его в форму. Это приводит к росту давления в гидроприводе. Развиваемое гидроприводом давление через шнек (или поршень) передается на вход в систему сопло—форма.

Изменение давления в цикле формования можно наглядно представить диаграммой давление — время (рис. 1.3). Эта диаграмма иллюстрирует изменение давления в одной из точек формы. При рассмотрении процессов формования полимера правильнее анализировать изменение давления на входе в форму или в какой-либо из точек по ее длине, а не изменение давления, развиваемого шнеком (или поршнем), а также изменение усилия, создаваемого гидроприводом. Давление на входе в форму меньше, чем давление, развиваемое шнеком (или поршнем), причем эта разность существенно зависит от конструкции машины.

В процессе уплотнения гранул при продвижении поршня вперед (участок *a*) сопротивление, которое они ему оказывают, увеличивается. Это приводит к росту давления в гидросистеме машины. При этом создается давление, достаточное для выталкивания мате-

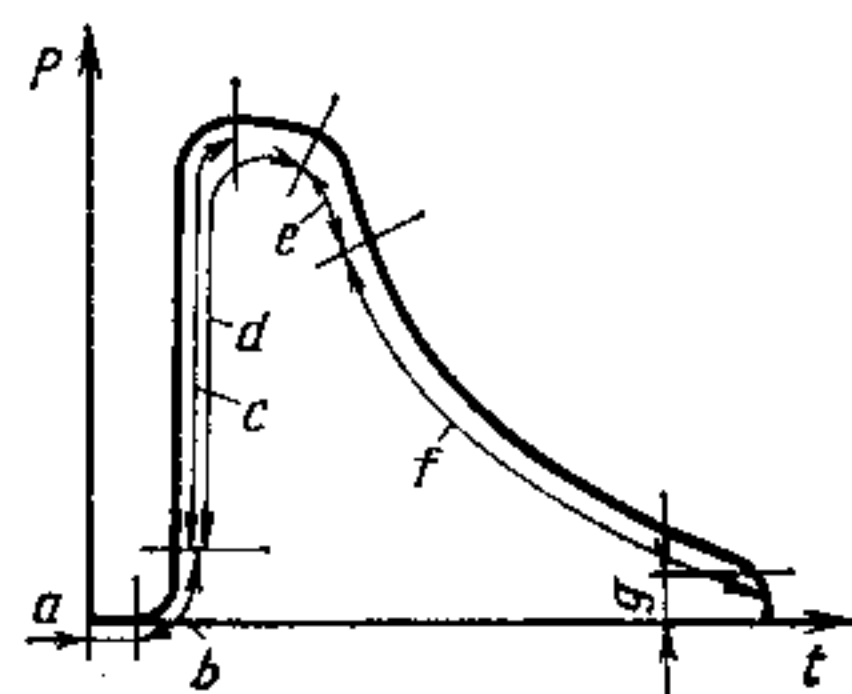


Рис. 1.3. Диаграмма давление  $P$ —время  $t$  для одной точки формы

риала из сопла. Материал начинает заполнять форму. Последовательное заполнение формы (участок *b*) сопровождается повышением давления. После полного заполнения формы объемная скорость течения (объемный расход) материала падает, что вызывает снижение перепадов давлений в сопле, литниковой системе и в форме. Это приводит к увеличению давления в форме (участок *c*). Давление в форме может также возрастать за счет повышения давления в гидроприводе, если в момент заполнения формы оно не достигло установленного значения. Давление в форме увеличивается до значения, зависящего от установленного в гидроприводе давления, свойств перерабатываемой пластмассы, конструкции машины и формы. Горячий расплав поступает в более холодную форму. В результате охлаждения происходит усадка материала. Для компенсации усадки из инжекционного цилиндра в форму поступают новые порции расплава. Материал в форме уплотняется, и осуществляется выдержка его под давлением (участок *d*).

После выдержки материала в форме под давлением поршень отводят в исходное положение, что вызывает спад давления во всех точках формы (участок *e*) вследствие обратного истечения материала. После затвердевания материала в литнике дальнейшее охлаждение материала в форме приводит к понижению давления (участок *f*). Если сопло отводят от материала после того, как он полностью застынет, то спад давления начнется с момента, когда форма изолируется от инжекционного цилиндра (литник застывает). Остаточное давление (участок *g*) — сохраняется к моменту раскрытия формы. Диаграмма на рис. 1.3 построена для процесса, который происходит в форме, установленной на литьевой машине без предварительной пластикации полимера.

Характер изменения давления в различных точках формы по ее длине неодинаков. Поскольку при формовании полимера все процессы, проходящие в форме, изменяются не только во времени, но и в зависимости от положения рассматриваемой точки по отношению к впускному отверстию, изменение процессов при формовании нагляднее можно представить в трехмерных координатах. На рис. 1.4 показано изменение давления в форме в процессе формования полимера. По мере заполнения формы давление на входе в нее и в каждой точке заполненной части формы возрастает. В точке  $a_n$  (время заполнения  $t_1$ ) форма заполнена. Рассечем поверхность, проходящую через кривые  $a_1b_1c_1d_1e_1g_1$ ,  $a_2b_2c_2d_2e_2g_2$  и т. д. плоскостями, параллельными плоскости  $0pl$ ; получим кривые  $b_1b_2b_3b_n$ ,  $c_1c_2c_3c_n$  и т. д. распределения давления в форме в различные моменты времени. Точка  $b_1$  (на входе в форму) соответствует моменту  $t_1$  заполнения формы, точка  $c_1$  (на входе в форму) — моменту  $t_2$  возникновения в форме максимального давления, точка  $e_1$  (на входе в форму) — окончанию времени  $t_3$  выдержки под давлением. Точки  $b_2, c_2, e_2, b_n, c_n, e_n$  соответствуют этим же моментам в других точках формы.

Если эту эпюру рассечь плоскостями, параллельными плоскости  $0pt$ , то получим кривые изменения давления в процессе фор-



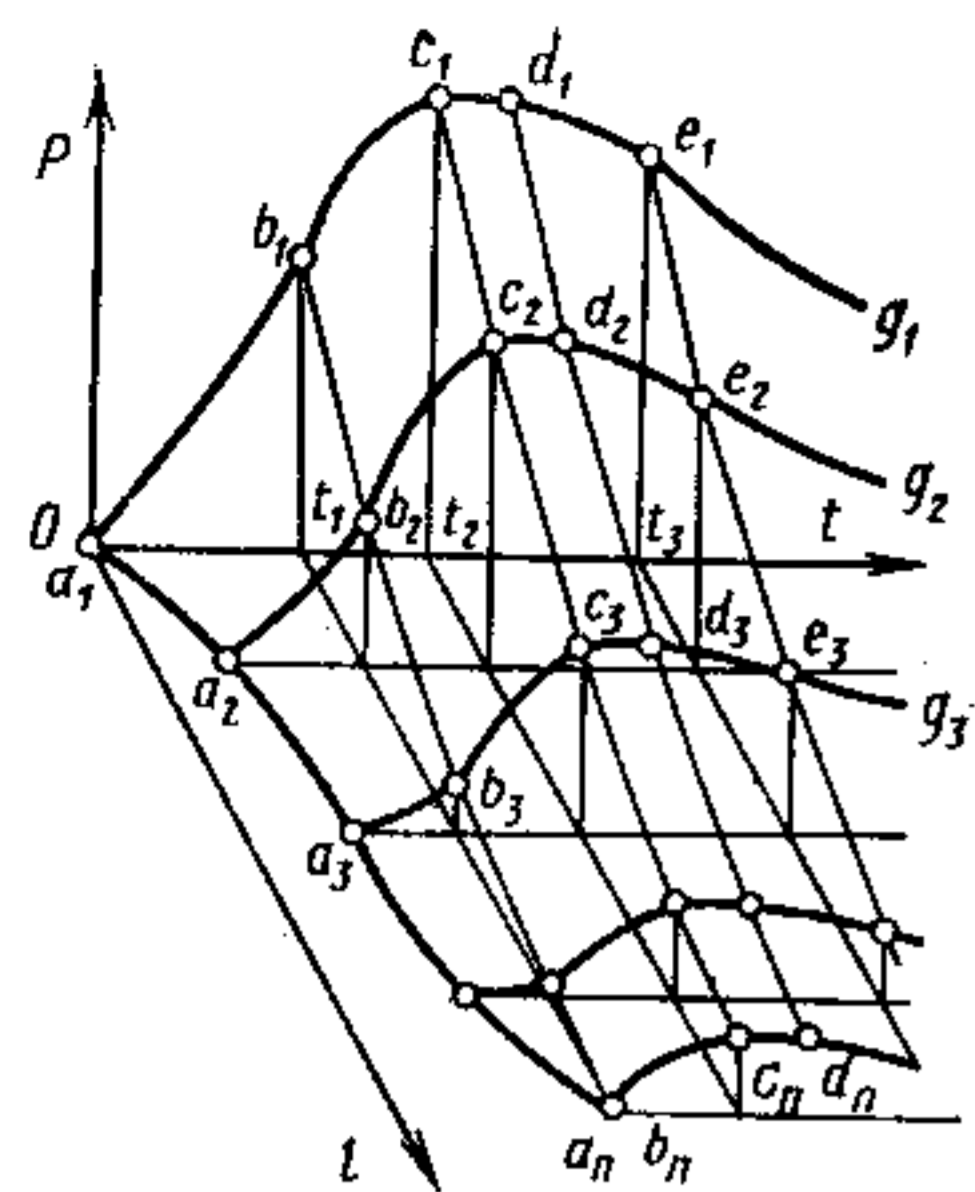


Рис. 1.4. Трехмерная диаграмма процесса формирования давление  $P$ —время  $t$ —длина заполнения формы  $l$

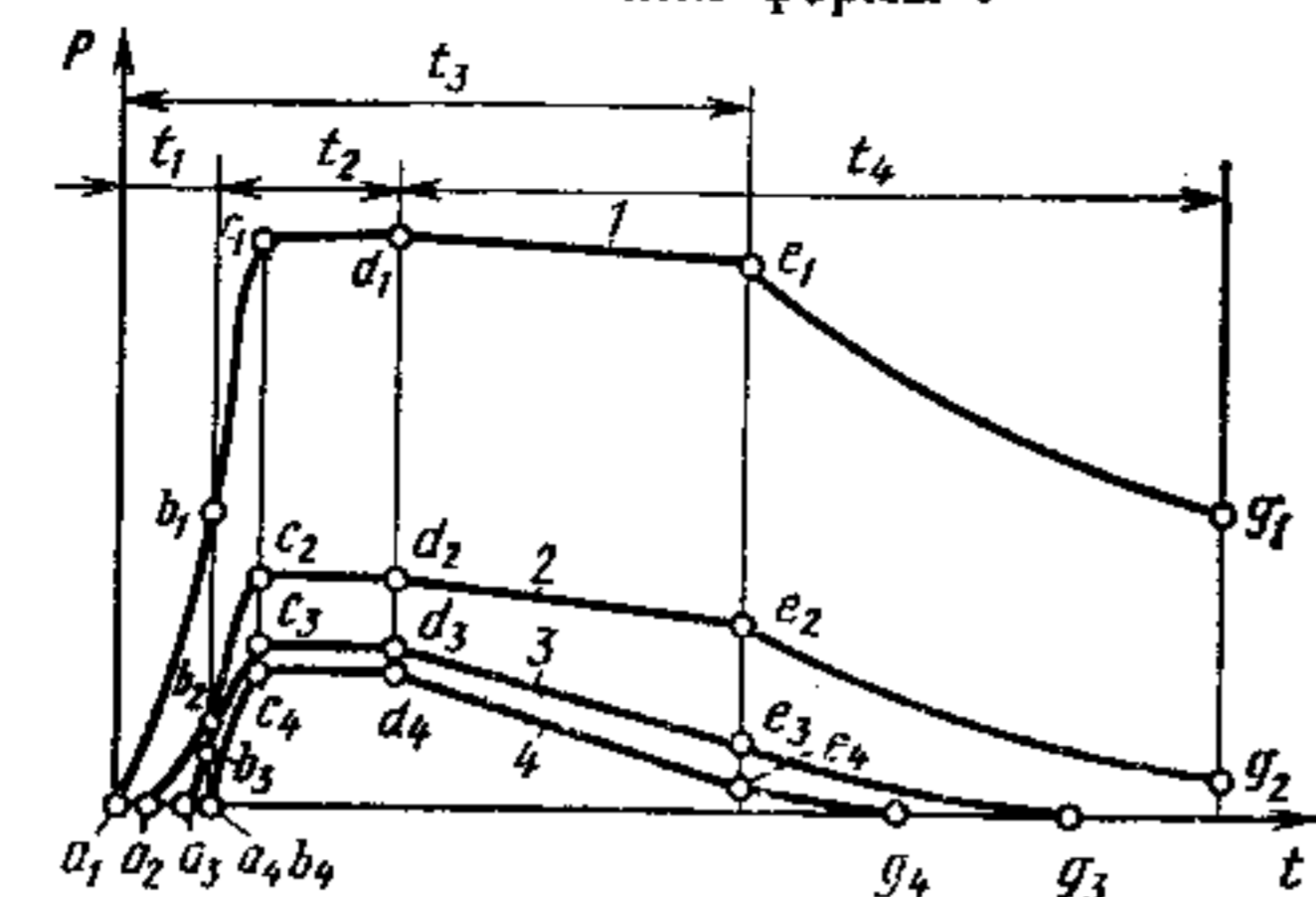


Рис. 1.5. Диаграмма давление  $P$ —время  $t$  для различных участков формы

мования в различных точках формы (рис. 1.5). Эта диаграмма отражает связь процессов, проходящих в форме, и помогает выявить основные факторы, влияющие на эти процессы.

Давление в форме по-разному меняется во всех точках по ее длине. Кривая 1 соответствует изменению давления на входе в форму, а кривые 2, 3 и 4 — изменению давления в точках, расположенных по длине формы. Все кривые имеют три характерных участка, соответствующих заполнению формы за время  $t_1$  — участок  $ab$ ; на растанию и выдержке под давлением за время  $t_2$  — участок  $bd$ ; спаду давления за время  $t_4$  — участок  $dg$ . По истечении времени  $t_3$  (заканчивается продолжительность выдержки под давлением) форма изолируется от инжекционного цилиндра в результате замерзания литника или отвода сопла от формы (точка  $e$ ). Скорости нарастания и спада давления в различных точках по длине формы неодинаковы.

Характер изменения давления в различных частях формы неодинаков и зависит от давления на входе в форму, расстояния от рассматриваемой точки до впускного отверстия формы, конструкции машины и формы, а также от свойств перерабатываемой пластмассы.

Диаграммы изменения давления показывают, что процесс формирования пластмассы можно подразделить на периоды: заполнения формы, нарастания давления и спада давления. Период заполнения формы характеризуется последовательным затеканием расплава в форму и возникновением при этом перепадов давлений в сопле, литниковой системы и форме. Период нарастания давления, начинающийся после заполнения формы, характеризуется повышением давления в системе сопло—форма и снижением перепадов давлений в ее элементах. В этот период в форму из инжекционного цилиндра под действием внешнего давления поступают новые порции материала для компенсации его усадки в результате охлаждения. Период спада давления характеризуется понижением давления по длине системы сопло—форма.

Каждый из выделенных периодов процесса формирования определяет параметры литьевых машин и оказывает влияние на свойства получаемых изделий. Эти периоды взаимосвязаны и на их основе к конструкциям машин предъявляются различные требования.

### 1.2.2. Период заполнения формы

**Режимы заполнения формы.** Заполнение формы может характеризоваться двумя режимами (рис. 1.6). Первоначально расплав в системе сопло—форма течет с постоянной объемной скоростью (объемным расходом), при этом давление на входе в форму  $P_{ф.вх}$ , на входе в сопло  $P_c$  (в инжекционном цилиндре) и в гидросистеме впрыска изменяется — увеличивается. Это первый режим — режим постоянной объемной скорости течения и увеличивающегося давления на входе в сопло  $P_c$  (участок I).

По достижении в сопле максимального значения давления  $P_{c\max}$ , обусловленного установленным в гидроприводе давлением, объемная скорость течения начинает уменьшаться в связи с увеличением длины течения при постоянном перепаде давлений. Наступает второй режим — режим постоянного давления на входе в сопло и убывающей скорости течения (участок II). В этом режиме давление на входе в форму  $P_{ф.вх}$  постепенно возрастает за счет снижения потерь давления в литниковой системе и сопле в результате уменьшения объемной скорости течения в них.

Заполнение формы в режимах постоянной и убывающей скорости течения отличается по характеру движущей силы процессов. В режиме постоянной скорости течения движущей силой, определяющей заполнение формы полимером, является внешний по отношению к системе сопло—форма фактор: перемещение шнека вперед под действием давления, развиваемого гидроцилиндром впрыска. В режиме постоянного давления на входе в сопло течение расплава в системе сопло—форма вызвано внутренним фактором — перепадом давлений по ее длине. Расплав заполняет свободную часть формы.

Форма может заполняться в различных режимах: либо в режиме постоянной объемной скорости течения расплава, либо первоначально в режиме постоянной скорости течения, который затем сменяется режимом убывающей скорости, либо только в режиме убывающей скорости течения. Реализация того или иного режима при заполнении формы зависит от давления литья, технологических параметров переработки, геометрии формы и предшествующих ей кана-

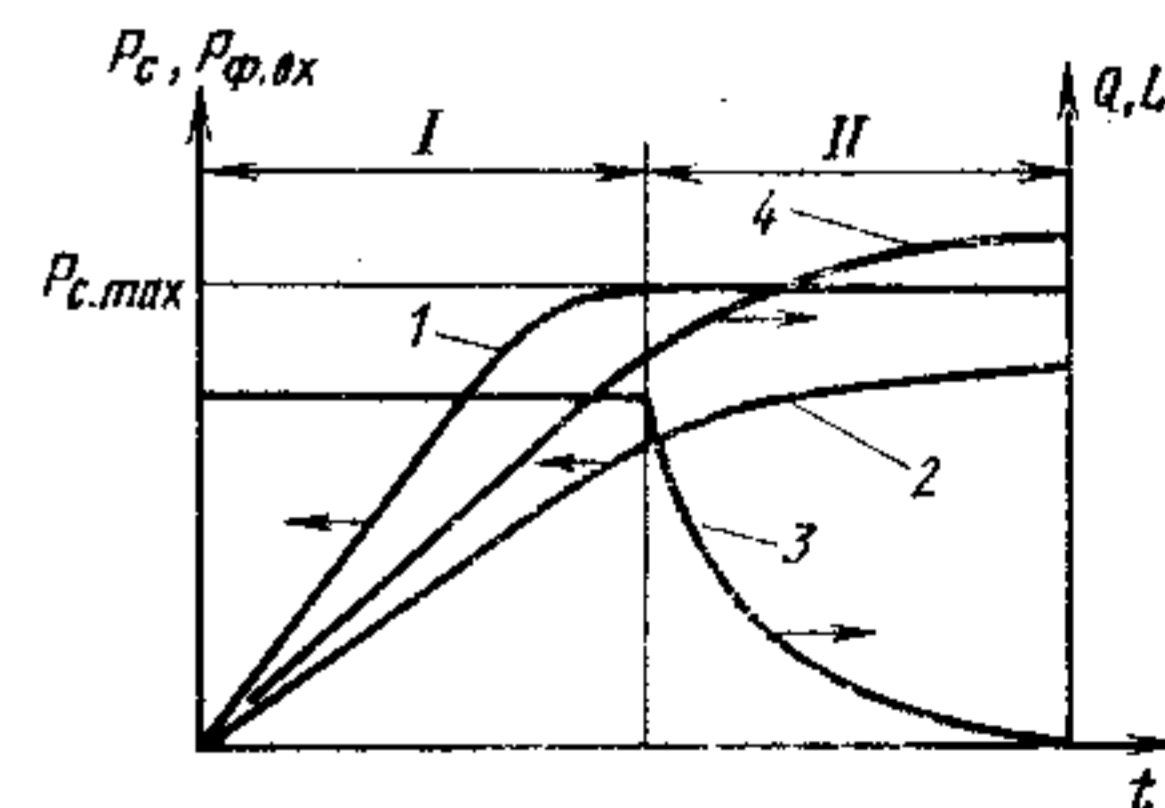


Рис. 1.6. Зависимость давления на входе в сопло  $P_c$  (1), давления на входе в форму  $P_{ф.вх}$  (2), объемной скорости течения  $Q$  (3) и длины затекания полимера в форму  $L$  (4) от времени  $t$

лов литниковой системы и сопла, свойств перерабатываемого материала, конструкции инжекционного узла машины. Расплав заполняет форму в режиме постоянной объемной скорости течения при сравнительно большом давлении литья (давление устанавливают в гидроприводе машины), сравнительно малом сопротивлении системы сопло—форма течению расплава (сопротивление уменьшается с увеличением поперечного сечения проходных каналов сопла, литниковой системы и формы, с уменьшением длины этих каналов; со снижением вязкости расплава перерабатываемого полимера; с повышением температуры расплава и формы) и при небольших потерях давления в инжекционном цилиндре (инжекционный узел с предварительной пластикацией), т. е. когда суммарные потери давления в системе сопло—форма, инжекционном цилиндре и гидроприводе меньше (равны) установленного давления литья. При сравнительно малом давлении литья, большом сопротивлении сопла и литниковой системы течению расплава и больших потерях давления в инжекционном цилиндре, т. е. когда суммарные потери давления в литниковой системе, сопле, инжекционном цилиндре и гидроприводе больше установленного давления литья, форма заполняется в режиме убывающей скорости течения. В промежуточном случае форма заполняется первоначально с постоянной, а затем с убывающей скоростью течения.

**Движение расплава в полости формы.** Из инжекционного цилиндра расплав поступает в форму с температурой  $T_0$ , которая выше температуры формы  $T_\phi$ . В результате процесса теплопередачи от горячего расплава к холодной форме на стенках ее внутренней полости образуется охлажденный слой высоковязкого полимера  $\delta$  (рис. 1.7). В связи с высокой вязкостью этот пристенный слой не участвует в течении. Расплав течет внутри канала, образованного неподвижными слоями, облегчающими стенки полости формы. При заполнении формы толщина пристенного слоя в поперечных сечениях уже заполненной ее части постепенно возрастает. При заполнении в режиме постоянной скорости течения при высоких значениях скорости образуется сравнительно небольшой по толщине слой полимера. При заполнении в режиме постоянного давления на входе в сопло образуется неподвижный слой полимера большей толщины. По длине формы толщина пристенного слоя неодинакова. Вблизи литника толщина пристенного слоя, образовавшегося в начальные моменты заполнения, остается практически постоянной в течение всего последующего затекания расплава в форму. Это можно объяснить тем, что вблизи литника из инжекционного цилиндра в форму постоянно поступают новые порции горячего расплава. На небольшом расстоянии от литника толщина пристенного слоя имеет пологий максимум, после которого монотонно понижается по длине формы.

Исследования движения полимера в различных по конфигурации формах визуальными наблюдениями, фотографированием, киносъёмками в формах с прозрачными стенками (пример такой формы приведен на рис. 1.8), а также введением подкрашенных примесей в прозрачный материал показывают, что траектории движения отдельных

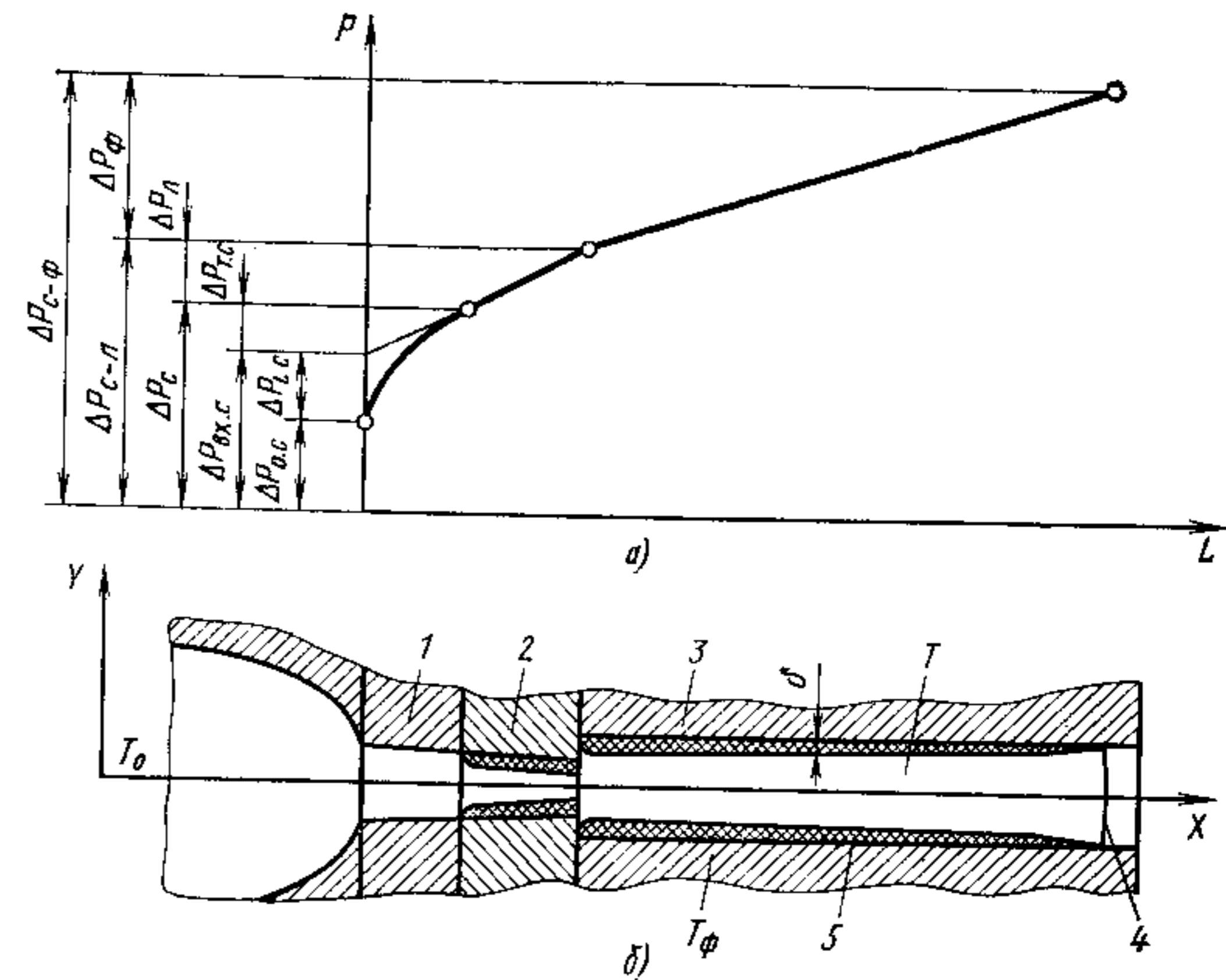


Рис. 1.7. Структура перепада давлений по длине системы сопло—форма в период заполнения (а) и схема течения (б):

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

слоев расплава параллельны общему направлению движения. На протяжении всего периода заполнения в движении слоев не происходит каких-либо нарушений. Примыкающие к стенкам формы слои в движении не участвуют. На рис. 1.9 показано изделие, отлитое из подкрашенного полимера. Внешние неподвижные слои 1 изделия (у стенок формы) — из светлого полимера; подкрашенный полимер составил внутренние слои 2 изделия.

При литье плоских изделий с центральным литником заполнение формы происходит последовательным продвижением расплава по уровням, равноудаленным от литника (по concentрическим окружностям). Такое движение характерно для заполнения формы при литье различных по конфигурации изделий постоянной толщины. На рис. 1.10 показаны изделия с различным числом вставок. Вставки

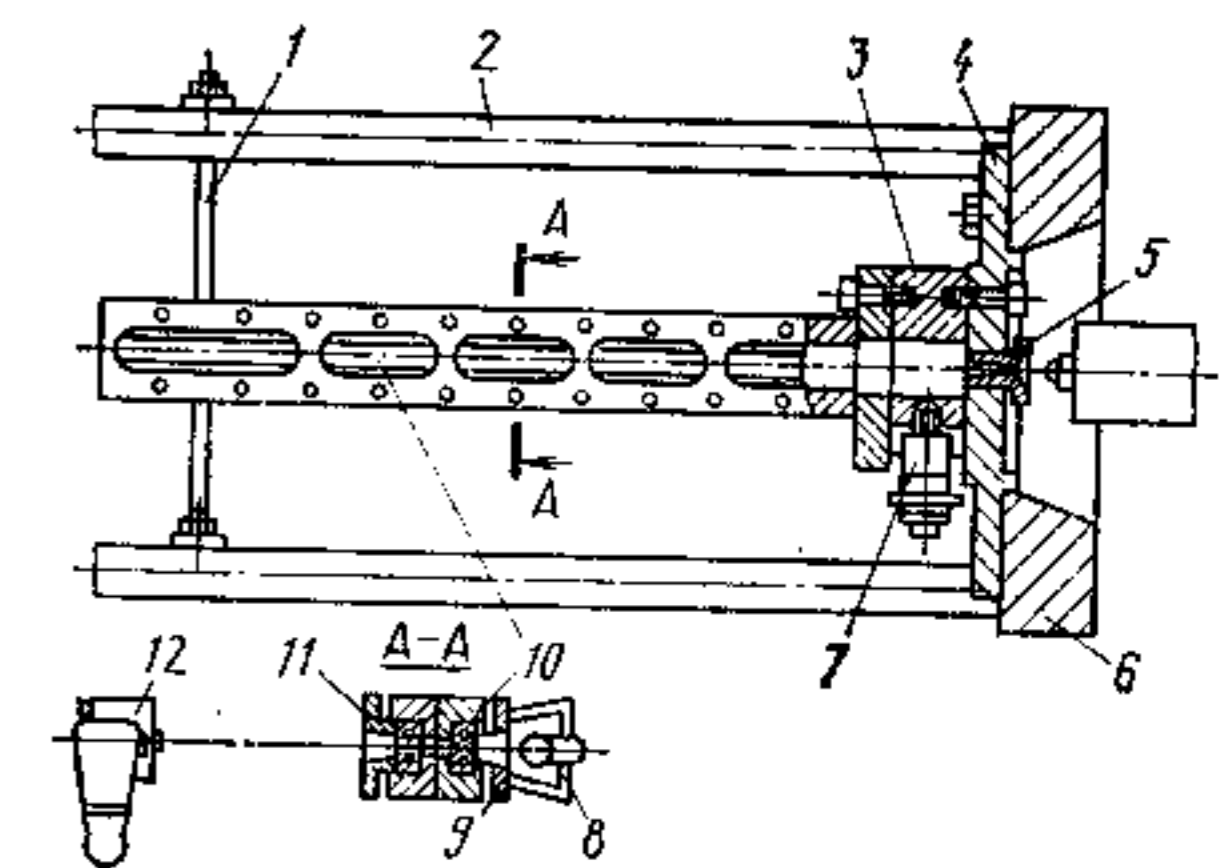


Рис. 1.8. Экспериментальная форма с прозрачными стенками:

1 — распорки; 2 — колонны машины; 3 — фланец для установки датчика 7 давления и температуры; 4 — фланец для крепления формы к неподвижной плите 6 машины; 5 — литник; 8 — источник света; 9, 11 — планки, прижимающие боковые стенки 10 формы, изготовленные не из прозрачного материала; 12 — кинокамера



Рис. 1.9. Изделие, отлитое из двух различных полимеров

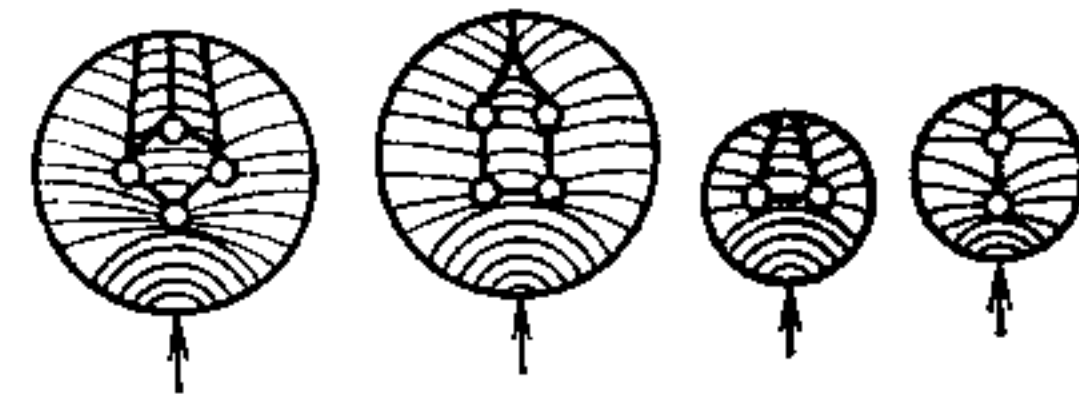


Рис. 1.10. Изделия, отличающиеся числом вставок (обозначены кружками)

расчлениают поток расплава, поступающий из впускного отверстия (стрелки на рисунке) на отдельные потоки. При соединении образовавшихся потоков возникают стыковые швы (толстые линии на рисунке). Тонкими линиями показано расположение расплава в различные моменты при заполнении формы. Отмеченные признаки движения расплава при заполнении формы являются общими для машин с различной конструкцией инжекционного узла.

При заполнении формы поток расплава перемещается последовательным растягиванием фронтальной пленки 1 и продвижением новых порций вдоль неподвижных слоев 3 уже застывшего полимера, облегчающего стенки холодной формы 2 (рис. 1.11, а). Скорость частиц в центре текущего потока полимера выше, чем скорость его фронта (рис. 1.12). Частицы полимера входят в форму с большей скоростью, чем движется фронт потока. При приближении к фронту потока скорость частиц, движущихся параллельно общему направлению течения, постепенно снижается. По достижении фронта потока частица движется вместе с ним (их скорости одинаковы) и смещается по линии фронта к стенке формы. При соприкосновении со стенкой формы частица тормозит свое движение и скользит незначительное время вдоль стенки. Это скольжение частицы вызвано движением вышележащих слоев и может объяснить ориентацию пристенного слоя. Различие в скоростях движения фронта потока и фиксированной частицы в его центре объясняется, во-первых, различием средней скорости течения, которая определяет скорость движения фронта потока, и скорости перемещения центральных слоев, в которых движется фиксируемая частица, и, во-вторых, различием площадей поперечного сечения движущегося потока на границе его фронта и на некотором удалении от него (различие обусловлено образованием пристенного слоя полимера на стенке формы, толщина которого уменьшается в направлении фронта потока).

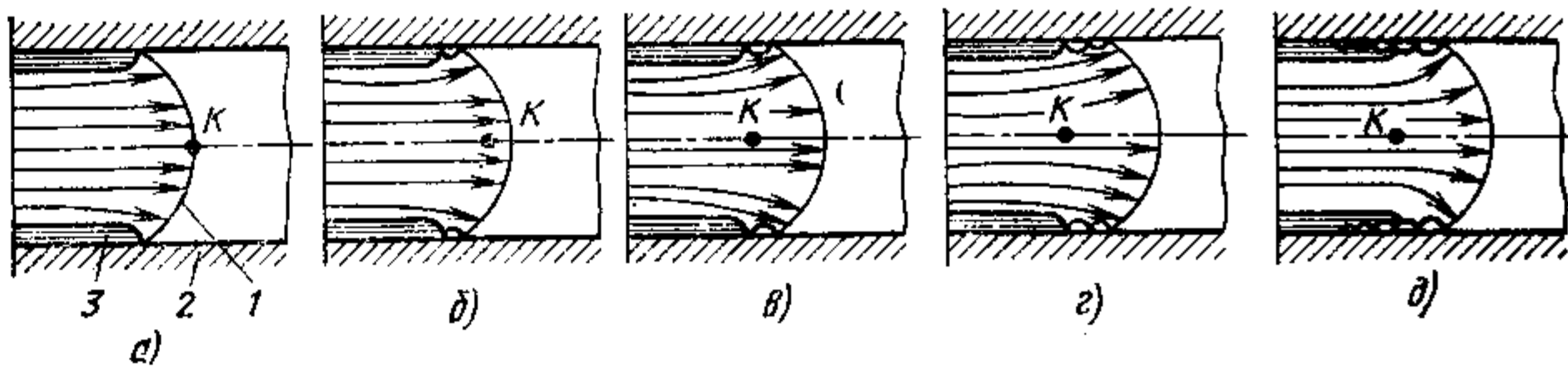
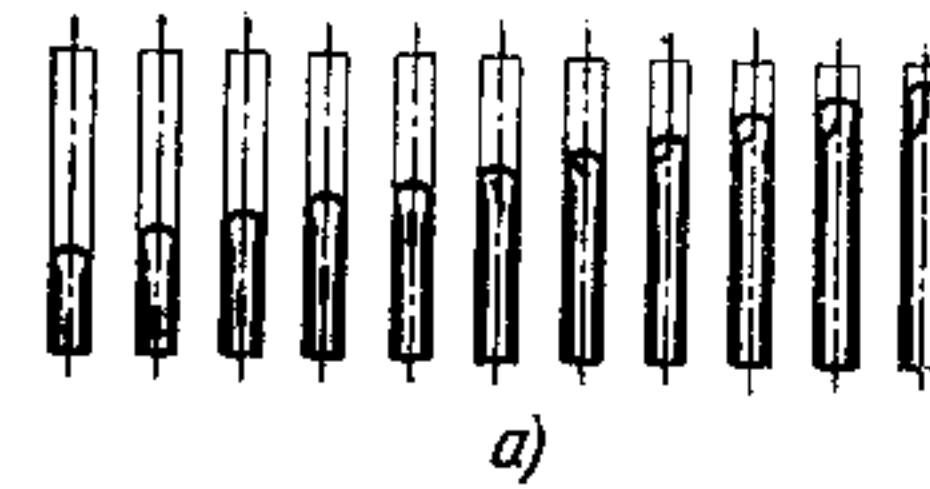
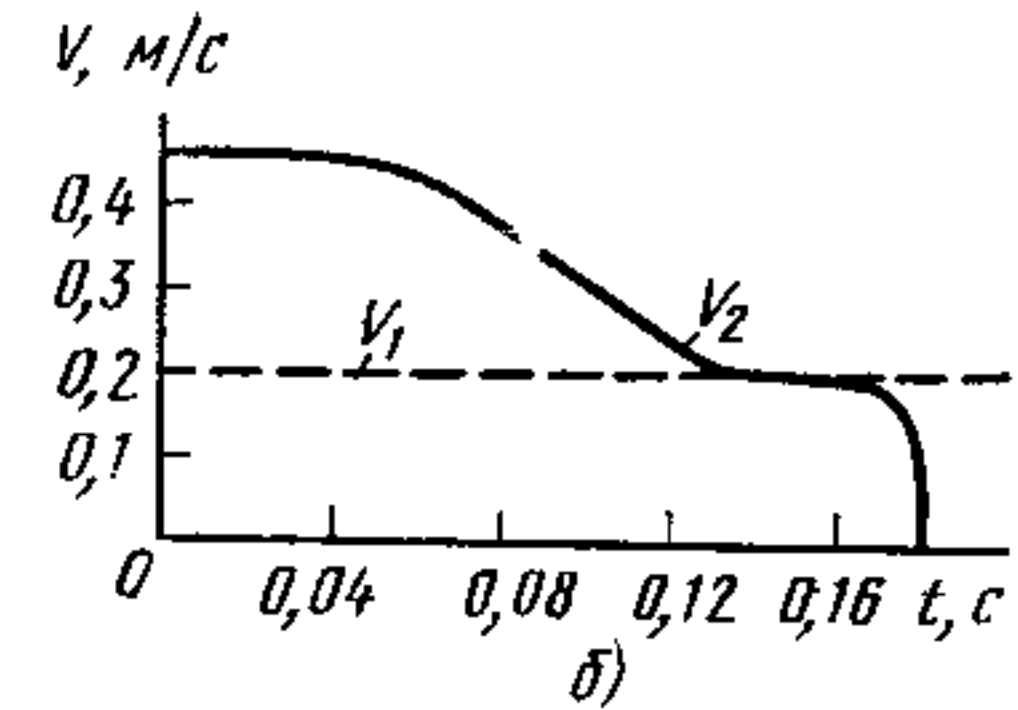


Рис. 1.11. Схемы движения полимера при заполнении формы



а)



б)

Рис. 1.12. Кинограмма движения (а) и изменение скорости фронта потока  $V_1$  и частиц внутри него  $V_2$  во времени  $t$  (б)

Продвижение фронта потока полимера по форме (рис. 1.11, б—д) сопровождается нарастанием давления в участках формы, пройденных потоком (например, в точке К). Это увеличение разглаживает образовавшиеся волны. При медленном течении поверхностные слои могут охладиться до того, как разгладятся волны, и на изделии остаются их следы.

Рассмотренный характер движения полимера при заполнении формы показывает, что чистота обработки ее поверхности не оказывает существенного влияния на движение полимера. Чистота обработки поверхности формы влияет на качество поверхности получаемого изделия, а также в ряде случаев (например, глубокие формы) на усилие, необходимое для съема изделия.

Если литниковое отверстие расположено по направлению течения полимера и он заполняет форму с большой скоростью, характер движения может быть принципиально отличным от рассмотренного. В этом случае заполнение формы происходит не сплошным фронтом, а в виде отдельной непрерывной струи, которая, хаотически продвигаясь вперед, заполняет форму. Давление в форме повышается, струи полимера сплавляются, и он приобретает конфигурацию внутренней полости формы.

**Перепад давлений в системе сопло—форма.** Составляющие перепада давлений. Течение расплава полимера в системе сопло—форма приводит к образованию перепадов давлений в каждом элементе системы (см. рис. 1.7, табл. 1.1).

Система сопло—форма представляет собой последовательное соединение системы сопло—литниковая втулка и формы. Поэтому общий перепад давлений в системе сопло—форма  $\Delta P_{с-ф}$  складывается из потерь давления в системе сопло—литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$  и потерь давления в форме  $\Delta P_{ф}$ . Общий перепад давлений  $\Delta P_{с-ф}$  равен давлению на входе в систему, т. е. давлению на входе в сопло  $P_c$ .

В общем случае перепад давлений в форме  $\Delta P_{ф}$  затрачивается только на вязкое течение расплава (развитие необратимой деформации течения), т. е. на преодоление сил внутреннего трения, которые противодействуют перемещению центров тяжести макромолекул относительно друг друга.

Составляющие перепада давлений по длине системы сопло—форма  $\Delta P_{с-ф}$ 

Система, оформляющий элемент		Составляющие перепада давлений	
Система сопло-форма		$\Delta P_{с-ф} = \Delta P_{с-л} + \Delta P_{ф}$ (1)	
Элементы системы сопло—форма	Система сопло — литниковая втулка	$\Delta P_{с-л} = \Delta P_{с} + \Delta P_{л}$ (2)	
	Элементы системы сопло—литниковая втулка	Сопло	$\Delta P_{с} = \Delta P_{вх.с} + \Delta P_{т.с}$ (3) $\Delta P_{вх.с} = \Delta P_{о.с} + \Delta P_{Лс}$ (4)
		Литниковая втулка	$\Delta P_{л}$
Форма		$\Delta P_{ф}$	

Система сопло—литниковая втулка представляет собой последовательное соединение сопла и литниковой втулки. Поэтому потери давления в этой системе  $\Delta P_{с-л}$  складываются из потерь давления в каждом ее элементе: сопле  $\Delta P_{с}$  и литниковой втулке  $\Delta P_{л}$ . Сопло является начальным участком системы, и на его входном участке развивается течение с более высокой скоростью по сравнению со скоростью до входа в сопло. Развитие течения сопровождается перестройкой профиля скоростей. На некотором расстоянии от входа в канал сопла профиль скоростей приобретает параболическую форму, характерную для установившегося течения расплава (рис. 1.13, б) при данном режиме деформирования. Участок I неустановившегося течения (рис. 1.13, а), на котором происходит формирование профиля скоростей, принято называть входным  $(L/d)_{вх}$  ( $d$  — диаметр сопла). За входным начинается участок II установившегося течения.

Расплавы полимеров являются вязкоупругими жидкостями. При переходных режимах деформирования для них характерны релаксационные явления, т. е. при снятии или приложении напряжения структура и параметры течения изменяются не мгновенно, а в течение определенного промежутка времени. Втекание расплава полимера в сопло является переходным режимом деформирования от низкой (до входа в канал сопла) к более высокой скорости течения (в канале). Релаксационные процессы, протекающие при втекании расплава полимера в сопло, определяют нелинейный (релаксационный) характер распределения давления  $P$  на входном (начальном) участке сопла (см. рис. 1.13, а).

При развитии течения расплава полимеров наряду с необратимой пластической деформацией развивается обратимая высокоэластическая  $\gamma_a$ . Наиболее интенсивно высокоэластическая деформация накапливается в начальный период развития течения. Распределение

высокоэластической деформации на начальном (входном) участке канала сопла имеет нелинейный характер (рис. 1.13, в). Процесс ее релаксации завершается уменьшением до постоянного значения, соответствующего установившемуся течению при данном режиме деформирования. Релаксация высокоэластической деформации заканчивается на более удаленном расстоянии от входа в канал  $(L/d)^*$  по сравнению с расстоянием, на котором градиент давления становится постоянным.

Развитие деформации при течении расплава полимеров сопровождается частичным разрушением их физической структуры. В настоящее время ее принято представлять в виде флуктуационной сетки, «узлами» которой являются области контакта между макромолекулами или их ассоциатами. В состоянии покоя и при постоянной температуре плотность «узлов» флуктуационно-пространственной сетки («сетки зацеплений») постоянна. При деформировании происходит разрушение «узлов», сдерживающих развитие деформации. Режим установившегося течения в структурном отношении характеризуется динамическим равновесием процессов разрушения «узлов» под влиянием деформирования (течения) и восстановления под действием теплового движения.

При втекании полимера в канал сопла кроме нормальных и сдвиговых напряжений возникают растягивающие напряжения  $\sigma$ , которые действуют по оси потока (рис. 1.13, г). До входа в канал растягивающие напряжения нарастают, а на его входном участке релаксируют. При высоких растягивающих напряжениях может происходить разрыв полимера на входе в канал, что является одной из причин нарушения устойчивости потока.

На все рассмотренные эффекты, сопровождающие развитие течения при втекании расплава полимеров в сопло: формирование профиля скоростей (так называемые потери Куэтта), изменение кинетической энергии струи, накопление высокоэластической деформации, развитие растягивающих напряжений и изменение структуры

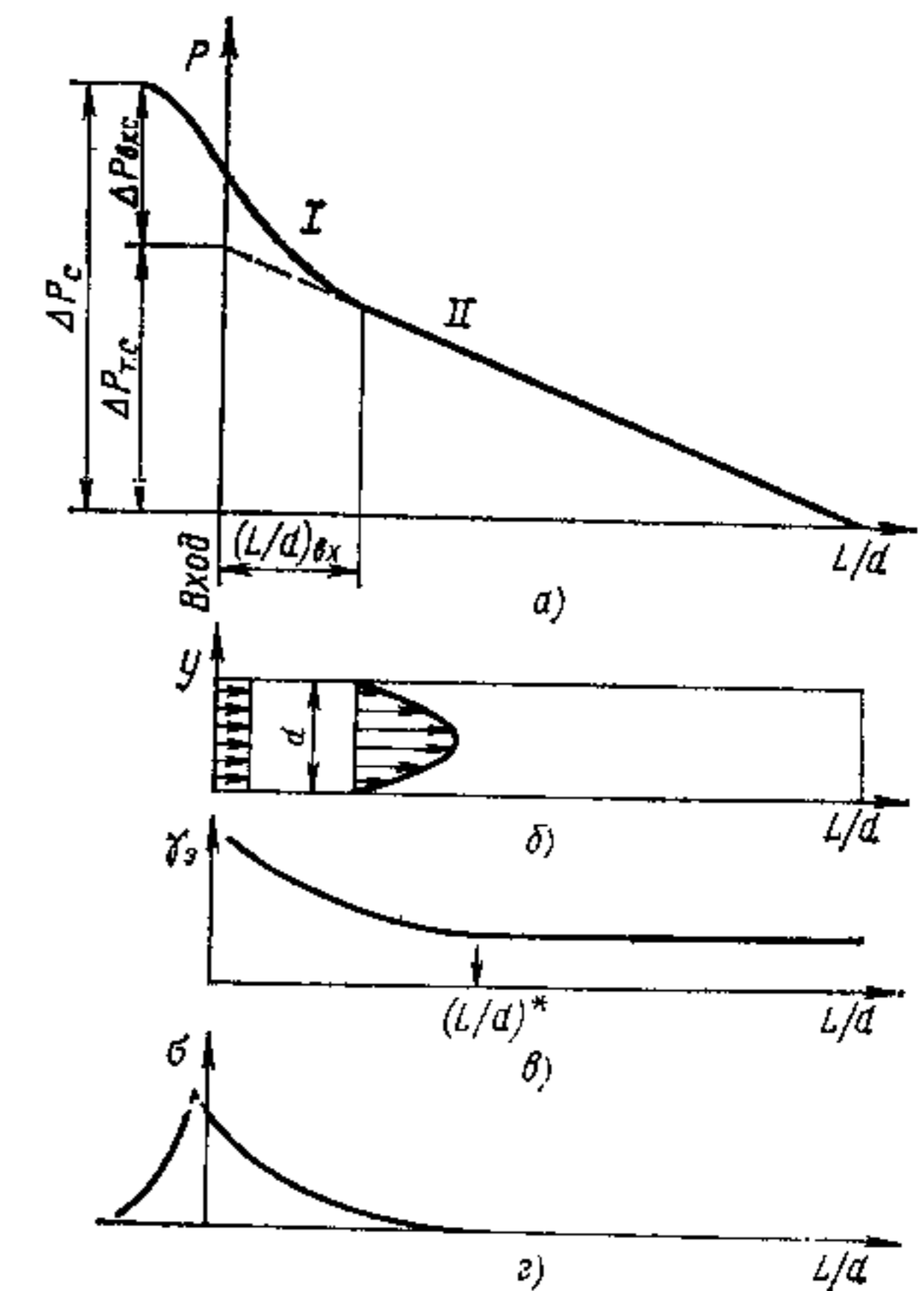


Рис. 1.13. Схема распределения давления  $P$  (а); изменение профиля скоростей на входном участке канала (б); высокоэластической деформации  $\gamma_a$  (в) по относительной длине канала сопла  $L/d$ , растягивающих напряжений  $\sigma$  вдоль оси потока до входа в канал и по его длине (г)

расплава, затрачивается дополнительная энергия, которая обуславливает входные потери давления  $\Delta P_{вх.с}$ .

Общие входные потери давления в сопле  $\Delta P_{вх.с}$  складываются из потерь давления до входа в сопло  $\Delta P_{0с}$  и на его входном участке  $\Delta P_{Lс}$  (см. рис. 1.7). Потери давления  $\Delta P_{Lс}$  имеют релаксационный характер изменения по длине входового участка, уменьшаясь от максимального значения на входе в сопло до нуля в конце этого участка. Потери давления  $\Delta P_{Lс}$  называют релаксирующей составляющей общих потерь давления на входном участке канала. Таким образом, потери давления в сопле складываются из входных потерь давления  $\Delta P_{вх.с}$  (состоящих, в свою очередь, из  $\Delta P_{0с}$  и  $\Delta P_{Lс}$ ) и потерь давления, затрачиваемых на течение полимера по длине канала сопла  $\Delta P_{т.с}$  (см. рис. 1.7 и табл. 1.1).

В общем случае перепад давлений в литниковой втулке как и в форме затрачивается только на вязкое течение  $\Delta P_{л}$ . В многогнездной форме применяют разветвленную литниковую систему, состоящую из последовательно и параллельно соединенных литниковых каналов (см. п. 2.7). Перепад давлений в литниковой системе складывается из потерь давления, затрачиваемых на течение в этих каналах (при их последовательном соединении), а при наличии впуска перепад давлений включает также входные потери давления во впуске.

Влияние неизотермичности, давления и влажности на перепады давлений. Влияние неизотермичности процесса. Перепад давлений  $\Delta P$ , затрачиваемый на течение полимера в канале в изотермических условиях, зависит от напряжения сдвига  $\tau$ , реализуемого при течении, и размеров канала. Напряжение сдвига  $\tau$  пропорционально вязкости  $\eta(\tau, \dot{\gamma})$  при скорости сдвига течения  $\dot{\gamma}$ , а также самой скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ . Скорость сдвига  $\dot{\gamma}$  определяется объемной скоростью течения (объемным расходом)  $Q$  и размерами поперечного сечения канала;

для прямоугольного канала

$$\Delta P = 2\tau L/h = 2\eta(\tau, \dot{\gamma})\dot{\gamma}L/h; \quad (1.1a)$$

$$\dot{\gamma} = (2n + 1) 2Q/(nBh^2); \quad (1.16)$$

для цилиндрического канала

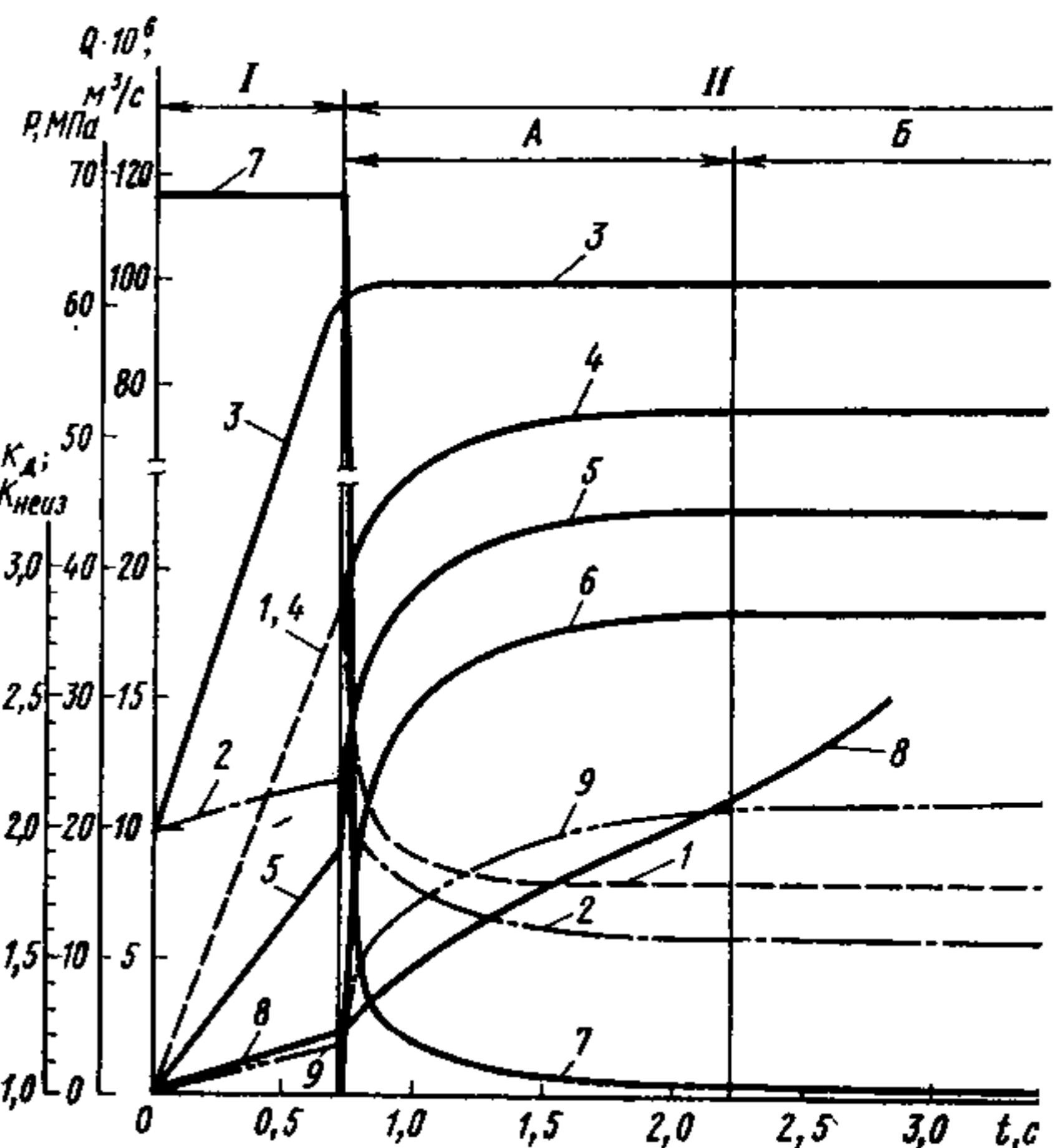
$$\Delta P = 2\tau L/r = 2\eta(\tau, \dot{\gamma})\dot{\gamma}L/r; \quad (1.2a)$$

$$\dot{\gamma} = (3n + 1) Q/(n\pi r^3). \quad (1.26)$$

Процесс течения расплава полимера в форме неизотермичный: расплав, поступающий из инжекционного цилиндра, имеет более высокую температуру  $T_0$ , чем форма  $T_{\phi}$ . В результате процесса охлаждения на внутренней стенке полости формы образуется пристенный, не участвующий в течении слой полимера и понижается температура в текущем потоке расплава  $T < T_0$ . В литниковой втулке процесс охлаждения приводит к образованию пристенного слоя, но в связи с кратковременностью теплообмена температура в текущем потоке расплава заметно не снижается.

Рис. 1.14. Изменение параметров формования в период заполнения формы (I) в режиме постоянной объемной скорости течения и в период нарастания давления (II) в первой (А) и во второй (Б) стадиях:

1, 2 — перепады давлений в форме  $\Delta P_{\phi}$  и в системе сопло — литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$ ; 3, 4 — давление на входе в сопло  $P_0$  и в форму  $P_{\phi}$  вх.; 5, 6 — среднее давление в форме  $P_{\phi}$  ср и давление на ее выходе  $P_{\phi}$  вых.; 7 — объемная скорость течения  $Q$ ; 8, 9 — коэффициенты неизотермичности  $K_{неиз}$  и давления  $K_{д}$ . Полимер — полистирол блочный марки ПСМД. Параметры формования:  $T_0 = 223^\circ\text{C}$ ;  $T_{\phi} = 20^\circ\text{C}$ ; размеры формы: высота  $h_{\phi} = 0,5$  см, ширина  $B_{\phi} = 2$  см, длина  $L_{\phi} = 84$  см; размеры литниковой втулки: диаметр на входе  $d_{л. вх} = 0,5$  см и на выходе  $d_{л. вых} = 1$  см; длина  $L_{л} = 3,25$  см; размеры сопла: диаметр на входе  $d_{с. вх} = 0,3$  см и на выходе  $d_{с. вых} = 0,5$  см; длина  $L_{с} = 2,35$  см



В результате образования пристенного слоя толщиной  $\delta$  на стенках внутренней полости формы размеры поперечного сечения ( $h$  или  $r$ ), в котором движется поток расплава, уменьшаются, становятся равными  $h - 2\delta$  или  $2r - 2\delta$ . Это приводит к тому, что в канале формы при течении реализуются более высокие скорости и напряжения сдвига [см. формулу (1.16), (1.26)], чем при течении в том же канале в изотермических условиях и с той же объемной скоростью. Вязкость расплава полимеров зависит от температуры. Понижение температуры в текущем потоке расплава вызывает возрастание его вязкости. Повышение действительной скорости сдвига (напряжения сдвига) течения и возрастание вязкости расплава в результате охлаждения приводят к тому, что для течения полимера в канале формы в реальном процессе литья (неизотермические условия) требуется перепад давлений  $\Delta P_{\phi}$  больше, чем для течения в том же канале в изотермических условиях при тех же объемной скорости и начальной температуре [(1.1a), (1.2a)]. Это увеличение количественно можно оценить коэффициентом неизотермичности  $K_{неиз}$ , который равен отношению перепадов давлений в неизотермических и изотермических условиях. Изменение этого коэффициента при формовании показано на рис. 1.14, 1.15. Неизотермичность процесса формования приводит к увеличению перепада давлений, затрачиваемого на течение полимера в канале литниковой втулки

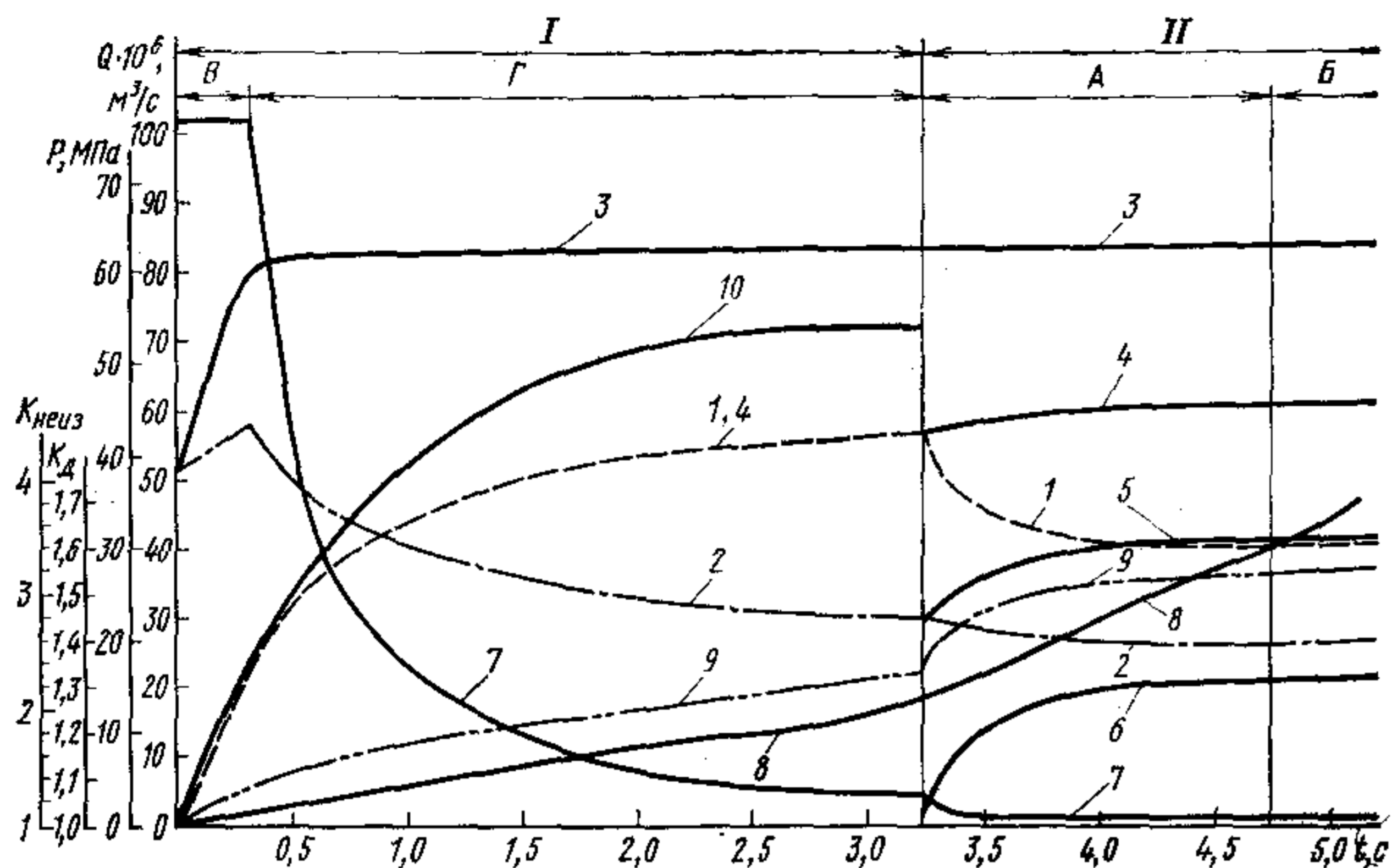


Рис. 1.15. Изменение параметров формования в период заполнения формы (I) первоначально в режиме постоянной (B), а затем в режиме убывающей (Г) скорости течения и в период нарастания давления (II) в первой (A) и во второй (Б) стадиях: 1—9 — см. рис. 1.14; 10 — длина затекания материала в форму L. Полимер — полистирол блочный марки ПСМД. Параметры формования:  $T_p = 198^\circ\text{C}$ ;  $T_f = 20^\circ\text{C}$ ; размеры формы — см. рис. 1.14; размеры литниковой втулки: диаметр на входе  $d_{л. вх} = 0,5$  см и на выходе  $d_{л. вых} = 0,5$  см; длина  $L_{л} = 3,25$  см; размеры сопла: диаметр на входе  $d_{с. вх} = 0,3$  см и на выходе  $d_{с. вых} = 0,5$  см, длина  $L_{с} = 2,35$  см

$\Delta P_{л}$ , главным образом, за счет уменьшения его поперечного сечения в результате образования пристенного слоя.

В период заполнения формы влияние неизотермичности процесса формования на перепады давлений в форме  $\Delta P_{ф}$  и в литниковой втулке  $\Delta P_{л}$  возрастает; коэффициент неизотермичности увеличивается. В режиме постоянной объемной скорости течения это вызвано увеличением пристенного слоя и постепенным понижением температуры в текущем потоке расплава в результате увеличения продолжительности охлаждения.

В режиме убывающей скорости течения возрастание влияния неизотермичности процесса на перепад давлений в форме  $\Delta P_{ф}$  еще более усиливается. Это объясняется тем, что влияние температуры на вязкость зависит от скорости сдвига, если температурную зависимость вязкости рассматривать при последовательно изменяющихся  $\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2, \dot{\gamma}_3$  и т. д. В рассматриваемом режиме скорость сдвига постепенно уменьшается (так как снижается объемная скорость течения), и усиливается влияние температуры на вязкость. В результате этого усиливается эффект увеличения вязкости расплава с понижением его температуры (понижение температуры на одно и то же значение приводит к большому увеличению вязкости).

Влияние неизотермичности процесса формования на перепады давлений существенно зависит от высоты формы  $h$  и ее температуры

$T_{ф}$ . Уменьшение высоты  $h$  и снижение температуры  $T_{ф}$  приводят к возрастанию увеличения перепадов давлений за счет увеличения неизотермичности процесса формования.

**Влияние давления.** В период заполнения в системе сопло—форма развивается высокое абсолютное давление (60—200 МПа). Давление оказывает существенное влияние на вязкость ряда полимеров (полистирола, поликарбоната, полисульфона, полиметилметакрилата и др.) [9]. Вязкость расплава полимеров зависит от относительного свободного объема. Повышение давления вызывает уменьшение относительного свободного объема, что приводит к возрастанию вязкости расплава.

Возрастание вязкости расплава полимера под действием давления ведет к увеличению перепадов давлений, затрачиваемых на течение полимера в элементах системы сопло—форма: в форме  $\Delta P_{ф}$ , литниковой втулке  $\Delta P_{л}$  и сопле  $\Delta P_{т.с.}$ , по сравнению с рассчитываемыми по уравнениям (1.1а), (1.2а) без учета влияния давления, т. е. по значениям вязкости при атмосферном давлении. Это увеличение количественно можно оценить коэффициентом давления  $K_d$  (см. рис. 1.14, 1.15), который равен отношению перепадов давлений, рассчитанных с учетом и без учета влияния давления на вязкость.

Повышенные абсолютные значения давления в системе сопло—литниковая втулка наряду с возрастанием вязкости вызывают увеличение энергии, затрачиваемой на входные эффекты, возникающие в процессе развития течения расплава при его втекании в сопло. Это приводит к увеличению входных потерь давления в сопле  $\Delta P_{вх.с.}$

При заполнении формы влияние давления на составляющие общего перепада ( $\Delta P_{с.}$ ,  $\Delta P_{л.}$ ,  $\Delta P_{ф.}$ ) возрастает, что можно проиллюстрировать увеличением коэффициента давления. В режиме постоянной объемной скорости течения это вызвано увеличением вязкости в результате повышения давления в системе по мере затекания расплава в форму. В режиме убывающей скорости течения возрастание влияния давления на перепады усиливается. Это объясняется тем, что влияние давления (аналогично температуре) на вязкость зависит от скорости сдвига, если зависимость вязкости от давления рассматривать при последовательно изменяющихся  $\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2, \dot{\gamma}_3$  и т. д. В рассматриваемом режиме скорость сдвига постепенно уменьшается (так как снижается объемная скорость течения), и усиливается влияние давления на вязкость. В результате этого усиливается эффект увеличения вязкости расплава под влиянием давления (повышение давления на одно и то же значение приводит к большему увеличению вязкости).

**Влияние влажности полимера.** Многие полимеры являются гигроскопичными, и их перерабатывают с определенным содержанием влаги (влажностью).

Влага оказывает существенное влияние на вязкость полярных полимеров (полиамидов, поликарбоната и др.) [9]. Влага в расплавах полимеров до определенного содержания (ограничивает допустимую влажность перед переработкой) играет преимущественно роль пластификатора (однако при более высоких значениях влага вызы-

ваёт гидролитическую деструкцию). Повышение содержания влаги приводит к снижению внутри- и межмолекулярного взаимодействия полимера (в результате того, что полярные молекулы воды сольватируют полярные группы макромолекул полимера), и поэтому подвижность (гибкость) макромолекул, от которой зависит вязкость расплава полимера, возрастает. Увеличение подвижности макромолекул с повышением содержания влаги приводит к снижению вязкости расплава.

Наличие влаги в полимере приводит к снижению вязкости расплава в процессе формования и, следовательно, к уменьшению перепадов давлений, затрачиваемых на течение полимера в элементах системы сопло—форма ( $\Delta P_{\phi}$ ,  $\Delta P_{л}$ ,  $\Delta P_{т.с}$ ), по сравнению с перепадами давления [(1.1а), (1.2а)], затрачиваемыми при течении абсолютно «сухого» полимера (полимер содержит незначительное количество влаги, которое практически не оказывает влияния на вязкость). На рис. 1.14, 1.15 показаны процессы формования полимера, вязкость которого не зависит от влажности. Наличие влаги в полимере наряду с понижением вязкости расплава приводит к уменьшению входных потерь давления в сопле  $\Delta P_{вх.с}$ .

Влажность полимера перед переработкой нормируют. Допустимую влажность выбирают, исходя из следующих условий: при переработке не должны протекать совместная термоокислительная и гидролитическая деструкции (последняя вызвана повышенным содержанием влаги) или структурирование (вызвано пониженным содержанием влаги) полимера, получаемые изделия должны иметь хорошие физико-механические свойства (при повышенном или пониженном содержании влаги физико-механические свойства могут быть ниже нормируемых) и не должны иметь макродефекты (пузыри, матовость и др.), вызванные повышенной влажностью [9].

Изменение давления и составляющих перепада давлений в течение периода заполнения формы. *Режим постоянной объемной скорости течения.* Заполнение в режиме постоянной объемной скорости течения под действием приложенного внешнего давления сопровождается возрастанием перепада давлений, затрачиваемого на течение расплава в форме  $\Delta P_{\phi}$  (см. рис. 1.14, 1.15). Это вызвано, во-первых, увеличением длины течения, во-вторых, развитием процесса охлаждения (постепенно увеличивается толщина пристенного слоя и понижается температура расплава), что приводит к возрастанию влияния неизотермичности процесса на перепад  $\Delta P_{\phi}$  (см.  $K_{неиз}$  на рис. 1.14 и 1.15), в-третьих, повышением абсолютного давления в системе, что вызывает возрастание вязкости (в результате влияния на нее давления) и по этой причине увеличение  $\Delta P_{\phi}$  (см.  $K_{д}$  на рис. 1.14 и 1.15).

Увеличивается перепад давлений в сопле  $\Delta P_{с}$  и в литниковой втулке  $\Delta P_{л}$ , что приводит к увеличению общего перепада давлений в системе сопло—литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$  (см. рис. 1.14, 1.15). Увеличение  $\Delta P_{с}$  вызвано повышением давления в системе, что приводит к усилению влияния давления на вязкость и входные эффекты и соответственно на перепад давлений, затрачиваемый на течение

полимера в сопле  $\Delta P_{т.с}$ , и на входные потери давления  $\Delta P_{вх.с}$ . Увеличение перепада давлений в литниковой втулке  $\Delta P_{л}$  вызвано, во-первых, развитием процесса охлаждения (увеличивается толщина пристенного слоя), что приводит к возрастанию увеличения  $\Delta P_{л}$  за счет неизотермичности процесса, и, во-вторых, повышением давления в системе, что приводит к возрастанию увеличения  $\Delta P_{л}$  за счет влияния давления на вязкость.

Увеличение перепада давлений в форме  $\Delta P_{\phi}$  приводит к повышению давления на входе в нее  $P_{\phi.вх}$  и среднего в ней давления  $P_{\phi.ср}$  (см. рис. 1.14, 1.15). Одновременное увеличение  $\Delta P_{\phi}$  и перепада давлений в системе сопло—литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$  приводит к увеличению общего перепада давлений по всей длине системы сопло—форма  $\Delta P_{с-ф}$  и к повышению абсолютного давления на входе в сопло  $P_{с}$ .

*Режим постоянного давления на входе в сопло.* По достижении на входе в сопло  $P_{с}$  максимально реализуемого значения давления  $P_{с.мах}$  период заполнения из режима, характеризующегося постоянной объемной скоростью течения и увеличением давления на входе в сопло  $P_{с}$ , переходит в режим постоянного давления на входе в сопло  $P_{с} = \text{const}$  (см. рис. 1.15).

Постоянство давления на входе в сопло  $P_{с} = \text{const}$  определяет постоянство общего перепада давлений по длине системы сопло—форма  $\Delta P_{с-ф} = \text{const}$  в различные моменты режима. Перепад давлений вызывает течение полимера в системе. Увеличение длины течения при постоянном перепаде давлений приводит к снижению объемной скорости течения.

Уменьшение объемной скорости течения вызывает снижение перепада давлений в сопле  $\Delta P_{с}$  и в литниковой втулке  $\Delta P_{л}$  и, следовательно, общего перепада давлений по длине системы сопло—литниковая втулка.

Возрастание влияния давления на вязкость и входные эффекты в результате снижения объемной скорости течения (приводит к возрастанию увеличения перепадов давлений в сопле  $\Delta P_{с}$  и литниковой втулке  $\Delta P_{л}$  за счет влияния давления на вязкость и входные эффекты) и увеличение влияния неизотермичности процесса формования на перепад давлений в литниковой втулке  $\Delta P_{л}$  за счет увеличения продолжительности охлаждения (растет пристенный слой) в некоторой степени компенсирует снижение перепада давлений в системе сопло—литниковая втулка за счет уменьшения объемной скорости течения.

Уменьшение перепада давлений  $\Delta P_{с-л}$  приводит к увеличению давления на входе в форму  $P_{\phi.вх}$  и среднего в ней давления  $P_{\phi.ср}$  (см. рис. 1.15).

Возрастание влияния неизотермичности процесса формования на перепад давлений в форме  $\Delta P_{\phi}$  в результате увеличения продолжительности охлаждения и снижения скорости сдвига (объемной скорости течения) (см.  $K_{неиз}$  на рис. 1.15), а также возрастание влияния давления на  $\Delta P_{\phi}$  в результате повышения абсолютного давления в форме и снижения скорости сдвига (см.  $K_{д}$  на рис. 1.15)

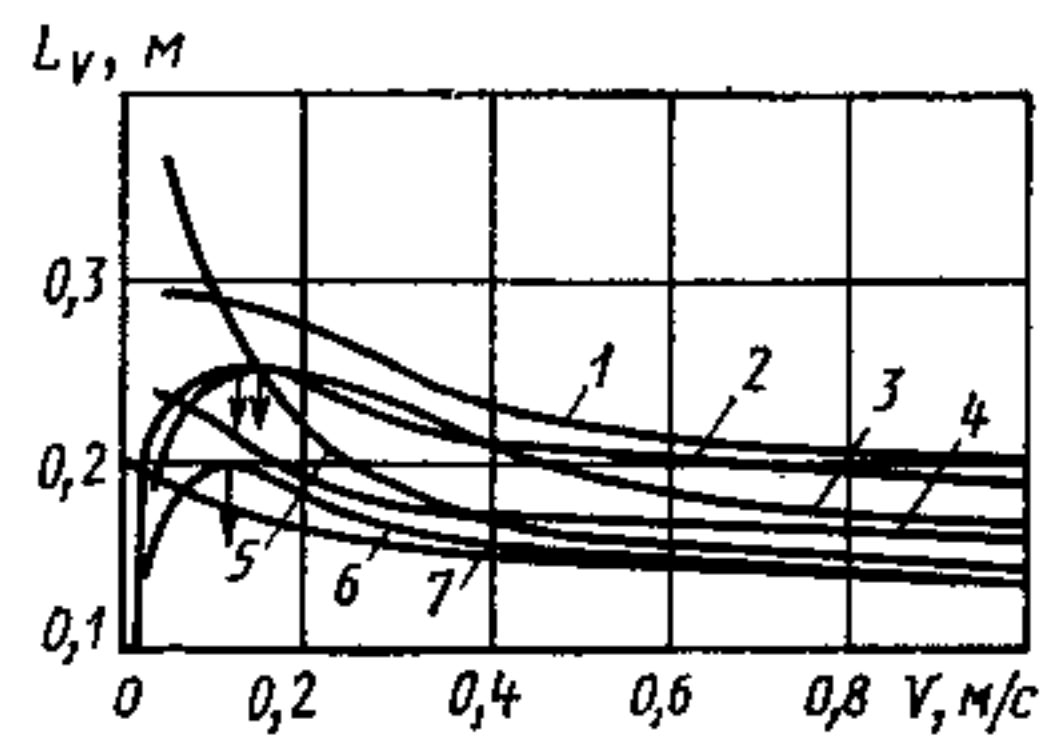


Рис. 1.16. Зависимость длины затекания полимера  $L_V$  в форму в режиме постоянной скорости течения от ее линейного значения  $V$ : 1, 2 — полиамид при температуре материала  $T_0 = 235^\circ\text{C}$ , температуре формы  $T_\Phi = 80^\circ\text{C}$  (1) и  $T_\Phi = 20^\circ\text{C}$  (2); 3, 4 — поликарбонат при  $T_0 = 300^\circ\text{C}$ ,  $T_\Phi = 150^\circ\text{C}$  (3) и  $T_\Phi = 20^\circ\text{C}$  (4); 5, 6, 7 — сополимеры формальдегида при  $T_0 = 185^\circ\text{C}$ ;  $T_\Phi = 150^\circ\text{C}$  (5),  $T_\Phi = 80^\circ\text{C}$  (6) и  $T_\Phi = 20^\circ\text{C}$  (7)

ускоряют процесс уменьшения объемной скорости течения в системе при постоянном давлении на входе в сопло. По мере снижения объемной скорости течения приращение длины затекания полимера в форму в единицу времени уменьшается.

**Влияние параметров литья на длину заполнения формы (формуемость).** Влияние параметров литья (объемной скорости течения, температуры полимера и формы, давления литья) и свойств полимера на формуемость можно оценить по их влиянию на длину затекания расплава в форму. Наличие двух режимов заполнения (с постоянной объемной скоростью течения и при постоянном давлении на входе в сопло) определяет необходимость дифференцированного рассмотрения формуемости при каждом режиме.

Режим заполнения с постоянной объемной скоростью течения. Длина затекания полимера в форму при этом режиме зависит от линейной скорости течения (рис. 1.16). На кривой зависимости длины затекания полимера в форму от линейной скорости  $V$  можно выделить два участка. Скорости  $V_{кр}$  (обозначены стрелками на рисунке), разграничивающие эти участки, зависят от размеров поперечного сечения полости формы, свойств полимера, определяющих процессы заполнения (реологических и теплофизических), а также от параметров переработки (главным образом, от давления).

При скоростях течения, превышающих  $V_{кр}$ , их увеличение приводит к уменьшению длины затекания. Это можно объяснить тем, что с увеличением скорости течения повышаются скорость сдвига и соответственно напряжение сдвига, реализуемые при течении полимера в полости формы. Поэтому перепад давлений в форме  $\Delta P_\Phi$ , давление на входе в сопло  $P_c$  и давление литья в гидроприводе  $P_\lambda$  достигают максимально реализуемых значений при меньшей длине [см. формулы (1.1а), (1.2а)]. Изменение длины затекания непропорционально (меньше) изменению скорости течения, и с ее повышением уменьшение длины затекания ослабевает. Это обусловлено тем, что течение при заполнении (реализуются скорости сдвига  $5 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ) для большинства полимеров соответствует области аномально-вязкого течения (неньютоновского), в которой изменение напряжения сдвига, определяющего  $\Delta P_\Phi$ , непропорционально (меньше) изменению скорости сдвига, определяющейся скоростью течения [9]. Эта непропорциональность (отклонение от неньютоновского течения) усиливается с повышением скорости сдвига.

Следовательно, увеличение скорости литья приводит к меньшему увеличению давления. Кроме того, с повышением скорости течения уменьшается влияние неизотермичности процесса на перепад давлений, образующийся в форме  $\Delta P_\Phi$  (увеличение  $\Delta P_\Phi$  за счет неизотермичности процесса), поскольку уменьшается время заполнения-охлаждения (уменьшается толщина образующегося пристенного слоя и в меньшей степени понижается температура в текущем потоке расплава), что также приводит к ослаблению зависимости длины затекания от скорости течения с повышением последней.

При скоростях течения меньше  $V_{кр}$  их повышение вызывает увеличение длины затекания. Повышение скорости течения приводит, во-первых, к увеличению скорости сдвига и напряжения сдвига, реализуемых при заполнении формы, что вызывает уменьшение длины затекания, и, во-вторых, к уменьшению влияния неизотермичности процесса на перепад давлений в форме  $\Delta P_\Phi$ , что вызывает увеличение длины затекания. В зависимости от того, какой из этих процессов преобладает, длина затекания может уменьшаться или увеличиваться. При скорости течения меньше  $V_{кр}$  с повышением скорости течения преобладает процесс уменьшения влияния неизотермичности, поэтому длина затекания увеличивается. Влияние неизотермичности усиливается с уменьшением высоты поперечного сечения канала формы и понижением ее температуры  $T_\Phi$ . Поэтому при меньшей толщине канала формы и при ее более низких температурах на кривой, отражающей зависимость длины затекания от скорости, наблюдается пологий максимум.

Повышение температуры полимера вызывает снижение вязкости расплава и уменьшение перепада давлений, затрачиваемого на входные эффекты, сопровождающие течение полимера через вход в сопло. Поэтому уменьшается перепад давлений в системе сопло—литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$ , что приводит к увеличению максимально реализуемых давлений на входе в форму  $P_{\Phi, вх}$  и перепада давлений по ее длине  $\Delta P_\Phi$  при одинаковом давлении литья  $P_\lambda$ . Увеличение максимально реализуемого перепада давлений  $\Delta P_\Phi$  и снижение вязкости расплава в результате повышения температуры полимера  $T_0$  приводят к увеличению длины затекания [см. формулы (1.1а), (1.2а)] — рис. 1.17, а. При режиме заполнения с постоянной объемной скоростью течения температура полимера влияет на длину затекания главным образом посредством влияния на гидродинамику процесса (в результате изменения вязкости), а не посредством влияния на процесс теплообмена. В свою очередь, влияние температуры на вязкость зависит от природы полимера: уменьшается с повышением гибкости макромолекулярной цепи полимера, уменьшением межмолекулярного взаимодействия и разветвленности цепи и от скорости сдвига, реализуемой при заполнении: температурная зависимость вязкости рассматривается в режиме  $\dot{\gamma} = \text{const}$ .

Понижение температуры формы  $T_\Phi$  ускоряет процесс охлаждения (увеличивается толщина пристенного слоя и в большей степени понижается температура в текущем потоке расплава), что усиливает влияние неизотермичности на процесс заполнения формы и умень-



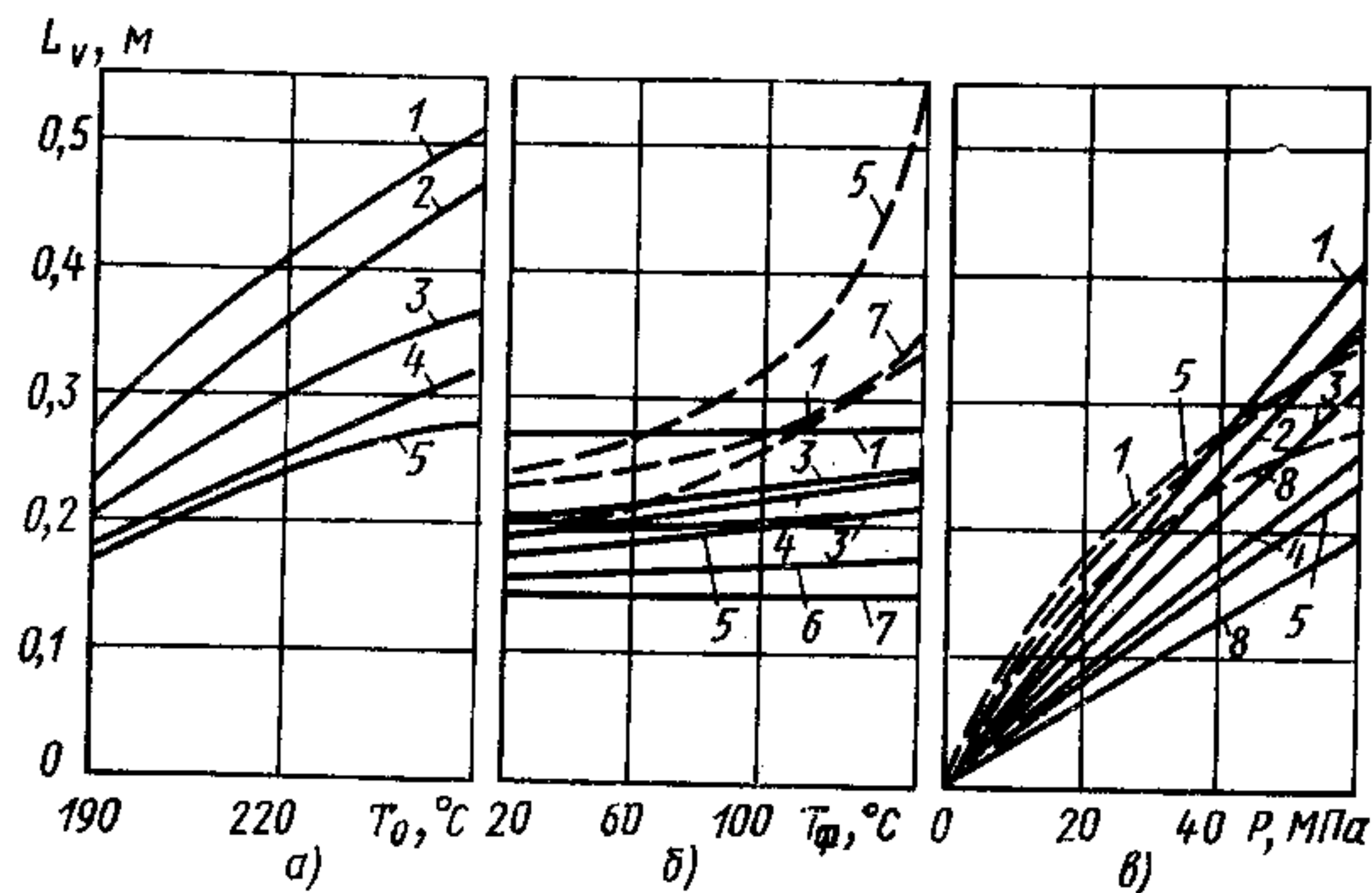


Рис. 1.17. Зависимость длины затекания полимера  $L_v$  в форму в режиме постоянной скорости течения от температуры полимера  $T_0$  (а), температуры формы  $T_\phi$  (б), давления литья  $P_{л}$  (в) для полистирола блочного ПС<sub>бл</sub> (1), ударпрочного полистирола УПП (2), полипропилена ПП (3), полиэтилена низкой ПЭ НП (4) и высокой ПЭ ВП (5), поликарбоната ПК (6), сополимера формальдегида СФ (7), полиамида ПА (8) при скоростях течения 1 м/с (—) и  $5 \cdot 10^{-2}$  м/с (---) и следующих параметра литья:  
 а —  $T_\phi = 20^\circ\text{C}$ ,  $P_{л} = 67$  МПа; б —  $P_{л} = 67$  МПа и  $T_0 = 190^\circ\text{C}$  для ПС<sub>бл</sub>, УПП, ПП, ПЭ, НП, ПЭ, ВП,  $T_0 = 300^\circ\text{C}$  для ПК,  $T_0 = 185^\circ\text{C}$  для СФ,  $T_0 = 235^\circ\text{C}$  для ПА; в — при  $T_\phi = 80^\circ\text{C}$  и  $T_0 = 220^\circ\text{C}$  для ПС<sub>бл</sub>, УПП, ПП, ПЭ, ВП,  $T_0 = 300^\circ\text{C}$  для ПК,  $T_0 = 185^\circ\text{C}$  для СФ,  $T_0 = 235^\circ\text{C}$  для ПА

шает длину затекания полимера в форму (рис. 1.17, б). Влияние температуры формы на формуемость зависит от скорости течения полимера. При низкой скорости течения интенсивно развивается процесс охлаждения вследствие большой продолжительности периода заполнения (охлаждения) и поэтому неизомеричность оказывает значительное влияние на процесс заполнения формы и на формуемость. В результате этого понижение температуры формы (изменение условий теплообмена) приводит к существенному изменению длины затекания полимера.

При сравнительно высоких скоростях течения неизомеричность оказывает малое влияние на процесс заполнения и формуемость, поскольку вследствие кратковременности процесса теплообмена процесс охлаждения развивается слабо. Поэтому изменение температуры формы (условий теплообмена) оказывает сравнительно малое влияние на длину затекания полимера. В этом случае процесс заполнения, а следовательно, достижение наибольшего давления на входе в форму  $P_{ф.вх}$  и длина участка с постоянной скоростью заполнения  $L_v$  определяются, главным образом, гидродинамикой процесса (процессом вязкого течения практически в изотермических условиях), которая зависит от сопротивления проходного канала формы (определяется его размерами), вязкости полимера, его температуры (влияет на вязкость), объемной скорости течения.

Повышение давления литья  $P_{л}$  приводит к повышению максимально реализуемых давления на входе в форму  $P_{ф.вх}$  и перепада давлений по ее длине  $\Delta P_\phi$ , что вызывает увеличение длины затекания полимера [см. формулы (1.1а), (1.2а)] — рис. 1.17, в. При сравнительно высоких скоростях течения неизомеричность процесса оказывает слабое влияние на  $\Delta P_\phi$ , и длина затекания увеличивается практически прямо пропорционально повышению давления, что характерно для изотермических условий [см. формулы (1.1а), (1.2а)]. При пропорциональном изменении длины затекания и давления градиент давлений по длине формы остается практически постоянным.

При малых скоростях течения неизомеричность процесса оказывает заметное влияние на зависимость длины затекания от давления, причем это влияние зависит от длины затекания, т. е. продолжительности охлаждения. При малой длине затекания (небольшой продолжительности охлаждения) неизомеричность процесса оказывает сравнительно малое влияние на перепад давлений в форме  $\Delta P_\phi$  и длина затекания, как и в случае заполнения при больших скоростях, увеличивается практически прямо пропорционально повышению давления. С увеличением длины затекания (увеличивается продолжительность охлаждения) влияние неизомеричности процесса на перепад давлений в форме возрастает, что вызывает отклонение зависимости длина затекания — давление от линейной. Линейная зависимость характерна для изотермических условий. Разность между длиной затекания в изотермических условиях (по линейной зависимости) и действительной длиной затекания определяется неизомеричностью процесса и увеличивается с развитием процесса охлаждения. При нелинейной зависимости длины затекания от давления градиент давлений по длине формы возрастает с увеличением длины затекания.

В режиме заполнения с постоянной скоростью при ее высоких значениях и при сравнительно большой высоте поперечного сечения полости формы неизомеричность оказывает малое влияние на процесс заполнения формы. Процесс заполнения определяется главным образом гидродинамикой, которая, в свою очередь, зависит от вязкости полимера. В таком случае длина затекания полимера (на участке постоянной скорости) в одной и той же форме и при одних и тех же параметрах (скорость течения, давление) определяется эффективной вязкостью полимера  $\eta_\phi$ , измеренной в изотермических условиях при скорости сдвига заполнения  $\dot{\gamma}$  и при той же температуре формования [см. формулы (1.1а), (1.2а)]. Для различных полимеров длина заполнения обратно пропорциональна их эффективной вязкости  $\eta_\phi$  при скорости сдвига заполнения  $\dot{\gamma}$  (рис. 1.18). Поэтому при заполнении формы в режиме постоянной объемной скорости течения при ее высоких значениях в формах со сравнительно большой толщиной проходного канала формуемость различных полимеров можно приближенно оценивать по их эффективной вязкости  $\eta_\phi$  при скорости сдвига заполнения.

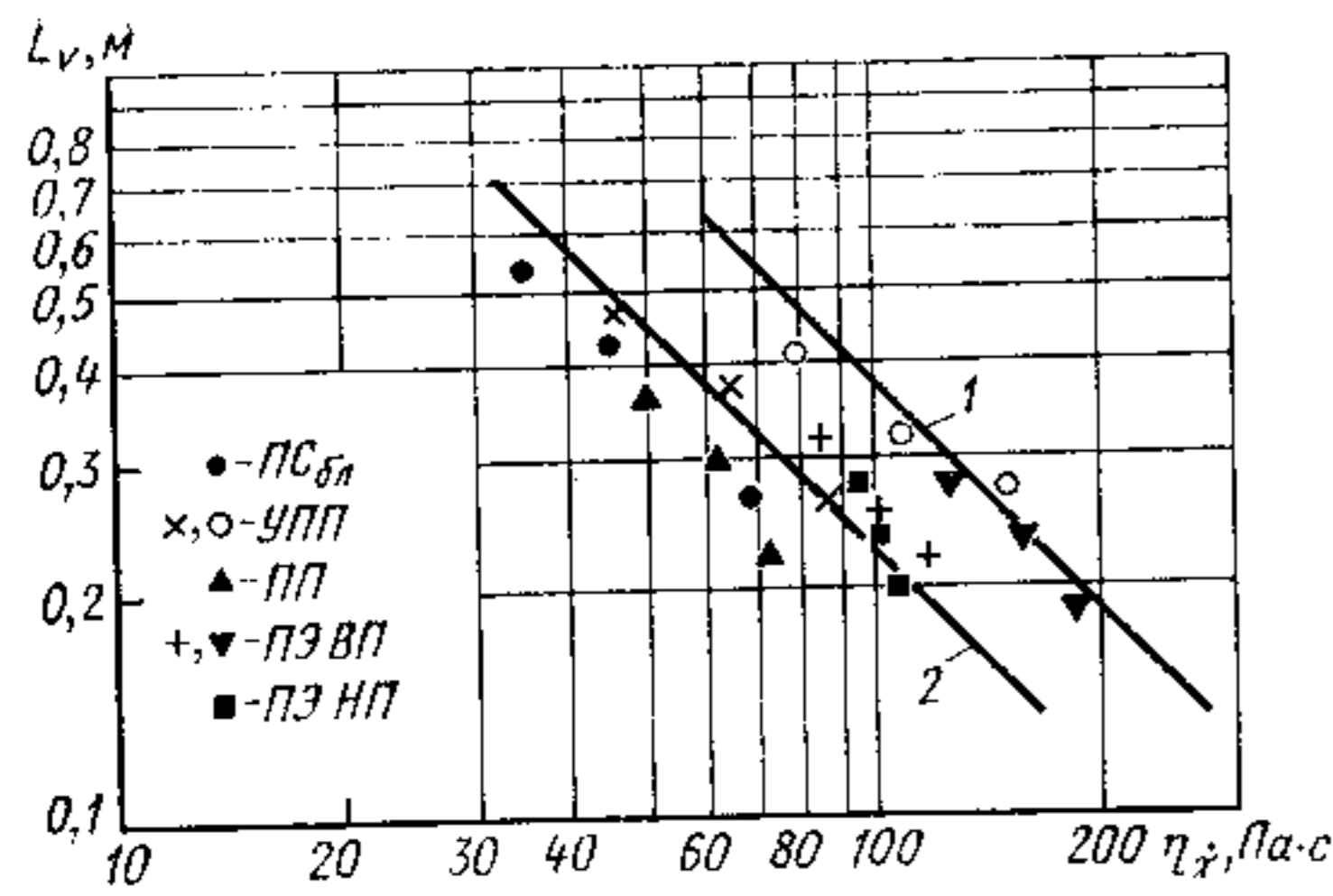


Рис. 1.18. Зависимость длины затекания полимера  $L_v$  в форму в режиме постоянной скорости течения от вязкости  $\eta_0$  при скорости сдвига заполнения  $\dot{\gamma}$  на спиральных формах с прямоугольным (1) и круглым (2) поперечными сечениями для различных полимеров и при разных температурах

Режим заполнения с постоянным давлением на входе в сопло. Длина заполнения в режиме постоянного давления на входе в сопло  $L_p$  увеличивается с повышением скорости течения материала в предшествующем режиме с постоянной объемной скоростью течения (рис. 1.19). В рассматриваемом режиме это значение скорости является начальным, т. е. с него начинает уменьшаться скорость течения.

В режиме постоянного давления на входе в сопло, как и в режиме постоянной объемной скорости течения, повышение температуры полимера приводит к увеличению длины затекания в форму вследствие снижения вязкости расплава полимера (рис. 1.20, а). Но эта зависимость в рассматриваемом режиме более слабая, чем в режиме с постоянной объемной скоростью течения при ее высоких значениях. Это объясняется тем, что в режиме постоянного давления на входе в сопло влияние неизотермичности (охлаждения) на процесс заполнения усиливается (см. с. 24). Поэтому изменение условий теплообмена оказывает более существенное влияние на формуемость. Повышение температуры полимера (изменение условий теплообмена) увеличивает интенсивность теплообмена (усиливается понижение температуры в текущем потоке расплава). Увеличение влияния неизотермичности процесса с повышением интенсивности теплообмена в результате повышения температуры в некоторой степени компенсирует увеличение длины затекания материала в форму в результате понижения вязкости, что обуславливает более слабую температурную зависимость длины затекания материала в режиме постоянного давления по сравнению с такой же зависимостью в режиме постоянной объемной скорости течения при ее высоких значениях.

Рис. 1.19. Зависимость длины затекания полимера  $L_p$  в форму в режиме постоянного давления от начальной скорости течения (обозначения см. к рис. 1.17)

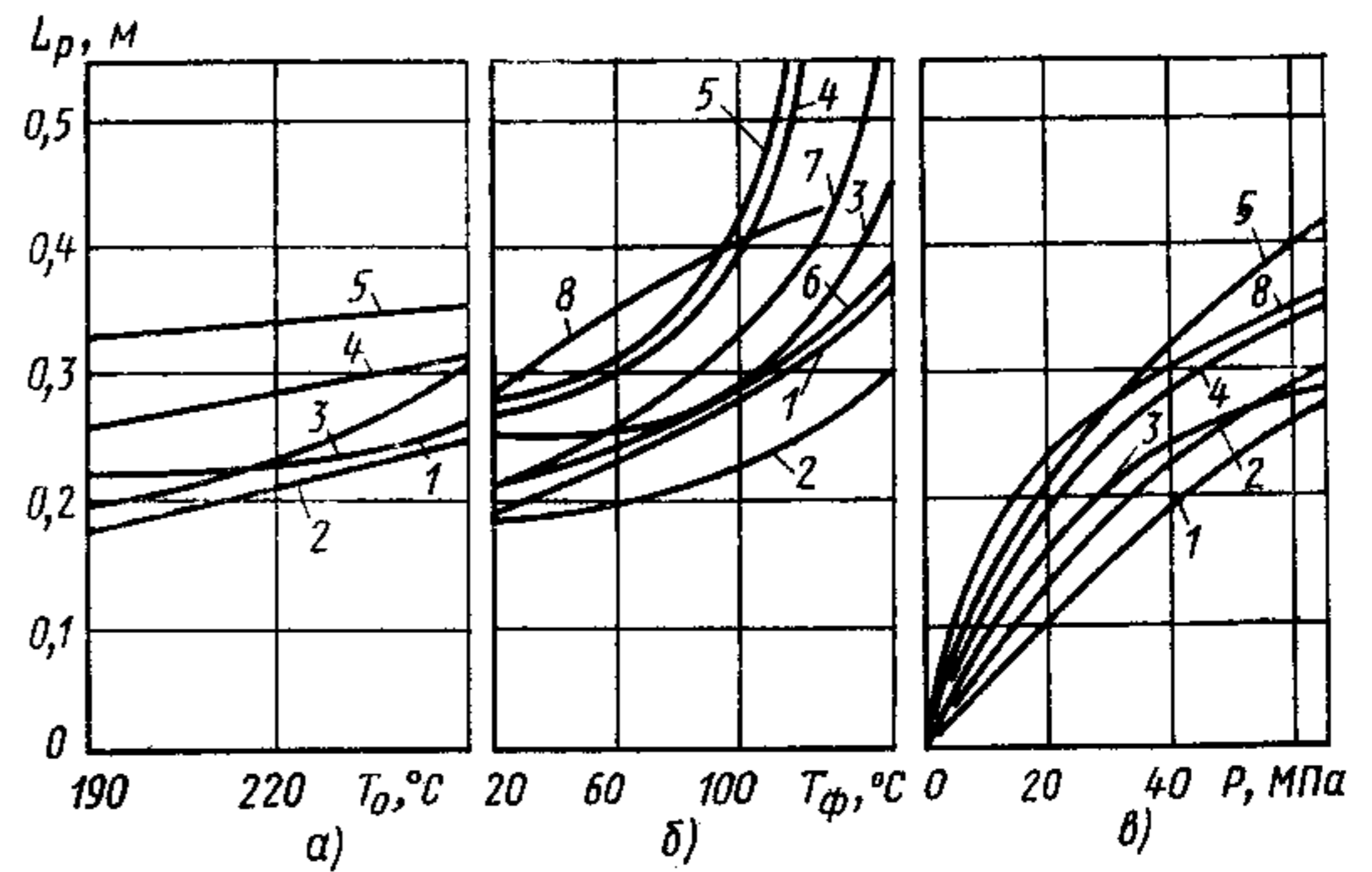
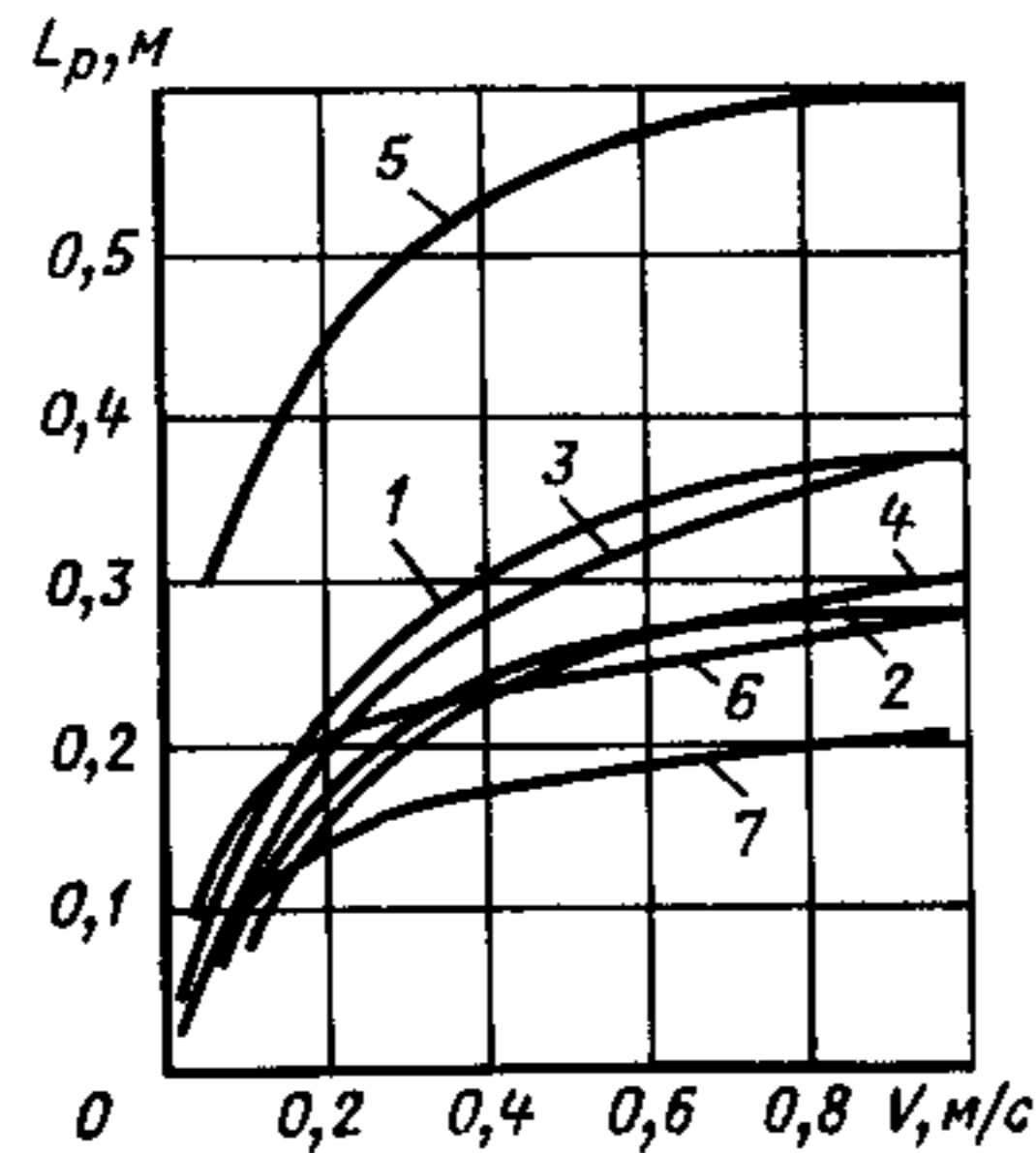


Рис. 1.20. Зависимость длины затекания полимера  $L_p$  в форму в режиме постоянного давления литья от температуры полимера  $T_0$  (а), температуры формы  $T_\phi$  (б), давления литья  $P_{л}$  (в) (обозначения см. к рис. 1.17)

Повышение температуры формы приводит к увеличению длины заполнения при постоянном давлении (рис. 1.20, б). Это объясняется теми же причинами, что и при заполнении в режиме постоянной скорости течения при ее сравнительно низких значениях. Влияние температуры формы на формуемость зависит от теплофизических свойств полимера — коэффициента температуропроводности и температуры текучести (от них зависят толщина пристенного слоя и понижение температуры в текущем потоке расплава) и реологических свойств — температурной зависимости вязкости, характеризуемой энергией активации (от нее зависит интенсивность снижения вязкости с понижением температуры). Влияние температуры формы на длину затекания усиливается с повышением температуры по мере приближения ее к температуре текучести.

Длина течения при постоянном давлении  $L_p$  увеличивается с ростом давления, установленного в гидросистеме машины (рис. 1.20, в), поскольку увеличиваются максимально реализуемые давление на входе в форму  $P_{ф.вх}$  и перепад давлений по ее длине  $\Delta P_\phi$ .

Таким образом, в режиме постоянной объемной скорости течения при ее больших значениях и сравнительно большой высоте полости формы процесс заполнения формы определяется, главным образом, гидродинамическими процессами, протекающими при литье, которые зависят от реологических свойств полимера. Поэтому формуемость определяется в основном вязкостью полимера при скорости сдвига заполнения и начальной температуре полимера  $T_0$ , с которой он поступает из инжекционного цилиндра. Вязкость полимера зависит от его природы и изменяется в зависимости от скорости сдвига, температуры и давления формования, молекулярных характеристик полимера (молекулярной массы, молекулярно-массового распре-

ления), его влажности перед переработкой и от введения различного рода добавок [9].

В режиме постоянной объемной скорости течения при сравнительно низких ее значениях и меньшей высоте полости формы, а также в режиме постоянного давления на входе в сопло процесс заполнения формы определяется как гидродинамическими процессами, которые зависят от реологических свойств полимера, так и процессами теплообмена (охлаждения), которые зависят от теплофизических свойств полимера. Поэтому формуемость в этом случае определяется как реологическими свойствами полимера (в режиме постоянной объемной скорости течения определяется вязкостью при скорости сдвига заполнения и начальной температуре материала, а также температурной зависимостью вязкости; в режиме постоянного давления определяется вязкостью при скорости сдвига заполнения в предшествующем режиме постоянной объемной скорости течения, характером изменения вязкости от этого значения при снижении скорости сдвига и температурной зависимости вязкости), так и теплофизическими свойствами полимера (коэффициентом теплопроводности и температурной текучести).

Влияние параметров литья на формуемость полимеров различается в различных режимах заполнения. Поэтому при оценке влияния параметров литья на формуемость полимеров следует рассматривать не общую длину затекания материала в форму, а влияние параметров на длину затекания в режиме постоянной объемной скорости течения и в режиме постоянного давления. Изделия получают стабильными по длине и в разных циклах литья, если форма заполняется в режиме постоянной объемной скорости течения. Поэтому такой режим, как правило, реализуют при формовании изделий в промышленных условиях. В связи с этим наиболее важную информацию дает оценка влияния параметров литья на длину затекания в режиме постоянной объемной скорости течения. Такие испытания можно проводить на спиральной форме с установленными в ней датчиками давлений.

### 1.2.3. Период нарастания давления

По окончании полного заполнения формы начинается период нарастания давления. Поскольку форма полностью заполнена, объемная скорость течения, развившаяся в предшествующем периоде заполнения в результате действия приложенного внешнего давления (в результате перемещения инжекционного шнека или поршня), падает (см. рис. 1.14, 1.15). Тенденция к спаду объемной скорости втекающего в форму расплава полимера определяет развитие процессов формования в рассматриваемом периоде.

К концу периода заполнения по длине системы сопло—форма образуется максимальный перепад давлений (рис. 1.21). В результате снижения объемной скорости течения в период нарастания давления уменьшаются скорости сдвига и, следовательно, напряжения сдвига, реализуемые при течении полимера в элементах системы

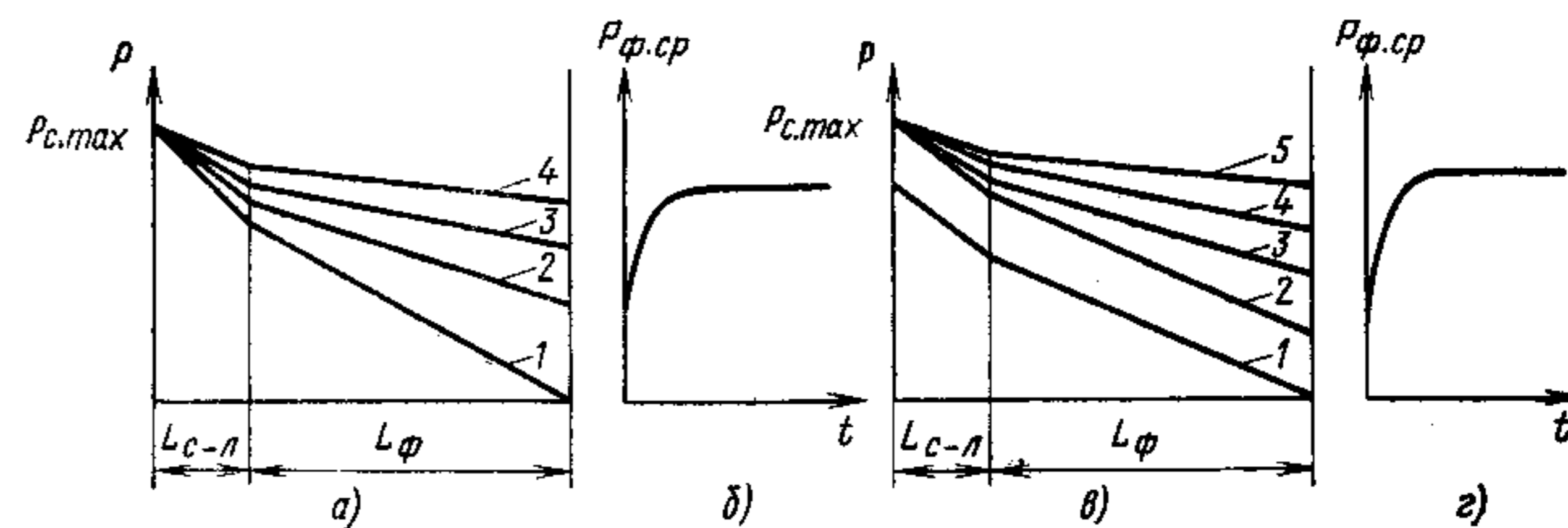


Рис. 1.21. Схема изменения давления по длине системы сопло — форма ( $L_{с-л}$  — длина системы сопло — литниковая втулка,  $L_{\phi}$  — длина формы) в текущие моменты (линии 2, 3, 4, 5) периода нарастания давления (а, в) и схема изменения среднего давления в форме  $P_{\phi,ср}$  в течение этого периода (б, г):

а, в — давление на входе в сопло  $P_c$  к концу периода заполнения формы (линия 1) достигло максимально установленного значения  $P_{с, max}$ ; б, г — давление  $P_c$  к концу периода заполнения (линия 1) не достигло  $P_{с, max}$

сопло—форма. Это приводит к уменьшению перепадов давлений в системе сопло — литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$  (снижаются перепады давлений в сопле  $\Delta P_c$  и литниковой втулке  $\Delta P_{л}$ ) и форме  $\Delta P_{\phi}$  (см. рис. 1.14, 1.15, 1.21). Перепады давлений  $\Delta P_{с-л}$  и  $\Delta P_{\phi}$  уменьшаются до минимальных значений. В этот момент в системе развиваются максимальные усилия, которые определяют усилия, необходимые для удержания формы в закрытом положении.

Снижение перепадов давлений в системе сопло—литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$  и форме  $\Delta P_{\phi}$  приводит к повышению давления по всей длине системы сопло—форма (см. рис. 1.14, 1.15, 1.21). Таким образом, в период нарастания давления одновременно протекают два явления: увеличение абсолютного давления по длине системы сопло—форма и изменение распределения давления по длине системы сопло—форма (в результате уменьшения перепадов давлений в системе сопло—литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$  и в форме  $\Delta P_{\phi}$ ).

В момент заполнения формы давление в гидроприводе может не достигать максимально установленного значения (рис. 1.21, в, г). В этом случае давление в системе сопло—форма (включая давление на входе в сопло) повышается за счет увеличения давления в гидроприводе от значения, возникающего в момент окончания заполнения, до максимально установленного. Давление в гидроприводе и соответственно давление в системе нарастают за очень короткий промежуток времени. Причем перепады давлений в системе сопло—литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$  и в форме  $\Delta P_{\phi}$  практически сохраняются постоянными и равными соответствующим перепадам в конце периода заполнения.

**Процессы формования.** Течение материала в системе (объемная скорость). В момент окончания заполнения формы движение фронта потока прекращается, но по длине системы сопло—форма сохраняется подвижное ядро расплава полимера. В этом ядре происходит течение расплава (втекание новых

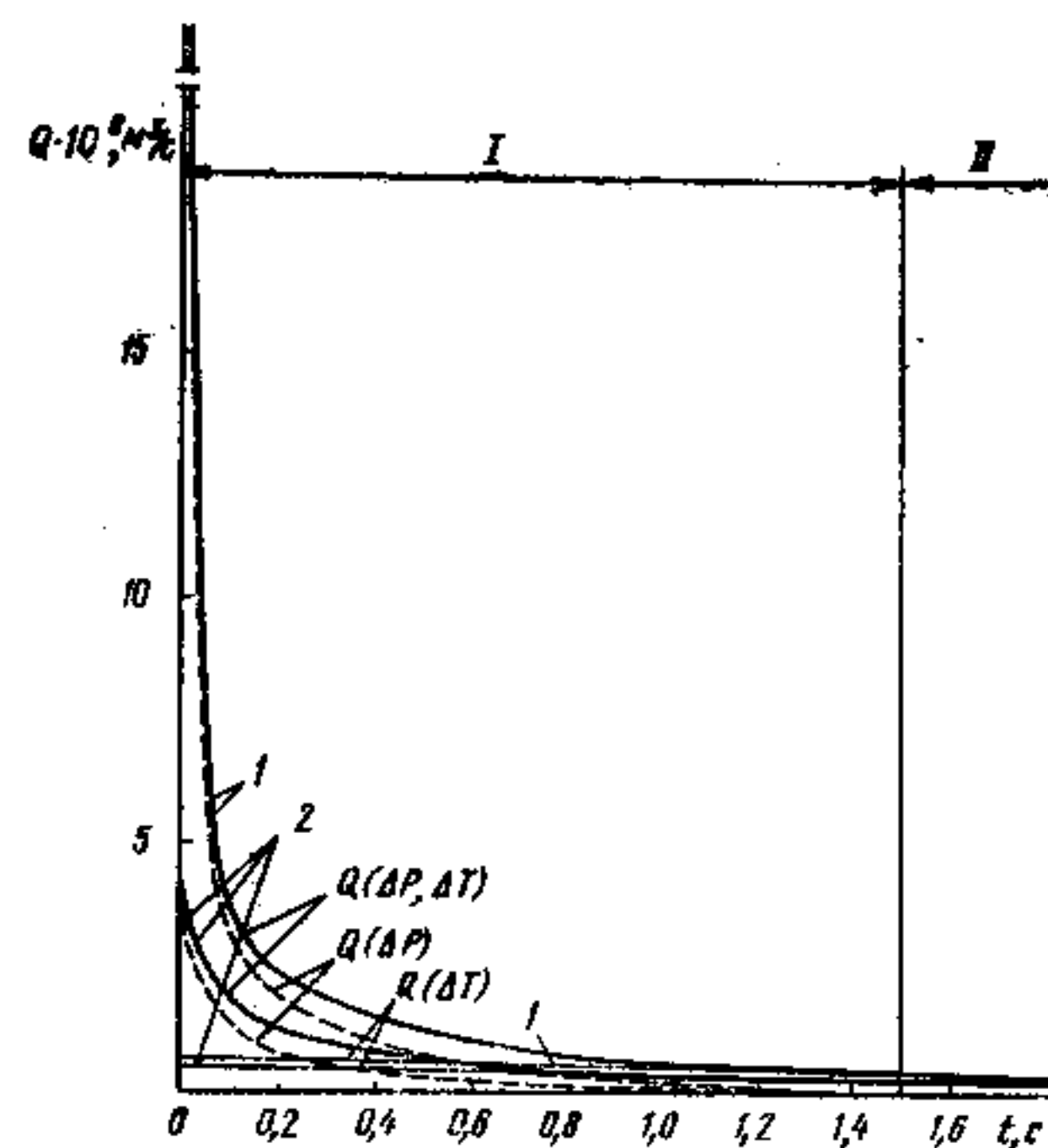


Рис. 1.22. Изменение объемной скорости течения полимера  $Q(\Delta P, \Delta T)$  и ее составляющих  $Q(\Delta P)$ ,  $Q(\Delta T)$  в период нарастания давления на первой (I) и на второй (II) стадиях: I — форма заполнилась в режиме постоянной объемной скорости течения (условия формования см. в обозначении к рис. 1.14); 2 — форма заполнялась первоначально в режиме постоянной, а затем в режиме убывающей скорости течения (условия формования см. в обозначении к рис. 1.15)

порций) из инжекционного цилиндра в форму, обеспечивающее подпитку формы во время выдержки под давлением. Длительность подпитки определяется продолжительностью охлаждения материала

в литниковом канале, которая зависит от высоты его поперечного сечения.

Втекание новых порций расплава обусловлено изменением плотности материала в форме. Расплавы полимеров характеризуются сжимаемостью, поэтому изменение давления вызывает изменение их плотности. В период нарастания давления повышается давление в каждой точке формы по ее длине, что приводит к увеличению плотности находящегося в ней материала (его усадке). Кроме того, происходит дальнейшее охлаждение материала, вызванное разностью между его температурой и температурой формы, что приводит к понижению среднеобъемной температуры материала. Понижение температуры материала также вызывает возрастание его плотности.

Давление на входе в сопло превышает давление в форме (см. рис. 1.21, а), что обуславливает градиент давлений по длине системы сопло—форма. Наложение градиента давлений вызывает течение расплава из нагревательного цилиндра (вход в систему) в форму, что компенсирует уменьшение объема полимера в форме (усадку) в результате увеличения его плотности. Таким образом, в отличие от предшествующего периода заполнения, в котором течение в системе сопло—форма вызвано приложением внешнего давления, в период нарастания давления течение полимера в системе обусловлено наложением градиента давлений, определяемого процессами изменения плотности полимера под влиянием повышения давления и понижения температуры в результате развивающегося процесса охлаждения.

Поскольку изменение плотности полимера, обуславливающее течение в системе, вызвано двумя явлениями (повышением давления и снижением температуры), объемную скорость течения  $Q(\Delta P, \Delta T)$  можно рассматривать (рис. 1.22) как состоящую из двух составляющих [13]. Первая составляющая  $Q(\Delta P)$  (пунктирная линия) обусловлена таким свойством полимера, как способность изменять плотность под действием давления, и вызвана повышением давле-

ния в системе. Вторая составляющая  $Q(\Delta T)$  (штрих-пунктирная линия) обусловлена способностью полимера изменять плотность под действием температуры и вызвана понижением температуры в результате охлаждения.

В начальные моменты периода перепад давлений в системе сопло—форма резко уменьшается, что приводит к резкому повышению давления в форме (см. рис. 1.14, 1.15). Поэтому составляющая  $Q(\Delta P)$  имеет наибольшее значение и превышает составляющую  $Q(\Delta T)$ . В последующие моменты перепад давлений по длине системы сопло—форма снижается с меньшей скоростью, что обуславливает уменьшение скорости нарастания давления в форме. Это приводит к уменьшению составляющей  $Q(\Delta P)$ . В момент развития в системе максимальных усилий, когда давление в форме достигает наибольшего значения, составляющая  $Q(\Delta P)$  становится равной нулю.

В течение всего периода скорость развития процесса охлаждения мало изменяется. Поэтому вторая составляющая  $Q(\Delta T)$ , обусловленная повышением плотности за счет понижения температуры, слабо изменяется в течение всей продолжительности выдержки полимера в форме под давлением.

Перепад давлений в системе сопло—форма. Течение расплава в системе сопло—форма из инжекционного цилиндра в форму для подпитки обуславливает перепад давлений по длине системы (рис. 1.23). Механизм процесса течения расплава в системе сопло—форма в период нарастания давления такой же, что и в период заполнения: потери давления затрачиваются на вязкое течение в проходных каналах элементов, составляющих систему (в сопле, литниковых каналах, форме), и на входные эффекты, сопровождающие течение расплава в местах перехода из канала большего диаметра в канал с меньшим диаметром (например, на входе в сопло или в местах впуска). Поэтому общий перепад давлений в системе сопло—форма  $\Delta P_{с-ф}$  в период нарастания давления состоит из тех же составляющих, что и в период заполнения формы (см. табл. 1.1, рис. 1.23). В период нарастания давления составляющие общего перепада уменьшаются до минимальных значений вследствие снижения объемной скорости течения.

Стадии периода нарастания давления. В этот период можно выделить две стадии, отличающиеся по характеру изменения перепада давлений в системе и по доминирующему вкладу составляющих  $Q(\Delta P)$ ,  $Q(\Delta T)$  в общую объемную скорость течения [13].

Первая стадия. Эта стадия характеризуется уменьшением перепадов давлений в системе сопло—литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$  и в форме  $\Delta P_{ф}$  и повышением в результате этого давления по всей длине системы сопло—форма (см. рис. 1.14, 1.15).

В начальный отрезок времени (до 0,05—0,1 с) объемная скорость течения  $Q$  резко падает и с наибольшей скоростью уменьшаются перепады давлений в системе сопло—литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$  и в форме  $\Delta P_{ф}$  (к концу этого временного отрезка  $\Delta P_{ф}$  на 30—50 %

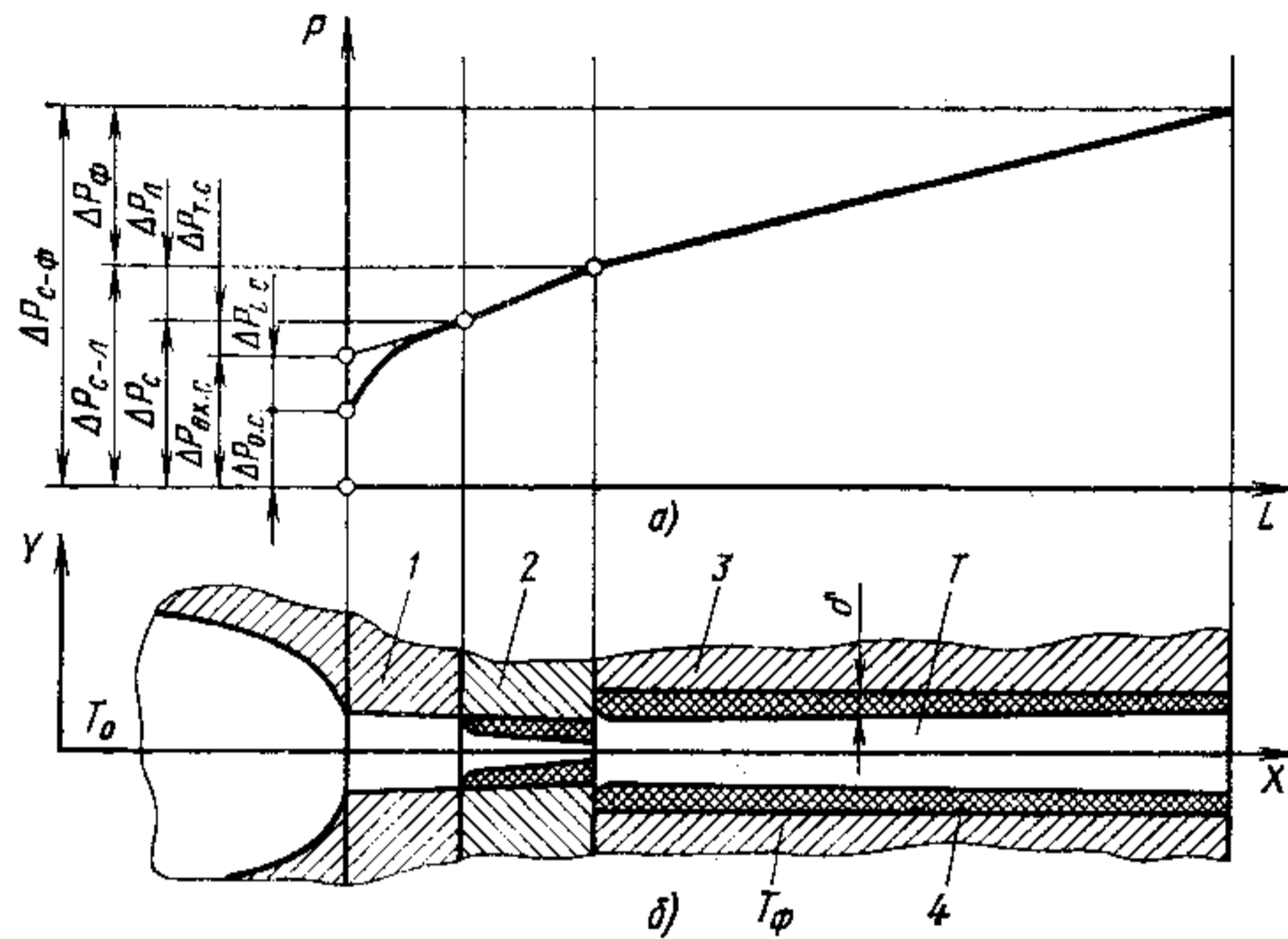


Рис. 1.23. Структура перепада давлений по длине системы сопло—форма (а) в период нарастания давления со схемой течения полимера (б):  
1 — сопло; 2 — литниковая втулка; 3 — форма; 4 — пристенный слой полимера

превышает окончательное значение перепада давлений, устанавливающегося в форме в рассматриваемый период) — см. рис. 1.14, 1.15. Это определяет высокую скорость нарастания давления в системе. Резкое повышение давления приводит к тому, что изменение плотности, определяющее течение полимера в системе, происходит главным образом за счет изменения давления, а не температуры. Поэтому составляющая  $Q(\Delta P)$ , обусловленная повышением давления в системе, является основным членом в суммарной объемной скорости течения  $Q(\Delta P, \Delta T)$  (см. рис. 1.22).

В начальный отрезок времени резко возрастает влияние давления на вязкость и входные эффекты (их увеличение за счет повышенного давления). Это приводит к резкому усилению влияния давления на составляющие общего перепада давлений (их увеличение за счет влияния давления на вязкость и входные эффекты) — см. коэффициент давления  $K_d$  на рис. 1.14, 1.15. Усиление влияния давления вызвано двумя причинами. Во-первых, возрастает абсолютное давление в системе сопло—форма и материал течет при сравнительно более высоком давлении, чем в период заполнения формы. Во-вторых, падение объемной скорости вызывает резкое снижение скорости сдвига, реализуемой при течении расплава в проходных каналах элементов системы сопло—форма. Зависимость вязкости от давления усиливается с уменьшением скорости сдвига [9]. Это приводит к усилению эффекта возрастания вязкости расплава с повышением давления (при одном и том же повышении давления вязкость возрастает в большей мере).

В начальный отрезок времени усиливается влияние неизомермичности, которая обусловлена разностью между температурами полимера и формы, на процесс течения расплава в литниковой втулке и

в форме и соответственно на перепады давлений в этих элементах  $\Delta P_l$  и  $\Delta P_f$  (их увеличение за счет неизомермичности процесса) — (см.  $K_{неиз}$  на рис. 1.14, 1.15). Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, понижение скорости сдвига течения в форме увеличивает температурную зависимость вязкости. Это усиливает эффект возрастания вязкости расплава за счет понижения его температуры в результате охлаждения (при одном и том же понижении температуры вязкость возрастает в большей мере.) Во-вторых, развивается процесс охлаждения в результате увеличения его продолжительности (увеличивается толщина пристенного слоя и понижается температура в текущем полимере).

Повышение влияния давления и неизомермичности на составляющие перепада давлений в системе ( $\Delta P_f$ ,  $\Delta P_l$ ,  $\Delta P_c$ ) приводит к тому, что эти составляющие уменьшаются с меньшей скоростью, чем падает объемная скорость течения (см. рис. 1.14, 1.15). В большой степени этому способствует также тот факт, что в начальный отрезок времени расплав в системе течет со скоростью сдвига, соответствующей области аномально-вязкого (неньютоновского) течения. При неньютоновском течении изменение напряжения сдвига, определяющего составляющие  $\Delta P_{c-ф}$ , меньше, чем изменение скорости сдвига, зависящей от  $Q$  [9]. Перепады давлений в системе сопло — литниковая втулка  $\Delta P_{c-л}$  и в форме  $\Delta P_f$  уменьшаются со скоростями, которые в десятки раз меньше, чем скорость падения объемного расхода (см. рис. 1.14). Это дает возможность сравнительно просто наблюдать процесс повышения давления в системе поскольку он протекает не мгновенно, а в течение определенного промежутка времени.

В последующий промежуток времени объемная скорость течения  $Q$  снижается в результате уменьшения составляющей  $Q(\Delta P)$ , обусловленной повышением давления в форме (см. рис. 1.22). Скорость изменения  $Q$  постепенно снижается. Это вызвано двумя причинами. Во-первых, уменьшается скорость изменения составляющей объемной скорости течения  $Q(\Delta P)$ . Во-вторых, составляющая  $Q(\Delta P)$  уменьшается и в некоторый момент становится равной составляющей  $Q(\Delta T)$ , обусловленной понижением температуры. В последующий промежуток времени составляющая  $Q(\Delta T)$  становится доминирующим членом в суммарной объемной скорости течения полимера (см. рис. 1.22). Составляющая  $Q(\Delta T)$  незначительно изменяется в течение всего периода нарастания давления.

Происходит дальнейшее развитие процесса охлаждения (увеличивается толщина пристенного слоя и понижается температура в текущем полимере), что приводит к усилению влияния неизомермичности процесса на перепады давлений в форме  $\Delta P_f$  и в литниковой втулке  $\Delta P_l$  (см.  $K_{неиз}$  на рис. 1.14, 1.15). Постоянное возрастание давления в системе сопло—форма приводит к усилению его влияния на вязкость, в результате чего возрастает влияние давления на составляющие общего перепада давлений по длине этой системы (см.  $K_d$  на рис. 1.14, 1.15).

Одновременное уменьшение скорости снижения объемного расхода течения  $Q$  и возрастание влияния неизомермичности процесса и

давления, реализуемого в системе, на перепады давлений приводит к тому, что скорость уменьшения перепадов давлений в системе сопло—литниковая втулка  $\Delta P_{c-l}$  и в форме  $\Delta P_{\phi}$  постоянно снижается (см. рис. 1.14, 1.15). Это, в свою очередь, приводит к уменьшению скорости нарастания давления в системе по мере приближения его к максимальному значению.

**Вторая стадия.** На первой стадии периода нарастания давления сохраняется соответствие между перепадами давлений в системе и объемной скоростью течения, при которой компенсируется уменьшение объема полимера в форме за счет повышения его плотности в результате изменения давления и понижения температуры. При этом перепады давлений в системе сопло — форма уменьшаются. По мере развития охлаждения наступает такой момент, начиная с которого для компенсации уменьшения плотности полимера только за счет понижения температуры требуется втекание расплава с такой объемной скоростью течения, при которой перепады давлений в форме  $\Delta P_{\phi}$  и в системе сопло — литниковая втулка  $\Delta P_{c-l}$  (при сравнительно сильном влиянии на них неизотермичности) должны были бы возрасти. В свою очередь, это должно приводить к увеличению общего перепада давлений по всей длине системы  $\Delta P_{c-\phi}$ . Но это произойти не может, поскольку давление на входе в сопло  $P_c$  достигло максимально реализуемого значения, обусловленного установленным в гидроприводе давлением, а давление в форме не уменьшается ввиду притока новых порций расплава полимера.

В результате наступает вторая стадия — стадия «динамического» равновесия (см. рис. 1.14, 1.15). На этой стадии перепады давлений в форме  $\Delta P_{\phi}$  и в системе сопло — литниковая втулка  $\Delta P_{c-l}$  практически не изменяются и имеют минимальные значения для периода нарастания давления, поэтому давление в системе сопло — форма сохраняется почти постоянным. Поскольку давление в форме практически не изменяется, составляющая  $Q(\Delta P)$  объемной скорости течения, обусловленная повышением давления, равна нулю. Втекание расплава полимера частично компенсирует уменьшение его объема в форме в результате увеличения плотности только за счет понижения температуры. Поэтому объемная скорость течения равна составляющей  $Q(\Delta T)$ , обусловленной понижением температуры полимера.

В момент перехода от первой стадии ко второй в системе развиваются максимальные давления (усилия), которые стремятся раскрыть форму. Давление, развивающееся в форме в этот переходный момент, определяет важный параметр машины — усилие запирающей формы, если на литьевой машине не предусмотрен режим формования со сбросом давления.

**Влияние конструктивного оформления узлов литьевой машины и оснастки на процессы формования.** Влияние конструкции и инжекционного узла машины. Конструкция инжекционного узла машины (с предварительной или без предварительной пластификации) оказывает существенное влияние на процессы формования в период нарастания давления (включая выдержку под давлением).

На машинах без предварительной пластификации полимера развиваемое максимальное давление на входе в сопло и, следовательно, в форме зависит от прикладываемого к инжекционному поршню давления (усилия), порции полимера, подаваемой в инжекционный цилиндр, продолжительности выдержки поршня под давлением, температурного режима инжекционного цилиндра и его конструкции. Это можно проиллюстрировать диаграммой давление—время (рис. 1.24), которая показывает характер изменения давления на входе в форму (максимальное давление по ее длине) при различных условиях литья. Точки  $a_1$  и  $a_2$ ,  $b_1$  и  $b_2$ ,  $d_1$  и  $d_2$  соответствуют началу периодов заполнения формы, нарастания давления и окончанию выдержки полимера в форме под давлением.

Увеличение давления, прикладываемого к инжекционному поршню, приводит к увеличению давления на входе в сопло  $P_c$  и давления, передаваемого в форму. Если привод отрегулирован на давление, при котором максимально реализуемое давление на входе в форму достигает значения  $P_2$ , и порция полимера достаточна, то изменение давления в форме в течение выдержки полимера под давлением пойдет по линии 2. Если привод отрегулирован на меньшее давление, то максимально реализуемое давление на входе в форму при прочих равных условиях достигает меньшего значения ( $P_3 < P_2$ ) и изменение давления в форме пойдет по линии 3.

Неравномерная подача полимера в инжекционный цилиндр от цикла к циклу приводит к тому, что меняется сопротивление гранул перемещению поршня и соответственно изменяются потери давления в инжекционном цилиндре (без предварительной пластификации составляют существенную часть в общих потерях давления от привода до формы). Поэтому неравномерная подача полимера вызывает заметное различие в реализуемых давлениях на входе в сопло и в форме в различных циклах литья.

Если давление привода отрегулировано на значение, при котором давление в форме (при достаточной порции полимера) достигает  $P_2$ , а порция уменьшена, то изменение давления может пойти по линиям 4, 5, 6 и 7 в зависимости от порции полимера. При недостаточной дозе загрузки как на машинах без предварительной пластификации материала, так и на машинах с предварительной пластификацией невозможно достичь высокого давления в форме при любом давлении инжекционного цилиндра.

Температурный режим инжекционного цилиндра также влияет на давление, развиваемое на входе в сопло, и, следовательно, на давление, развиваемое в форме. Особенно большое влияние оказывает зона, в которой полимер находится в виде гранул. Повыше-

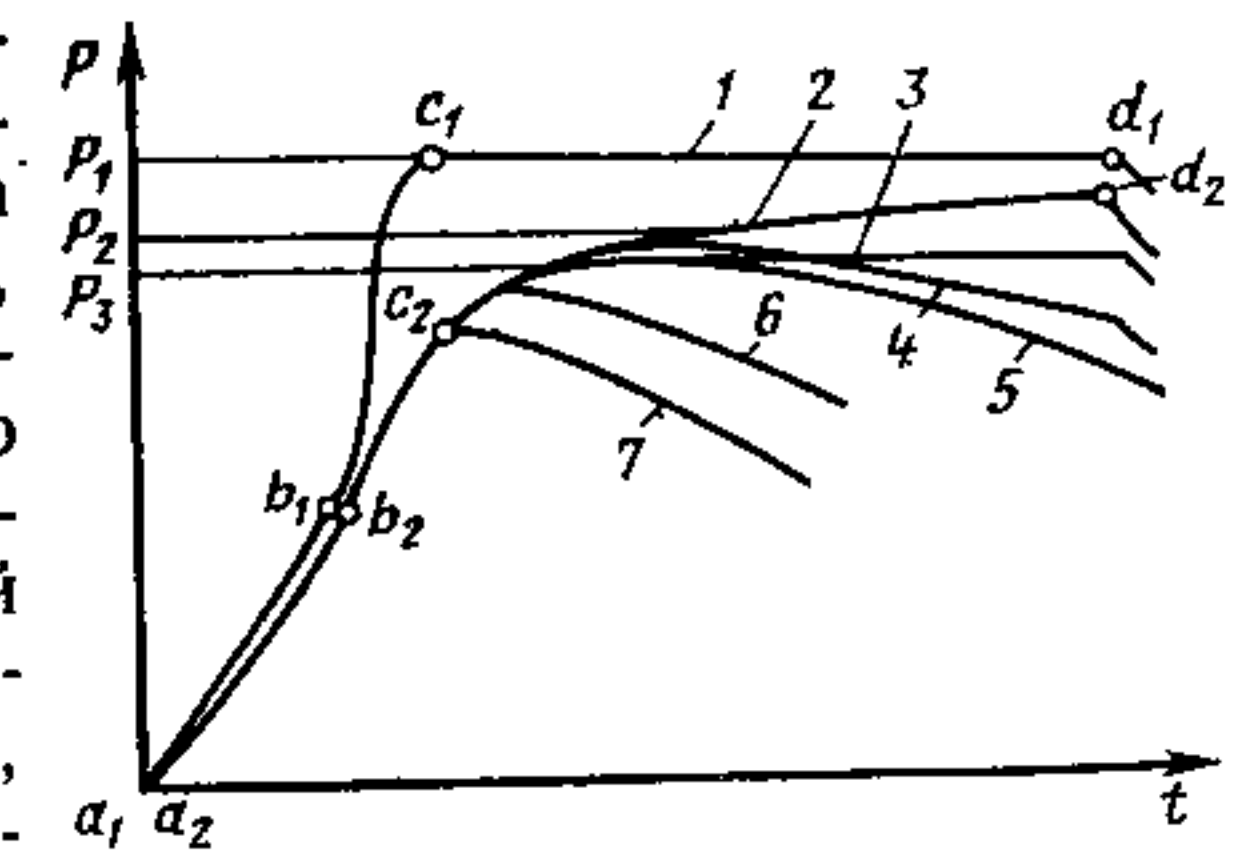


Рис. 1.24. Диаграмма давление  $P$ —время  $t$  при различных условиях литья

ние температуры цилиндра приводит к уменьшению потерь давления, затрачиваемых на трение гранул о стенки цилиндра. В результате этого повышается давление, реализуемое на входе в сопло и в форме.

Давление на входе в сопло и в форме в течение выдержки под давлением на участке  $c_2 d_2$  на машинах без предварительной пластикации изменяется (см. линию 2 на рис. 1.24). Увеличение продолжительности выдержки под давлением улучшает прогрев полимера в зоне, в которой он находится в виде гранул, что снижает потери давления в инжекционном цилиндре за счет трения полимера о стенки цилиндра и улучшает передачу давления на вход в сопло и в форму (при достаточной порции полимера). Поэтому с увеличением продолжительности выдержки давление в форме возрастает (см. линию 2 на рис. 1.24). После застывания литника, когда форма изолирована от инжекционного цилиндра, выдержка поршня в переднем положении под давлением не влияет на давление в форме.

Поскольку развиваемое давление на входе в форму на машинах без предварительной пластикации зависит от многих рассмотренных выше факторов, поддерживать давление на входе в форму постоянным в течение выдержки под давлением на участке  $c_2 d_2$  (см. рис. 1.24) довольно сложно. Постоянству давления в форме на этих машинах способствует точная дозировка загружаемого полимера, предварительный подогрев его в бункере, тщательное соблюдение теплового режима инжекционного цилиндра. Отработка оптимального технологического режима на машинах без предварительной пластикации в производственных условиях представляет собой сложную и трудоемкую задачу; для этого необходимо иметь большой практический навык и знать особенности каждой машины.

На машинах с предварительной пластикацией материала постоянство давления на входе в сопло и на входе в форму в течение выдержки под давлением на участке  $c_1 d_1$  (линия 1 на рис. 1.24) обусловлено конструкцией инжекционного узла литьевой машины. На таких машинах полимер дозируется в виде расплава, поэтому потери давления в инжекционном цилиндре на трение расплава о стенки невелики и составляют незначительную часть общих потерь давления от привода до формы. В связи с этим колебания потерь давления в инжекционном цилиндре за счет возмущающих воздействий (колебание температуры инжекционного цилиндра, неравномерная подача полимера и др.) не оказывают заметного влияния на передачу давления на вход в сопло и в форму.

На машинах с предварительной пластикацией по окончании первой стадии периода нарастания давления, значения давления на входе в сопло и на входе в форму достигают максимальных величин и сохраняются постоянными в течение последующего периода выдержки под давлением на участке  $c_1 d_1$  (до застывания литника) — см. линию 1. Увеличение продолжительности периода выдержки под давлением не приводит к существенному росту давления в форме.

Постоянство давления на входе в сопло и в форму на машинах с предварительной пластикацией в течение периода выдержки под давлением на участке  $c_1 d_1$ , которое сохраняется от цикла к циклу,

является важным фактором. Оно обеспечивает возможность точного регулирования давления на входе в форму регулированием давления в гидроприводе. Давление — важный технологический параметр, определяющий процессы формования, качество отливаемых изделий и параметры работы литьевых машин. Поэтому благодаря легкости и точности регулирования давления машины с предварительной пластикацией обладают технологическими преимуществами по сравнению с машинами без предварительной пластикации. На машинах с предварительной пластикацией подбор технологического режима литья упрощается и улучшается качество отливаемых изделий.

Давление в форме в период ее заполнения на литьевых машинах с предварительной пластикацией увеличивается быстрее по сравнению с таковым на машинах без предварительной пластикации и с большей скоростью нарастает после ее заполнения — кривая  $a_1 c_1$  смещена влево.

Повышение температуры полимера на машинах без предварительной пластикации способствует увеличению скорости нарастания давления. Повышение температуры цилиндра в зоне, в которой полимер находится в виде гранул, уменьшает потери давления в этой зоне и увеличивает скорость нарастания давления в форме. Такое же влияние оказывает предварительное уплотнение гранул и увеличение продолжительности их прогрева.

Уменьшение скорости нарастания давления увеличивает продолжительность охлаждения полимера на этой стадии. Это приводит к большему увеличению толщины пристенного слоя в форме и в литниковой втулке и к более сильному охлаждению текущего расплава и, следовательно, к более сильному уменьшению его текучести на этой стадии. В результате ухудшается передача давления вдоль системы сопло — форма и сохраняется большой перепад давлений в форме в момент развития в системе максимальных усилий и в течение последующей выдержки под давлением. Поэтому на машинах без предварительной пластикации материала в течение выдержки под давлением на участке  $c_2 d_2$  в форме сохраняется больший перепад давлений, чем на машинах с предварительной пластикацией. Неравномерное распределение давления при формовании в течение выдержки под давлением приводит к разнотолщинности и различию свойств по длине получаемых изделий. На машинах без предварительной пластикации для ускорения заполнения формы и нарастания давления используют предварительное уплотнение гранул или литье с предварительным сжатием. В последнем случае удается повысить давление в литьевой форме.

Влияние конструкции наконечника шнека. На машинах с предварительной пластикацией конструкция наконечника шнека оказывает влияние на передаваемое в форму давление в течение выдержки под давлением. Шнек может быть выполнен с клапаном и без клапана на конце.

На машинах без клапана на конце шнека с увеличением давления на входе в сопло возникает обратный поток по виткам шнека и часть находящегося перед шнеком полимера выдавливается в обратном на-

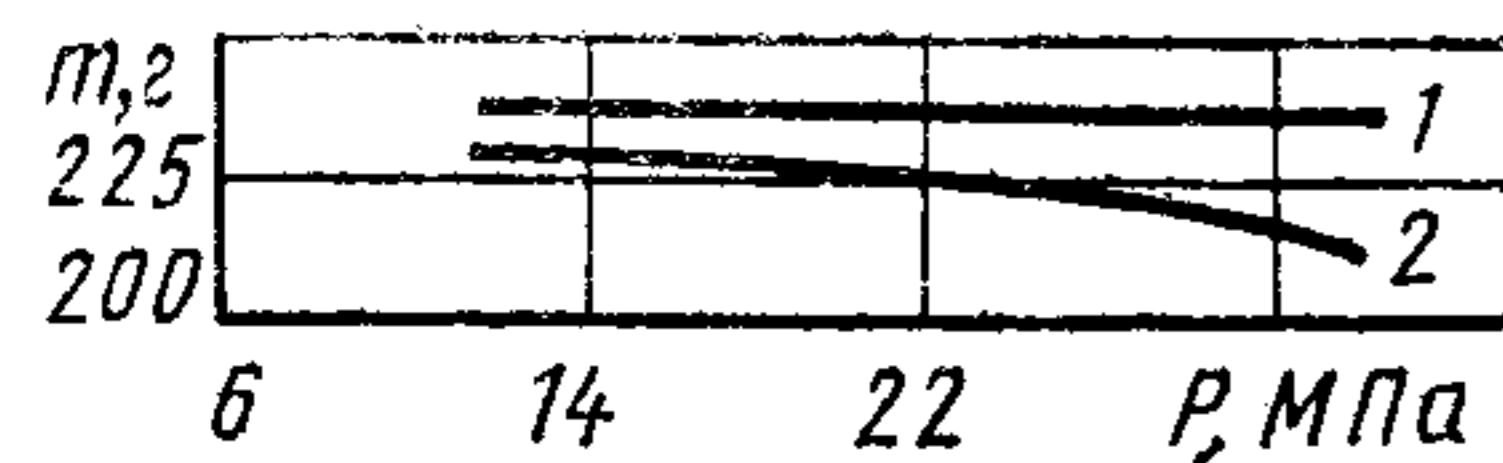


Рис. 1.25. Зависимость массы  $m$  отливки от давления  $P$ :  
1 — для шнека с клапаном; 2 — для шнека без клапана

правлении. В течение выдержки под давлением давление на входе в сопло достигает наибольшего значения, в результате чего утечки полимера по виткам шнека могут быть значительными. Это приводит к уменьшению давления в форме и количества полимера, поступающего в форму для подпитки, что, в свою очередь, вызывает уменьшение передаваемого в форму давления и уменьшение массы отливаемых изделий (кривая 2 на рис. 1.25). Изделия, получаемые в разных циклах литья, отличаются по массе.

На машинах без клапана на конце шнека характер передачи давления в форму зависит от того, вращается или не вращается шнек в течение периода выдержки полимера под давлением. Если в период выдержки полимера под давлением привести шнек во вращение, то за счет этого в форму подаются дополнительные порции полимера. При вращении шнека и подаче в форму дополнительных порций полимера уменьшаются утечки полимера по сравнению со случаем, когда шнек не вращается. Масса отливаемого изделия увеличивается.

На машинах, снабженных клапаном на конце шнека, утечки по виткам шнека минимальные. Поэтому они практически не оказывают влияния на давление, развивающееся на входе в форму в течение периода выдержки под давлением, и на массу получаемых изделий. Колебание в массе отливаемых изделий незначительное.

Влияние размеров оформляющей полости формы. Толщина и длина оформляющей полости формы (т. е. ее объем) оказывают влияние на распределение в ней давления на первой стадии периода нарастания давления, в момент развития в системе максимальных усилий и в течение последующего периода выдержки под давлением на участке  $c_1 d_1$  (см. рис. 1.24).

В формах с большей толщиной оформляющей полости перепад давлений по ее длине в течение периода выдержки под давлением меньше, чем при тех же параметрах формования в формах с меньшей толщиной полости (рис. 1.26, б, в). Это улучшает передачу давления в форму и приводит к более равномерному распределению давления по ее длине в момент развития максимальных усилий и в течение последующего периода формования до застывания литника (на участке  $c_1 d_1$  — см. рис. 1.24). При этом абсолютное давление в форме с большей толщиной полости при одинаковом давлении в гидросприводе выше. Уменьшение перепада давлений в форме с увеличением ее толщины объясняется двумя причинами. Во-первых, уменьшается гидравлическое сопротивление формы, что приводит к уменьшению потерь давления, затрачиваемых на вязкое течение [см. формулы (1.1а), (1.2а)]. Во-вторых, с увеличением толщины формы ослабевает интенсивность теплообмена, что определяет менее сильное развитие охлаждения (меньше снижается температура в текущем расплаве), в результате чего в меньшей мере уменьшается текучесть полимера.

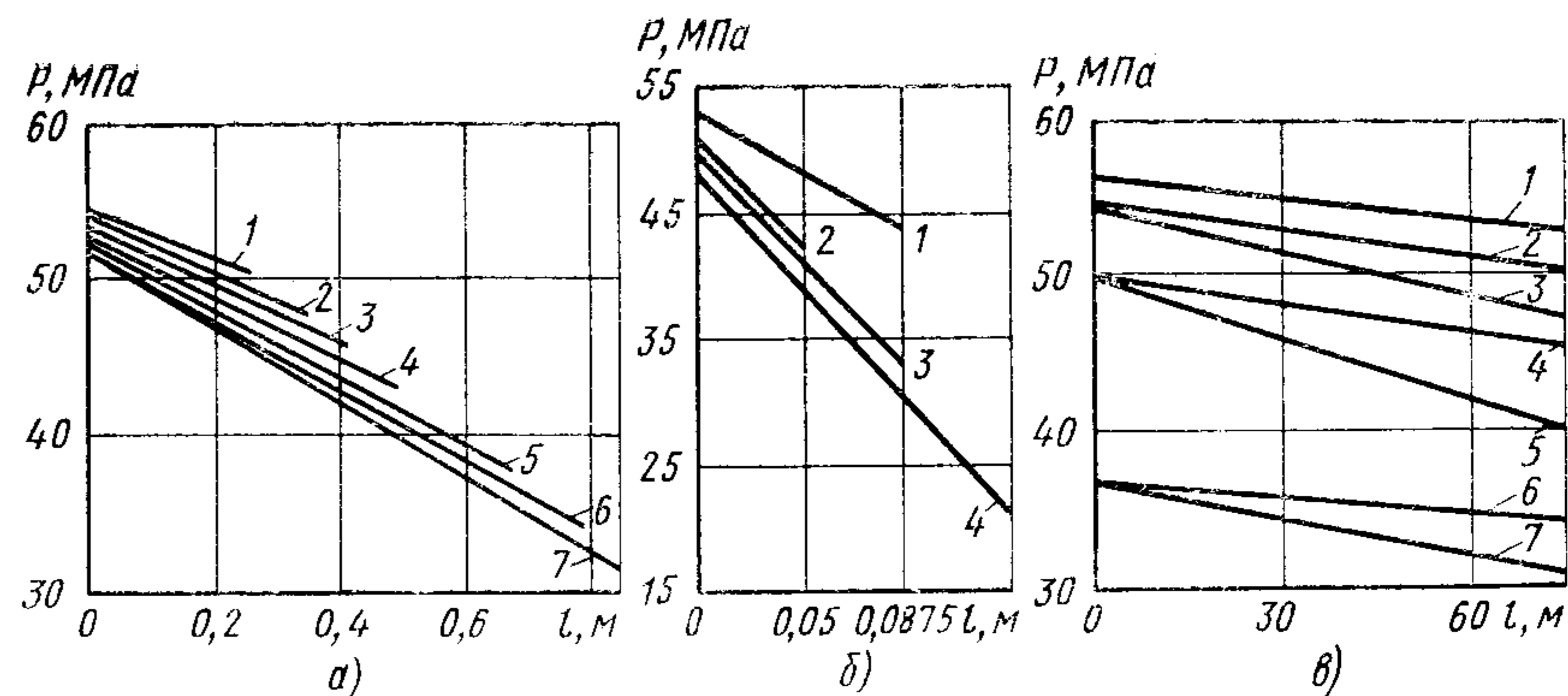


Рис. 1.26. Зависимость давления, развиваемого в форме, от ее длины:

а — пластины толщиной  $h = 5 \cdot 10^{-3} м$  при начальной температуре полимера  $T_0 = 190^\circ C$  и давлении на входе в сопло  $P_c = 66 МПа$ : 1 —  $l = 0,26 м$ ; 2 —  $l = 0,315$ ; 3 —  $l = 0,405$ ; 4 —  $l = 0,48$ ; 5 —  $l = 0,66$ ; 6 —  $l = 0,76$ ; 7 —  $l = 0,84 м$ ; б — диски при  $T_0 = 190^\circ C$  и  $P_c = 66 МПа$ : 1 —  $d = 0,175 м$ ,  $h = 5 \cdot 10^{-3} м$ ; 2 —  $d = 0,1$ ;  $h = 2 \cdot 10^{-3}$ ; 3 —  $d = 0,175$ ;  $h = 2 \cdot 10^{-3}$ ; 4 —  $d = 0,285 м$ ;  $h = 2 \cdot 10^{-3} м$ ; в — чашки: 1 —  $h = 2 \cdot 10^{-3} м$ ,  $T_0 = 250^\circ C$ ,  $P_c = 66 МПа$ ; 2 —  $h = 4 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 220$ ,  $P_c = 66$ ; 3 —  $h = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 220$ ,  $P_c = 66$ ; 4 —  $h = 4 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 190$ ,  $P_c = 66$ ; 5 —  $h = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 190$ ,  $P_c = 66$ ; 6 —  $h = 4 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 220$ ,  $P_c = 44$ ; 7 —  $h = 2 \cdot 10^{-3} м$ ,  $T_0 = 220^\circ C$ ,  $P_c = 44 МПа$   
Материал — полимер полистирол блочный марки ПСМД

Это определяет менее сильное влияние неизотермичности процесса на перепад давлений в форме (его увеличение за счет неизотермичности процесса).

Увеличение длины формы при прочих равных условиях снижает среднее давление в форме, образующееся в момент развития максимальных усилий и в течение последующей выдержки под давлением до застывания литника. Это объясняется тем, что увеличивается перепад давлений по длине формы (рис. 1.26, а). Распределение давления в форме менее равномерное: чем больше расстояние от впускного отверстия до конца формы, тем ниже давление. Увеличение перепада давлений в форме с увеличением ее длины можно объяснить возрастанием ее гидравлического сопротивления.

**Влияние параметров литья на максимальное давление в форме и его распределение.** По окончании первой стадии периода нарастания давления в форме развивается максимальное давление (усилие) — см. рис. 1.14, 1.15. Последующее формование полимера до застывания литника происходит практически при этом давлении. Давление, возникающее в форме в момент развития максимальных усилий, является важным параметром. Оно определяет параметр машины — усилие запирающей формы, которое должно превышать максимальное усилие, развивающееся в форме, для предотвращения ее раскрытия, чтобы избежать образования облоя и разнотолщинности отливаемых изделий. Максимальное давление формования оказывает существенное влияние на плотность получаемых изделий и их качество. Распределение давления по длине формы в момент развития максимальных усилий и в течение последующей выдержки под дав-



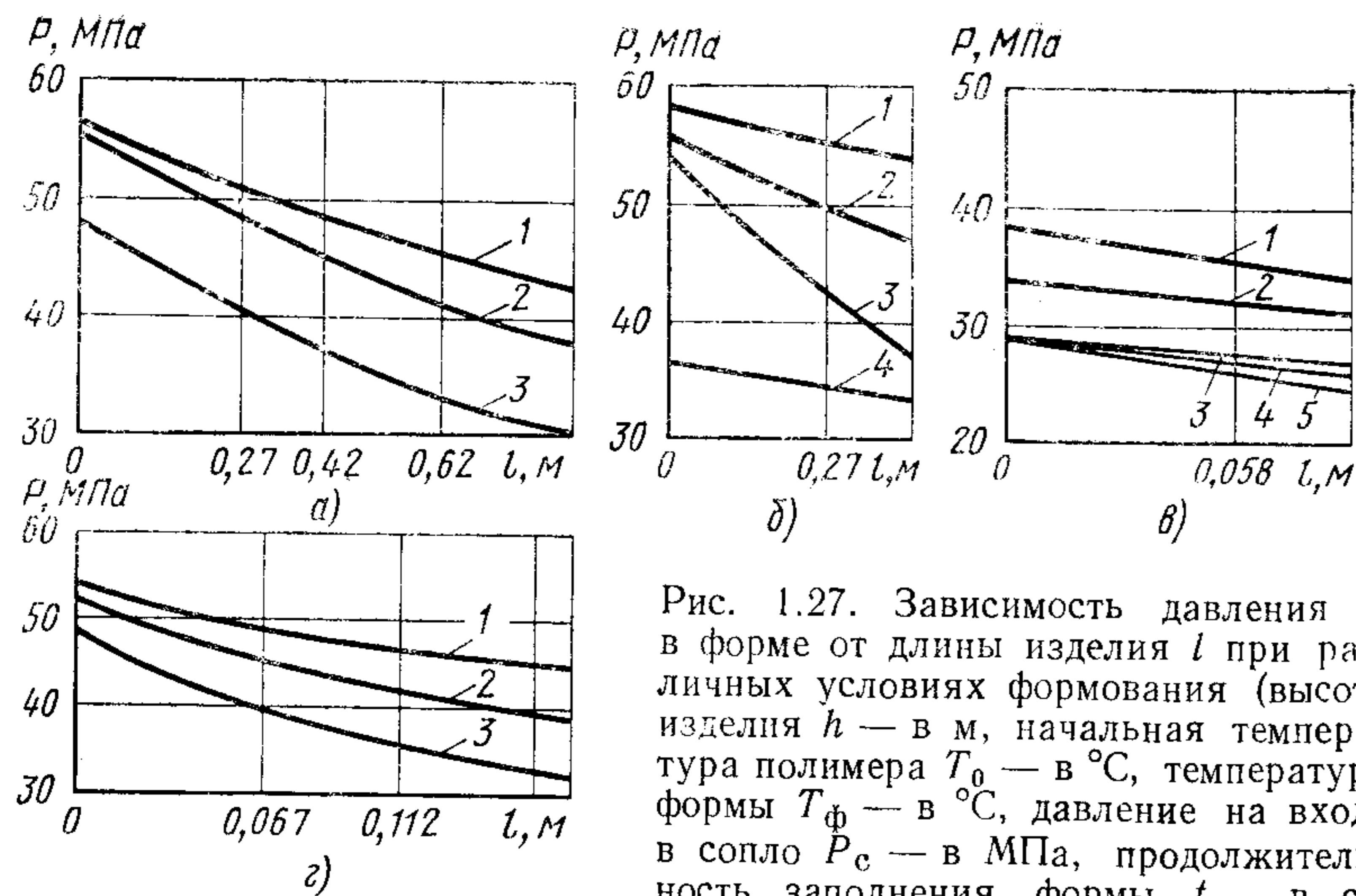


Рис. 1.27. Зависимость давления  $P$  в форме от длины изделия  $l$  при различных условиях формования (высота изделия  $h$  — в м, начальная температура полимера  $T_0$  — в  $^{\circ}\text{C}$ , температура формы  $T_{\phi}$  — в  $^{\circ}\text{C}$ , давление на входе в сопло  $P_c$  — в МПа, продолжительность заполнения формы  $t_3$  — в с):

$a$  — пластина длиной  $l = 0,84$  м при  $T_{\phi} = 30$ : 1 —  $h = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 220$ ,  $P_c = 66$ ,  $t_3 = 0,7$ ; 2 —  $h = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 220$ ,  $P_c = 66$ ,  $t_3 = 1,25$ ; 3 —  $h = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 200$ ,  $P_c = 66$ ,  $t_3 = 1,25$ ;  $b$  — пластина длиной  $l = 0,42$  м при  $T_{\phi} = 30$ : 1 —  $h = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 220$ ,  $P_c = 66$ ,  $t_3 = 0,4$ ; 2 —  $h = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 190$ ,  $P_c = 66$ ,  $t_3 = 0,4$ ; 3 —  $h = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 220$ ,  $P_c = 66$ ,  $t_3 = 0,35$ ; 4 —  $h = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 220$ ,  $P_c = 44$ ,  $t_3 = 0,4$ ;  $v$  — диск радиусом  $r = 0,0875$  м при  $t_3 = 0,95$ : 1 —  $h = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 220$ ,  $P_c = 46$ ,  $T_{\phi} = 30$ ; 2 —  $h = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 220$ ,  $P_c = 44$ ,  $T_{\phi} = 30$ ; 3, 4, 5 —  $h = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 220$ ,  $P_c = 24$ ,  $T_{\phi} = 20$  (3),  $T_{\phi} = 40$  (4),  $T_{\phi} = 80$  (5);  $z$  — стакан диаметром  $d = 0,1$  м при  $t_3 = 0,9$ : 1 —  $h = 2,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 230$ ,  $P_c = 66$ ,  $T_{\phi} = 80$ ; 2 —  $h = 2,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $T_0 = 230$ ,  $P_c = 66$ ,  $T_{\phi} = 30$ ; 3 —  $h = 2,5 \cdot 10^{-3}$ ;  $T_0 = 230$ ,  $P_c = 60$ ,  $T_{\phi} = 30$

лением определяет разнотолщинность и различие свойств по длине отливаемых изделий.

На максимальное давление в форме и его распределение по длине формы существенное влияние оказывают параметры литья: температура полимера и формы, продолжительность заполнения формы (объемная скорость течения), давление литья.

**Влияние температуры полимера.** Повышение температуры полимера приводит к увеличению давления в форме и по ее длине в момент развития максимальных усилий (ср. линии 1 и 2 на рис. 1.27, б). Это обусловлено уменьшением перепадов давлений в системе сопло — литниковая втулка и в форме. Перепады давлений уменьшаются вследствие снижения вязкости расплава полимера при повышении температуры. Повышение температуры полимера способствует улучшению передачи давления в форму и его более равномерному распределению по ее длине (ср. линии 1 и 2 на рис. 1.27, б).

**Влияние температуры формы.** Увеличение температуры формы улучшает передачу давления и повышает абсолютное давление по длине формы (ср. линии 3, 4, 5 на рис. 1.27, в и линии 1, 2 на рис. 1.27, г). Это обусловлено уменьшением перепада давлений в форме. Уменьшение перепада давлений, затрачиваемого на втекание полимера в форму при повышении ее температуры, свя-

зано с уменьшением влияния неизотермичности процесса на этот перепад. Чем выше температура формы, тем ниже скорость охлаждения и поэтому меньше толщина пристенного слоя и слабее понижается текучесть расплава в результате охлаждения.

Влияние температуры формы на передачу давления зависит от интенсивности охлаждения. Интенсивность охлаждения усиливается с уменьшением толщины формы. Поэтому повышение температуры формы оказывает более сильное влияние на передачу давления, если форма имеет меньшую толщину (ср. линии 1 и 2 на рис. 1.27, г с линиями 4 и 5 на рис. 1.27, в).

**Влияние скорости заполнения формы.** Увеличение скорости заполнения формы (уменьшение продолжительности заполнения) способствует увеличению давления, возникающего по длине формы в момент развития максимальных усилий (ср. линии 1 и 2 на рис. 1.27, а). При этом перепад давлений по длине формы меньше и давление распределено более равномерно. Это связано с тем, что с увеличением скорости заполнения формы уменьшается продолжительность охлаждения полимера, вследствие чего образующийся пристенный слой имеет меньшую толщину и вязкость расплава увеличивается за счет охлаждения в меньшей степени. Это приводит к уменьшению влияния неизотермичности процесса на перепады давлений, затрачиваемые на течение полимера в форме, в момент развития в системе максимальных усилий.

**Влияние давления литья.** Увеличение давления литья способствует повышению давления, возникающего на входе в сопло и по длине формы в момент развития в системе максимальных усилий (ср. линии 1, 4 на рис. 1.27, б и линии 1, 2 на рис. 1.27, в).

**Влияние конструкции машины на процессы формования.** Литьевые машины могут быть без предварительной и с предварительной пластикацией, с гидравлическим, механическим и гидромеханическим приводами (см. гл. 3). Конструкция машины оказывает существенное влияние на процессы формования в течение цикла литья. Изменение давления  $P$  в гидросистеме впрыска (кривые 2), которое определяет давление на входе в сопло и в форме, в зависимости от перемещения  $H$  инжекционного поршня (кривые 1) на машинах разной конструкции иллюстрируют диаграммы, представленные на рис. 1.28. На машине без предварительной пластикации полимера цикл начинается с подгребания гранул: инжекционный поршень перемещается на расстояние  $a$  (рис. 1.28, а). На это затрачивается незначительное давление (на диаграмме не показано).

По мере продвижения поршня вперед гранулы уплотняются и начинается впрыск полимера в форму — протекает период заполнения формы (участки  $b$  и  $c$  на кривой 1). В этот период давление на поршне возрастает (участок  $f$  на кривой 2). В определенный момент периода заполнения отключается вспомогательный насос в гидросистеме. Увеличение давления на поршне до отключения вспомогательного насоса характеризует участок  $e$ . После заполнения формы скорость перемещения поршня падает (участок  $d$ ), а давление в гидроприводе возрастает — протекает период нарастания давления (участок  $h_1$  —  $f$

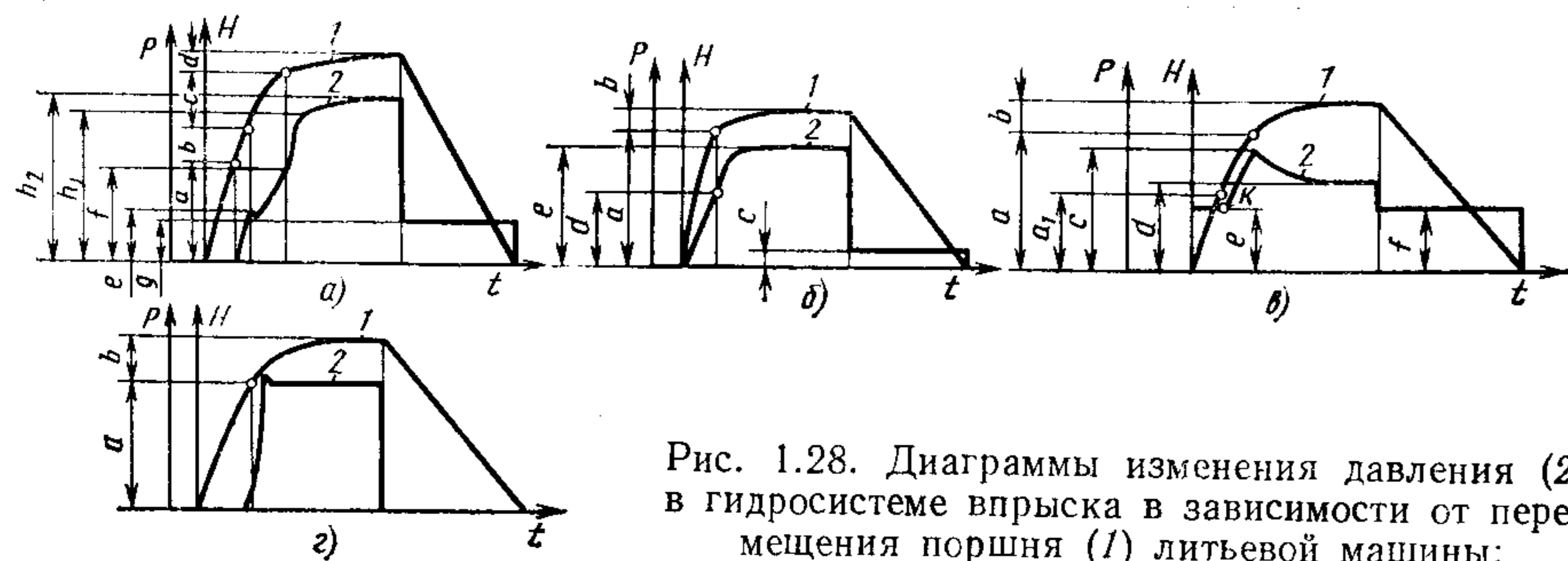


Рис. 1.28. Диаграммы изменения давления (2) в гидросистеме впрыска в зависимости от перемещения поршня (1) литьевой машины:

*a* — без предварительной пластикации; *б* — с предварительной пластикацией; *в* — с механическим приводом инжекционного поршня и гидравлическим неуправляемым компенсатором; *г* — с механическим приводом инжекционного поршня и с управляемым компенсатором

характеризует первую стадию этого периода, участок  $h_2-h_1$  — вторую стадию). Давление в гидроприводе увеличивается, поскольку при замедлении скорости движения поршня насос в гидросистеме может обеспечивать нарастание давления. Характер и значение повышения давления в гидроприводе зависят от производительности насоса, конструкции и объема полости формы, а также от свойств полимера.

По окончании выдержки полимера в форме под давлением поршень отходит назад в исходное положение. На участке *g* при отходе поршня давление в гидроприводе, вызванное сопротивлением движению поршня, практически не меняется. Происходит изменение давления в форме (см. п. 1.2.4).

В машине с предварительной пластикацией полимера (рис. 1.28, б) при заполнении формы (участок *a*) поршень (или шнек в зависимости от конструкции инжекционного узла) перемещается с большей скоростью, чем в машине без предварительной пластикации, вследствие того, что в машинах последней конструкции перепады давлений в инжекционном цилиндре, затрачиваемые на перемещение поршня, больше, чем таковые в машинах с предварительной пластикацией. Низкие потери давления в инжекционном цилиндре приводят также к тому, что необходимое усилие впрыска (участок *d*) на машинах с предварительной пластикацией при прочих равных условиях меньше по сравнению с таковым на машинах без предварительной пластикации.

После заполнения формы давление в гидроприводе сначала быстро увеличивается — протекает первая стадия периода нарастания давления (участок *e-d*), а затем становится постоянным — протекает вторая стадия периода. Поскольку потери давления в инжекционном цилиндре малы, давление на входе в сопло и на входе в форму на второй стадии сохраняется практически постоянным. Это обеспечивает возможность легкой и точной регулировки давления на входе в форму, применяя режим формования со сбросом давления (см. п. 4.2, 4.4). В течение периода выдержки полимера в форме под давлением поршень перемещается вперед на некоторую величину (участок *b*), обеспечивая переток полимера в форму для подпитки и ком-

пенсирова утечки полимера в цилиндре. После выдержки полимера в форме под давлением давление по команде от соответствующих механизмов уменьшается до определенного регулируемого значения (участок *c*).

Диаграмма изменения давления в гидрокомпенсаторе на литьевых машинах с механическим приводом (см. п. 3.1) показана на рис. 1.28, в. В таких конструкциях механический привод обеспечивает быстрое перемещение поршня для впрыска полимера в форму, а гидрокомпенсатор — выдержку полимера в форме под давлением. Предварительно в компенсаторе создается определенное давление. В начале цикла инжекционный поршень вместе с гидроцилиндром компенсатора перемещается под действием механического привода (при этом гидропоршень не движется относительно цилиндра) и поршень впрыскивает полимер в литьевую форму.

Давление остается неизменным (участок *e*) до тех пор, пока потери давления, затрачиваемые на течение полимера в системе сопло — форма и на перемещение поршня в инжекционном цилиндре, не превысят установленное в компенсаторе давление. После того, как потери давления достигнут установленного в компенсаторе давления (точка *K*), дальнейшее перемещение поршня (участок *a-a\_1*) под действием механического привода сопровождается возрастанием давления в пневмогидравлическом устройстве — компенсаторе (участок *c-e*). Это происходит вследствие того, что гидропоршень начинает двигаться в гидроцилиндре к его задней стенке (уменьшается рабочий объем гидроцилиндра) и некоторая часть масла выдавливается из гидроцилиндра в баллон со сжатым газом, в результате повышается давление в баллоне и гидроцилиндре.

Момент (точка *K*) и характер увеличения давления определяются конструкцией формы, предварительно созданным давлением, параметрами переработки и свойствами полимера. Повышение давления сопровождается некоторым замедлением перемещения поршня (участок *a-a\_1*) вследствие того, что гидропоршень начинает перемещаться в гидроцилиндре. В момент прекращения движения плиты с гидроцилиндром давление в компенсаторе достигает максимального значения (участок *c*).

После остановки механического привода поршень продолжает двигаться вперед (участок *b*) под действием давления, создаваемого гидрокомпенсатором, добавляя полимер в форму для подпитки. Давление в компенсаторе уменьшается (участок *c-d*) в связи с уменьшением давления в форме. По окончании выдержки полимера в форме под давлением механический привод отводит поршень назад; при этом давление в компенсаторе не изменяется (участок *f*). Если порция полимера недостаточна или давление установили завышенным, то при перемещении поршня вперед давление не достигает установленного значения. Это определяет недостаток механического привода с гидропневматическим или механическим устройством, заключающийся в малой его гибкости и трудности регулирования давления.

Этот недостаток устраняется в конструкциях с управляемым компенсатором, в которых давление регулируется (рис. 1.28, г). Меха-

нический привод перемещает поршень вперед, в результате чего полимер из инъекционного цилиндра впрыскивается в форму — происходит ее заполнение (участок *a*). Полимер выдерживается в форме под давлением (участок *b*), создаваемым компенсатором. Причем необходимое давление в компенсаторе достигается после заполнения формы и поддерживается постоянным насосом в течение периода выдержки под давлением.

#### 1.2.4. Период спада давления

**Процессы формования.** Период спада давления характеризуется уменьшением давления в форме. В формах сравнительно большой длины этот период начинается в процессе выдержки полимера под давлением с того момента (точки  $d_1$  —  $d_4$  на рис. 1.4, 1.5), когда уменьшение объема полимера в форме в результате его охлаждения начинает превышать возможный приток новых порций расплава из нагревательного цилиндра. Понижение среднеобъемной температуры полимера в условиях, когда усадка полностью не компенсируется, вызывает уменьшение давления в форме.

Скорость уменьшения давления (рассматривается участок *de* на рис. 1.5 до момента изоляции формы от инъекционного цилиндра) в различных точках формы по ее длине неодинакова: она тем больше, чем дальше от впускного отверстия расположена точка. Это обусловлено тем, что в более удаленные точки затруднен приток новых порций расплава, необходимый для компенсации уменьшения объема полимера в результате его охлаждения. Поэтому усадка полимера, вызванная охлаждением, не компенсируется, и давление уменьшается с большей скоростью. На машинах с предварительной пластикацией давление на входе в форму и в непосредственной близости от литника (участок  $d_1e_1$  на кривой 1, рис. 1.5) практически сохраняется постоянным.

В формах со сравнительно небольшим объемом полости период спада давления начинается практически после окончания выдержки полимера под давлением, когда форма изолируется от инъекционного цилиндра в результате затвердевания литника или при отводе сопла от литника (рис. 1.29). Если продолжительность выдержки полимера под давлением  $t_3$  достаточна для затвердевания литника (точка  $K_1$ ), то после его затвердевания дальнейшее охлаждение изделия происходит без изменения его массы и плотности (кривая 1), поскольку форма закупорена, что предотвращает втекание в нее полимера или истечение его из нее. Понижение температуры полимера без притока новых порций вызывает понижение давления в форме. Скорость уменьшения давления от значения  $P_1$  определяется скоростью охлаждения полимера (т. е. скоростью снижения его среднеобъемной температуры). К моменту окончания охлаждения изделия (извлечения его из формы) в форме сохраняется сравнительно большое остаточное давление  $P_4$ . Если продолжительность выдержки под давлением сократить до периода  $t_2$ , который меньше продолжительности затверде-

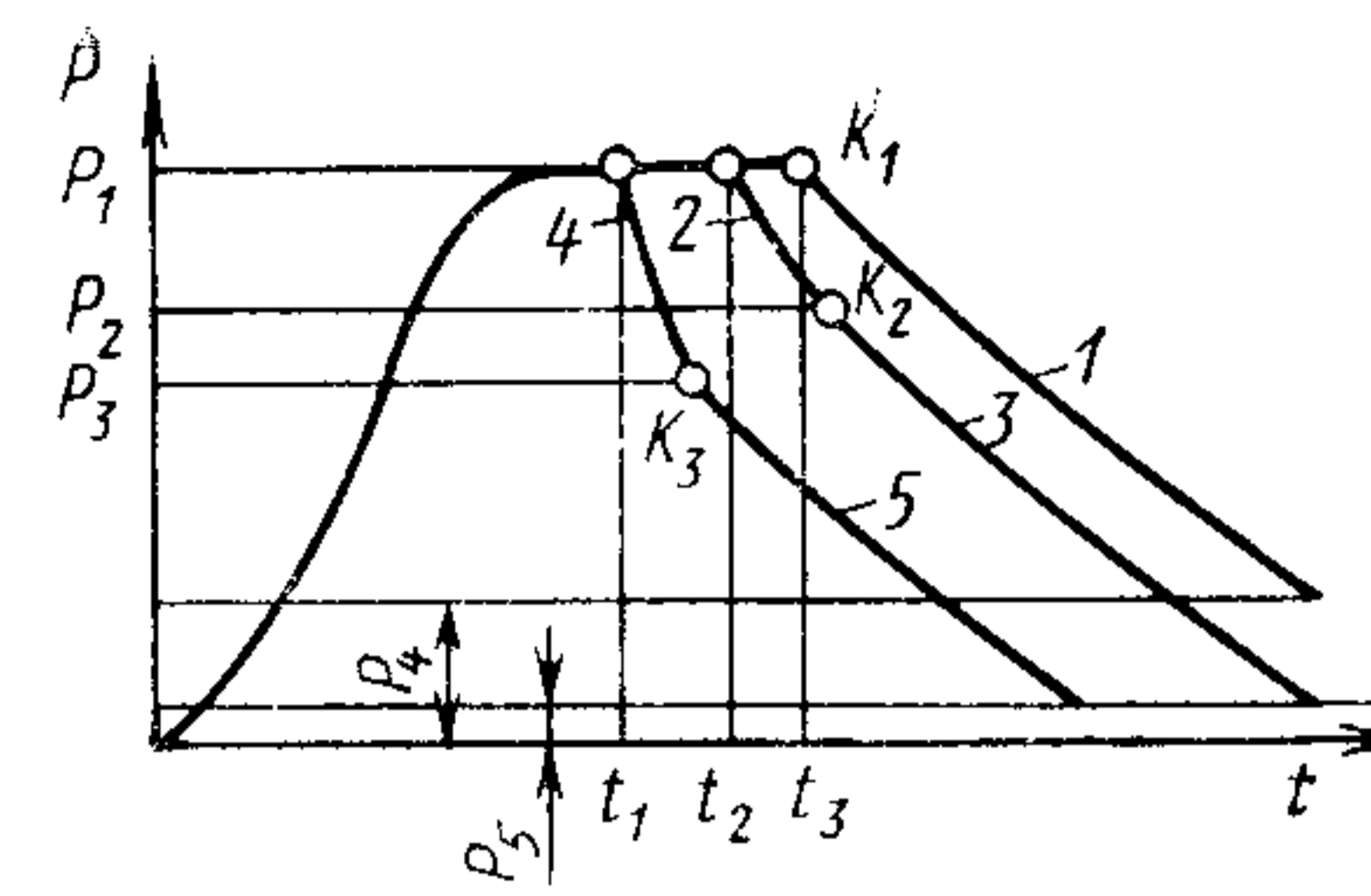


Рис. 1.29. Диаграмма давление  $P$ —время  $t$  при разной продолжительности выдержки полимера в форме под давлением

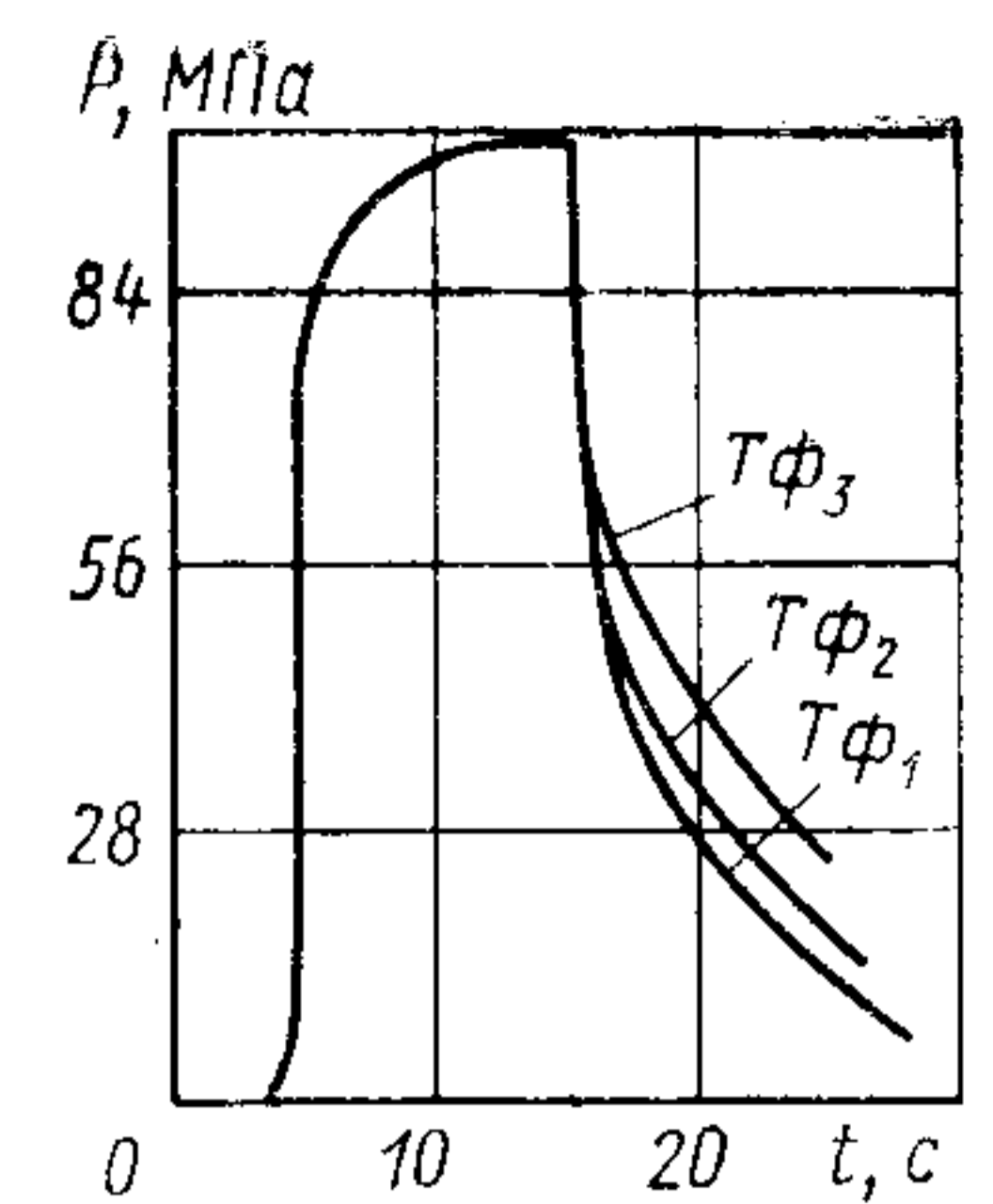


Рис. 1.30. Диаграмма давление  $P$ —время  $t$  при разной температуре формы ( $T_{\phi_1} > T_{\phi_2} > T_{\phi_3}$ )

вания литника, то при отводе сопла полимер вытекает из формы, что приводит к резкому падению давления (кривая 2).

Давление резко уменьшается до такого значения  $P_2$ , при котором прекращается истечение полимера из формы (точка  $K_2$ ). Значение  $P_2$  зависит от среднеобъемной температуры полимера, достигнутой к моменту отвода сопла от литника. Дальнейшее охлаждение происходит без изменения массы изделия и давление уменьшается только за счет понижения температуры (кривая 3). Причем в форме сохраняется меньшее остаточное давление  $P_5$ . Если продолжительность выдержки еще сократить до  $t_1$ , то резкое уменьшение давления (кривая 4) за счет вытекания полимера из формы продолжается до тех пор, пока давление не достигнет значения  $P_3$ , при котором прекращается истечение полимера. Давление  $P_3$  ниже, чем  $P_2$ , поскольку в последнем случае к моменту окончания выдержки под давлением среднеобъемная температура полимера выше. Последующее понижение давления за счет снижения среднеобъемной температуры без изменения массы изделия идет по кривой 5. В последнем случае может произойти коробление изделия.

Таким образом, чем больше время выдержки под давлением (время подпитки) и выше давление на входе в форму, тем больше плотность и масса отливаемых изделий. Увеличение времени выдержки под давлением приводит также к увеличению времени, необходимого для спада давления, способствует сохранению остаточного давления в форме к моменту извлечения из нее изделия (см. рис. 1.29).

Продолжительность спада давления и остаточное давление зависят от температуры формы. Если время выдержки под давлением меньше, чем продолжительность застывания литника, то при повышении температуры формы скорость спада давления увеличивается, а остаточное давление уменьшается (рис. 1.30). Это обусловлено тем, что при увеличении температуры формы интенсивность теплообмена уменьшается и к моменту изоляции формы от инъекционного цилиндра среднеобъемная температура полимера выше. Это приводит

к тому, что за счет вытекания полимера из формы давление резко падает до более низкого значения. Чем выше температура формы, тем больше требуется времени для затвердевания литника, поэтому при повышении температуры формы время выдержки под давлением следует увеличивать, чтобы исключить вытекание полимера из формы при отводе сопла и тем самым предотвратить коробление отливаемых изделий.

Диаметр литника определяет продолжительность его охлаждения, поэтому уменьшение диаметра литника эквивалентно снижению времени выдержки под давлением, что приводит к уменьшению количества полимера подаваемого в форму для подпитки. При использовании точечного литника, который быстро застывает, изделие охлаждается практически без подпитки, поэтому такие литники целесообразно применять для изготовления тонкостенных изделий. Применение точечного литника для получения изделий с толщиной стенки 3—5 мм может привести к их короблению вследствие недостаточной подпитки. Во избежание этого, необходимо значительно повышать давление, чтобы во время выдержки под давлением повысить плотность полимера и обеспечить втекание полимера в форму в большем объеме.

Продолжительность охлаждения полимера (понижение среднеобъемной температуры) в процессе формования можно разделить на два периода, отличающиеся скоростью охлаждения. Первый период до снятия внешнего давления, когда в форму поступают новые порции расплава, второй период после снятия внешнего давления, когда форма изолируется от инъекционного цилиндра. В первый период среднеобъемная температура понижается медленно из-за притока новых порций горячего расплава, а во второй период скорость охлаждения увеличивается. Чем больше продолжительность выдержки под давлением, тем меньше разность между скоростями охлаждения в первый и второй периоды.

**Влияние параметров литья и оснастки на скорость и продолжительность охлаждения изделия.** Формуемые полимеры поступают в литьевую форму при температуре 140—350 °С и охлаждаются в ней до температуры, при которой изделие можно извлекать из формы без его коробления (—20—150 °С). Скорость охлаждения полимера (понижение среднеобъемной температуры) определяет скорость уменьшения давления и скорость релаксационных процессов, в том числе скорость релаксации ориентационных напряжений, возникающих при течении полимера, и, значит, остаточные напряжения. Скорость охлаждения полимера также влияет на образование новых напряжений и, следовательно, на свойства отливаемых изделий. Кроме того, скорость охлаждения определяет продолжительность охлаждения изделия и поэтому влияет на производительность литьевой машины. В свою очередь, скорость и продолжительность охлаждения полимера зависят от параметров литья и оснастки, а также от теплофизических свойств полимера.

Повышение температуры полимера, с которой он поступает из нагревательного цилиндра в форму, увеличивает интенсивность теп-

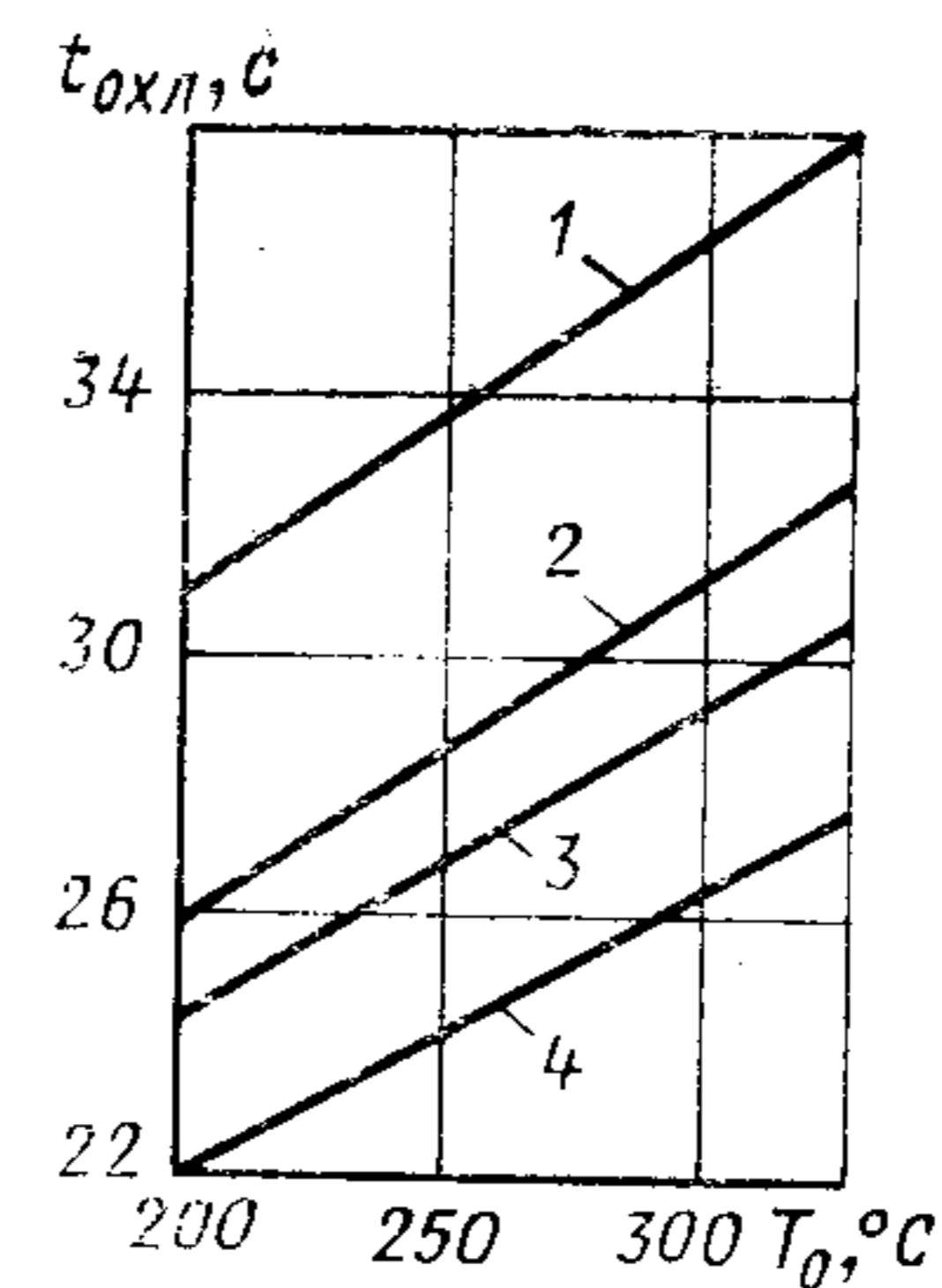
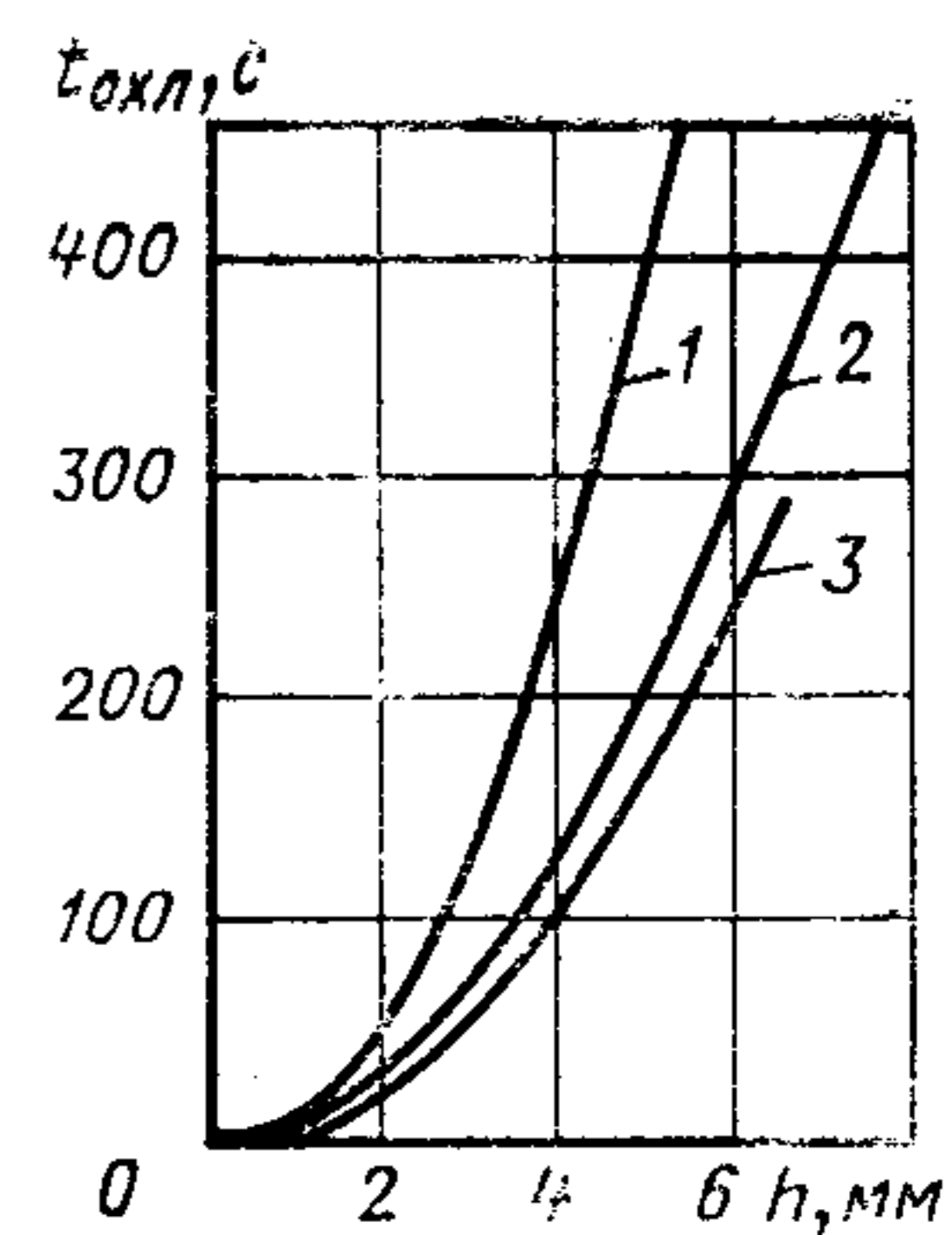


Рис. 1.31. Зависимость продолжительности охлаждения изделия  $t_{\text{охл}}$  толщиной 3 мм из полистирола от начальной температуры полимера  $T_0$  при различных значениях температуры формы  $T_{\text{ф}}$  (температура, до которой охлаждается изделие  $T_{\text{н}} = 60^\circ\text{C}$ ):

1 —  $T_{\text{ф}} = 40^\circ\text{C}$ ; 2 —  $T_{\text{ф}} = 30^\circ\text{C}$ ; 3 —  $T_{\text{ф}} = 25^\circ\text{C}$ ; 4 —  $T_{\text{ф}} = 15^\circ\text{C}$

Рис. 1.32. Зависимость продолжительности охлаждения изделия  $t_{\text{охл}}$  от его толщины:

1 — для полистирола; 2 — для полиэтилена; 3 — для полиамида



лообмена (скорость охлаждения) в результате увеличения разности температур между поверхностями теплообмена, но при этом увеличивается интервал между начальной температурой, с которой начинается охлаждение, и конечной, при достижении которой заканчивается процесс охлаждения и изделие можно извлекать из формы. В конечном итоге продолжительность охлаждения изделия увеличивается с повышением температуры полимера (рис. 1.31).

Понижение температуры формы увеличивает скорость охлаждения в результате увеличения разности температур между поверхностями теплообмена, но интервал между начальной температурой полимера и температурой, до которой охлаждается изделие, остается неизменным. Поэтому понижение температуры формы уменьшает продолжительность охлаждения (см. рис. 1.31).

Скорость охлаждения изделия существенно зависит от его толщины: с уменьшением толщины изделия интенсивность теплообмена возрастает. Поэтому продолжительность охлаждения тонкостенных изделий меньше времени охлаждения толстостенных изделий (рис. 1.32).

Процесс охлаждения определяется теплофизическими свойствами полимера: в частности, скорость охлаждения определяется коэффициентом температуропроводности. Чем выше этот коэффициент, тем больше скорость охлаждения. Кривые охлаждения изделий различной толщины, отливаемых из разных полимеров, приведены на рис. 1.32.

**Охлаждение литьевой формы.** Для получения высококачественных изделий требуется точно поддерживать заданную температуру оформляющей полости формы. При работе литьевой машины температуру формы, которая для термопластов ниже начальной температуры полимера, а для реактопластов выше, поддерживают с помощью охлаждающей воды или теплоносителя термостатической установки. При правильно выполненной системе охлаждения температура перерабатываемого полимера оказывает незначительное влияние на температуру формы. Данные об изменении температуры литьевой формы

В процессе формования изделий толщиной 5 мм приведены ниже:

Температура поступающего полимера, °С	265	275	280	285	295	300
Температура формы, °С:						
до формования	12	10	11	10	12	14
максимальная в процессе формования	12	10	14	14	15	16

Слабое влияние теплового потока от горячего полимера к форме на ее температуру объясняется, во-первых, сравнительно высокой теплопроводностью стальных форм и, во-вторых, тем, что масса формы значительно больше массы изделия (отношение этих масс может превышать 1000).

Качество изделий улучшается при однородном распределении температуры по оформляющей полости формы. Это достигается при правильном расположении каналов охлаждения. При этом длина этих каналов должна быть минимальной, чтобы обеспечить наименьшую разность температур теплоносителя на входе и выходе формы.

Диаметр охлаждающих каналов влияет на прочность и жесткость формы, а также на режим течения теплоносителя. Расстояние между каналом и поверхностью формы влияет на распределение по ней температуры. Диаметр  $d$  охлаждающих каналов, расстояние  $a$  между осями соседних каналов и расстояние между осью канала и поверхностью формы  $b$  связаны между собой приближенными соотношениями:  $a = (2 \div 5) d$ ;  $b = (0,6 \div 1,5) a$ .

Для охлаждения литевых форм применяют различные системы. Теплоноситель можно подавать по последовательно соединенным прямым каналам формы (рис. 1.33, а). Эти каналы соединены между собой трубками. Такая система охлаждения проста, но не всегда обеспечивает постоянство заданной температуры оформляющей полости и равномерное распределение температуры по всей поверхности формы. Для обеспечения равномерного охлаждения изделия применяют независимые прямые охлаждающие каналы, обеспечивающие позонное охлаждение формы (рис. 1.33, б), или системы охлаждения формы с помощью изогнутых каналов (рис. 1.33, в, г). Если охлаждающие каналы расположены по концентрическим окружностям (см. рис. 1.33, в), то каналы в отдельных концентрических окружностях связаны между собой радиальными протоками. В таких конструкциях охлаждающая вода сначала поступает в зону формы, непосредственно примыкающую к литнику, а затем к удаленным участкам формы. Поэтому центральная часть формы охлаждается более интенсивно, что необходимо при формовании изделий с большой поверхностью.

В концентрических конструкциях охлаждающая вода может проходить по медной трубке, которую помещают в каналах, выполненных в форме (см. рис. 1.33, в, вариант I). Каналы заливают оловом. Концентрические каналы могут быть выполнены в одной половине формы, которую приваривают к плите (см. рис. 1.33, в, вариант II).

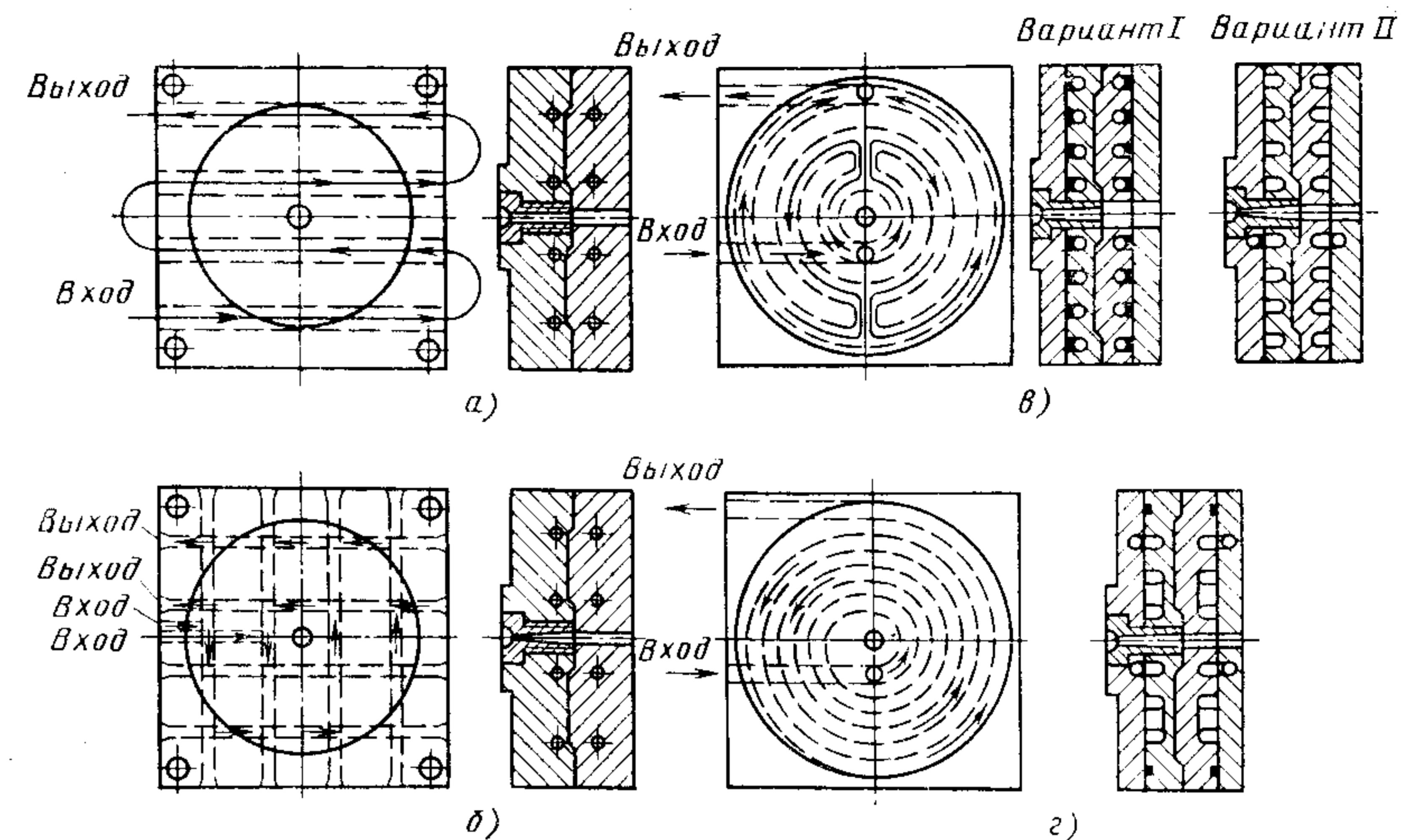


Рис. 1.33. Охлаждающие системы в литевых формах:

а — прямые каналы при последовательной системе охлаждения; б — прямые каналы при раздельном охлаждении участков формы; в — концентрические каналы при последовательной системе охлаждения; г — концентрические каналы при распределительной системе охлаждения.

При изготовлении длинных тонкостенных изделий отдельные участки формы дополнительно обогревают. В системе охлаждения не должно быть мест с застоявшимися пузырьками воздуха, так как при этом снижается коэффициент теплопередачи охлаждающей воды. Для поддержания заданной температуры формы стабильной кроме правильного расположения охлаждающих каналов необходимо также применять автоматическое регулирование и подачу охлаждающей жидкости. Для этого используют термостатирующие установки.

### 1.2.5. Математическое описание процессов формования

Математическое описание позволяет рассчитывать параметры формования. Это дает возможность определять параметры литевых машин расчетом и создавать автоматическое управление технологическим процессом литья с целью стабилизации качества получаемых изделий. Применение математического описания для расчета параметров литевых машин и автоматизации управления процессом литья выдвигает к нему определенные требования. Математическое описание должно учитывать рассмотренные особенности процессов формования (см. п. 1.2.1—1.2.4) и адекватно их моделировать. Оно должно быть сравнительно простым, и соотношения для расчета параметров формования должны быть в явном виде, чтобы расчетные операции могли выполнять вычислительные машины со сравнительно небольшим объемом памяти. Математическое описание должно обеспечивать возможность последовательного расчета параметров формования во всех элементах системы сопло — форма в текущие моменты формования. Причем в те периоды (заполнения формы и нарастания

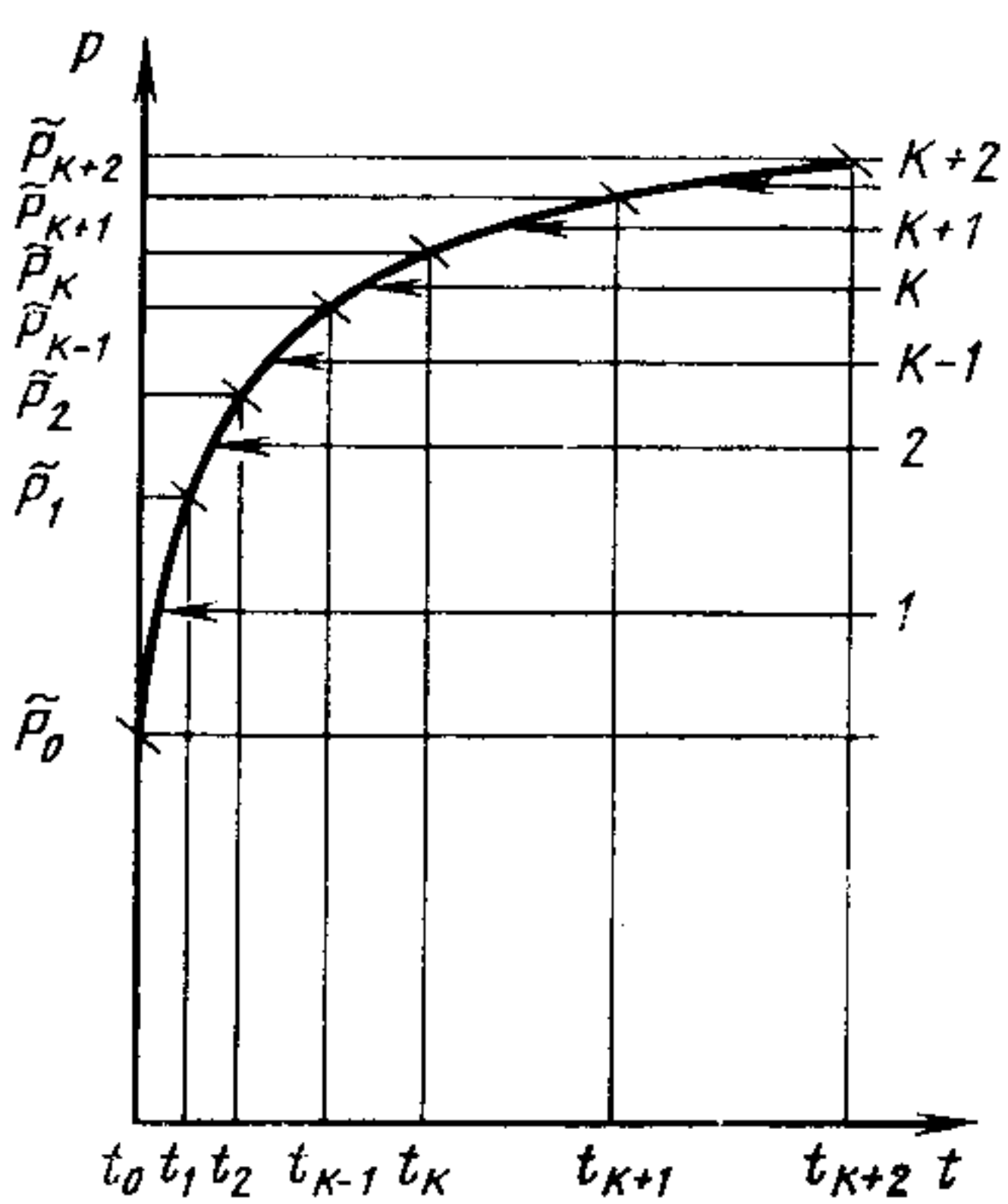


Рис. 1.34. Схема расчетных ступеней 1, 2,  $\kappa-1$ ,  $\kappa$ ,  $\kappa+1$ ,  $\kappa+2$  в период нарастания давления;  $t_0 \div t_{\kappa+2}$  — текущие моменты времени периода нарастания давления,  $\bar{p}_0 \div \bar{p}_{\kappa+2}$  — среднее давление в форме в эти моменты

давления), в которых процессы определяются одним и тем же механизмом (течением полимера в системе сопло — форма), параметры формования должны рассчитываться по единой расчетной схеме.

**Период заполнения формы и нарастания давления** [6, 13]. Для получения кривых изменения параметров формования (давления, перепадов

давлений, объемной скорости течения, скорости сдвига, температуры и др.) в течение всего периода заполнения формы задают текущие моменты времени периода и для них рассчитывают параметры формования. Для получения таких кривых в период нарастания давления применяют дискретно-последовательную систему расчета. Задают текущие (последовательно сменяющие друг друга) и сравнительно короткие по продолжительности интервалы времени, которые называют расчетными ступенями:  $t_0 - t_1$ ,  $t_1 - t_2$ , ...,  $t_{k-1} - t_k$  и т. д. (рис. 1.34). Начальный момент первой ступени соответствует моменту окончания заполнения формы. На каждой расчетной ступени определяют среднее значение объемной скорости течения  $Q$  и это значение присваивают среднему моменту ступени  $\bar{t}$ . По величине  $Q$  определяют скорость сдвига и напряжение сдвига. Параметры формования рассчитывают в фиксированные (средние) моменты каждой последовательной ступени.

**Уравнения и допущения. Условия гидравлического приближения.** Для выполнения требования простоты математического описания и получения простых соотношений для расчета параметров формования в явном виде применяют условия гидравлического приближения.

В результате неизотермичности процесса формования на стенках проходного канала формы образуется неподвижный пристенный слой полимера, толщина которого  $\delta$  изменяется по длине формы (см. рис. 1.7). Это приводит к изменению высоты ( $h - 2\delta$  или  $2r - 2\delta$ ) поперечного сечения канала формы, в котором течет расплав, по длине формы. Неизотермичность процесса формования вызывает также неоднородность температуры в поперечном сечении текущего потока расплава (рис. 1.35). В этом сечении температура изменяется от температуры текучести  $T_\delta$  (температура слоя, по которому расплав течет в формирующем элементе) до начальной температуры  $T_0$ , с которой расплав поступает из нагревательного цилиндра, если фронт охлаждения не достиг центра сечения в рассматриваемый момент формования, или до температуры  $T_c$ , которой достигает расплав в центре сечения, если фронт охлаждения достиг этого центра. Пере-

пад давлений по длине формы вызывает неоднородность плотности полимера  $\rho$  по длине формы.

Смысл гидравлического приближения заключается в том, что неизотермическое течение заменяют эквивалентным по затрачиваемому перепаду давлений квазиизотермическим течением с «новыми» усредненными параметрами. Высоту ( $h - 2\delta$  или  $2r - 2\delta$ ) поперечного сечения канала формы или литниковой втулки, в котором течет расплав, заменяют усредненной высотой ( $h - 2\delta$  или  $2r - 2\delta$ ) по длине канала. Температуру  $T$  в текущем потоке расплава заменяют усредненной по его объему — среднеобъемной  $\bar{T}$ . Влияние изменения плотности расплава под действием давления и температуры на процесс течения не учитывают в период заполнения. Это возможно, поскольку в этот период объемная скорость течения сравнительно большая и изменение объемной скорости течения в результате изменения плотности очень мало по сравнению с самим значением объемной скорости вследствие невысокой сжимаемости и низких коэффициентов термического расширения расплава полимеров. В таких условиях перепад давлений рассчитывают по простому соотношению (1.1а), в котором  $T_0$  заменяют  $\bar{T}$ , а  $h$  заменяют  $h - 2\delta$ .

В период нарастания давления, когда течение полимера в форме вызвано изменением плотности полимера в форме и объемная скорость течения сравнительно небольшая, изменение плотности учитывают на каждой расчетной ступени при переходе от начального момента  $t_{k-1}$  к конечному моменту  $t_k$  ступени. По этому изменению плотности определяют среднее значение объемной скорости течения  $Q$  на каждой ступени, а по  $Q$  скорость сдвига  $\dot{\gamma}$ . Но в начальный, фиксированный и конечный моменты времени каждой расчетной ступени в условиях гидравлического приближения плотность полимера в форме заменяют усредненной  $\bar{\rho}$  по объему полимера.

**Исходные уравнения.** Для получения расчетных формул параметров формования в форме, в литниковой втулке и в сопле составляют

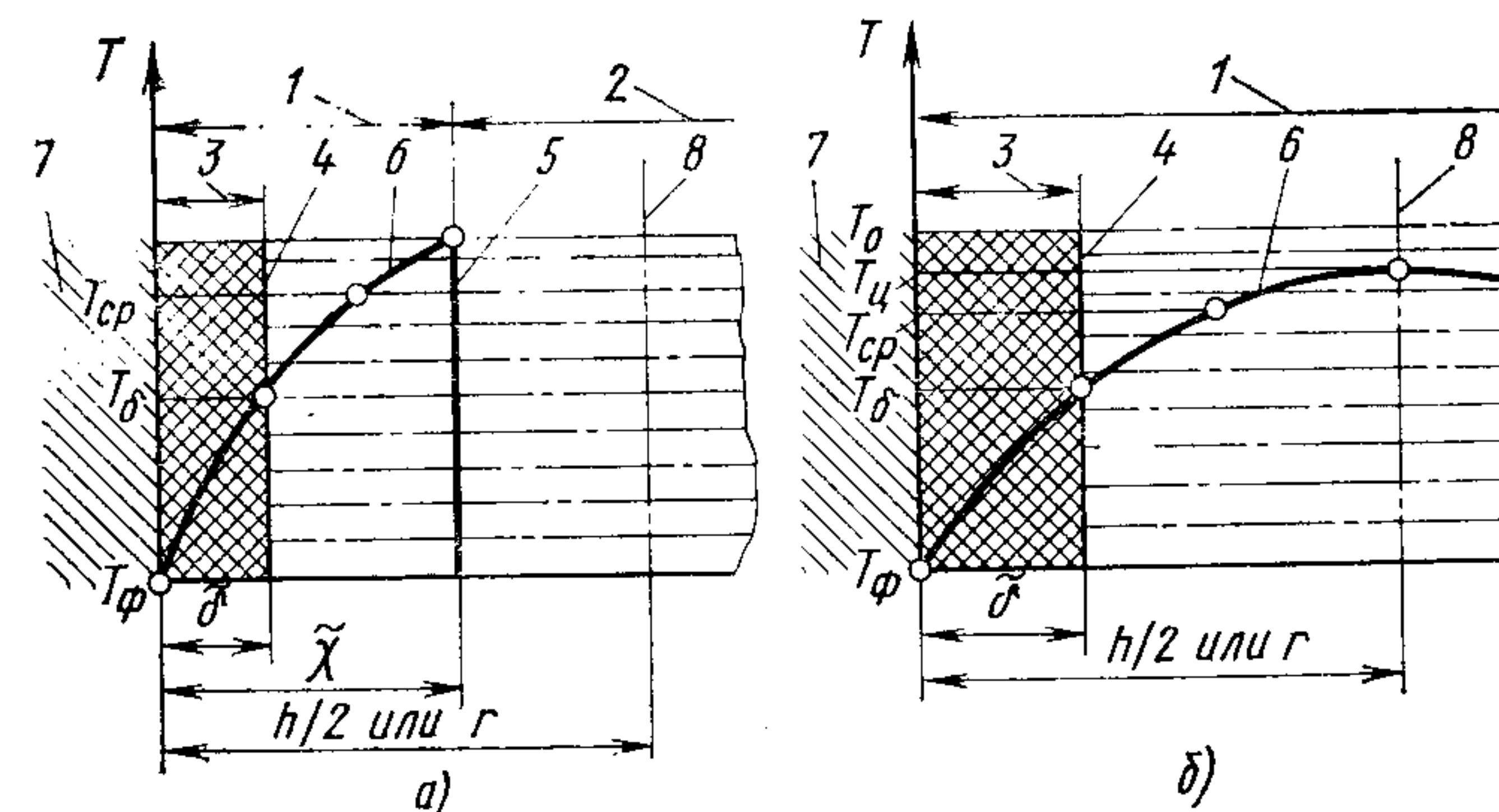


Рис. 1.35. Схема распределения температуры:

а — первая стадия охлаждения  $Fo \leq Fo^*$ ; б — вторая стадия охлаждения  $Fo > Fo^*$ ; 1 — охлажденный слой; 2 — неохлажденный слой; 3 — пристенный слой; 4 — фронт углубления изотермы  $T_\delta$ ; 5 — фронт охлаждения; 6 — кривая распределения температуры; 7 — литейная форма; 8 — центр формы

Таблица 1.2

Система уравнений и граничные условия расчетной модели перепадов давлений, затрачиваемых на течение расплава полимера в форме  $\Delta P_\phi$ , в литниковой втулке  $\Delta P_\lambda$  и в сопле  $\Delta P_c$  в период заполнения формы [уравнения (1)–(4)], нарастания давления [уравнения (1)–(5)]

Исходные уравнения	Уравнения в условиях гидравлического приближения с учетом принятых допущений
$D\rho/Dt = -\rho(\bar{V}\bar{V})$ (1)	$dV_x/dx = 0$ (1a)
$\rho D\bar{V}/Dt = -\bar{V}P + [\bar{V}\tau] + \rho\bar{g}$ (2)	$dP/dx = d\tau_{xy}/dy$ $y = (h/2) - \delta, V_x = 0$ $y = 0, dV_x/dy = 0$ (2a)
$\rho C_p DT/Dt = (-\bar{V}q) + q_v + q_g$ (3)	$y = h/2, T_{(h/2, t)} = T_\phi$ $dT/dt = \tilde{a} d^2T/dy^2$ $y = 0, dT/dy = 0$ $t = 0, T_{(0)} = T_0$ (3a)
$\tau_{xy} = \eta dV_x/dy$ (4)	$\eta_{H(T, P, V, \bar{M})}/\dot{\eta}_{\dot{\gamma}(T, P, V, \bar{M})} = 1 + A_1 \times$ $\times [\dot{\gamma}\eta_{H(T, P, V, \bar{M})}]^\alpha + A_2 [\dot{\gamma}\eta_{H(T, P, V, \bar{M})}]^{2\alpha};$ $\tau = \eta_{\dot{\gamma}(T, P, V, \bar{M})} \dot{\gamma};$ (4a) $\tau = m_0 \exp[E/(RT)] \dot{\gamma}^n$ (4б)
$(P + \pi)/(\rho^{-1} - \omega) = R'T$ (5)	$(\tilde{P} + \pi)/(\tilde{\rho}^{-1} - \omega) = R'\tilde{T}$ (5a)

исходную расчетную модель (табл. 1.2). Эта модель включает уравнения, которые в совокупности описывают процесс течения расплава полимера в формующих элементах в условиях формования, когда течение расплава характеризуется неизотермичностью и сопровождается конвективно-кондуктивным теплообменом, фазовыми переходами, переходом полимера в твердое (нечекучее) состояние; при этом вязкость расплава зависит от скорости сдвига, температуры и давления формования.

В период заполнения формы в расчетную модель (см. табл. 1.2) входят уравнения неразрывности (1), движения (2), энергии (3) и реологическое (4). В соответствии с рассмотренными выше особенностями процессов в период заполнения формы объемная скорость течения входит в число задаваемых исходных параметров формования. В период нарастания давления объемная скорость течения определяется процессами, проходящими при формовании, а именно изменением плотности полимера в форме в результате повышения давления и снижения температуры. Поэтому для расчета объемной скорости течения в этот период дополнительно вводят уравнение состояния (5), которое описывает изменение плотности расплава полимеров при изменении температуры и давления.

В период заполнения формы систему уравнений неразрывности, движения, энергии и реологического (см. табл. 1.2) для определения расчетных соотношений параметров формования решают в задаваемые текущие моменты периода. В период нарастания давления эту систему уравнений решают в фиксированные моменты каждой из последовательно сменяющихся друг друга ступеней. В условиях гидравлического приближения в фиксированные моменты расчетных ступеней плотность полимера усредняется по длине формы. Поэтому в каждый из этих моментов принимается, что расплав течет с одинаковой объемной скоростью по длине системы сопло—форма.

*Допущения.* Точно решить систему уравнений (см. табл. 1.2) для получения расчетных соотношений параметров формования со строгим учетом всех явлений чрезвычайно сложно численными методами и невозможно аналитически. Поэтому для решения системы вводят допущения, которые оказывают незначительное влияние на процессы формования. Эти допущения несущественно снижают точность математического описания процессов формования, но значительно его упрощают.

Уравнения неразрывности, движения и реологическое можно упростить введением следующих допущений. Компоненты скорости по оси  $y$  ( $V_y$ ) и по оси  $z$  ( $V_z$ ) пренебрежимо малы по сравнению с компонентой скорости по главному направлению движения полимера  $x$  ( $V_x$ ); поэтому течение полимера принимают одномерным. Течение полимера можно считать осесимметричным. В связи с большой вязкостью расплава полимеров их течение можно принять квазистационарным и не учитывать влияние инерционных и массовых сил на процесс течения. На участках установившегося течения расплава полимера гидравлические потери давления определяются главным образом вязкостью полимера. Высокоэластические свойства учитывают только при расчете параметров течения (входных потерь давления) на начальном участке (участок неустановившегося течения) сопла.

*Уравнения с учетом допущений.* Рассмотрение допущения упрощают (см. табл. 1.2) уравнения неразрывности (1a), движения (2a) и реологическое (4a, б).

Реологическое уравнение описывает изменение вязкости расплава (напряжения сдвига) в условиях формования. Вязкость (напряжение сдвига) определяет гидродинамику процесса течения и, в свою очередь, зависит от скорости сдвига, температуры и давления формования, которые непрерывно изменяются в течение процесса. Кроме того, вязкость (напряжение сдвига) зависит от влажности полимера перед переработкой и его молекулярных характеристик. Для построения математического описания в качестве реологического уравнения можно применять уравнение обобщенной характеристики вязкостных свойств (4a) или уравнение в форме степенного закона (4б).

Уравнение обобщенной характеристики вязкостных свойств является аналитическим выражением этой характеристики. Обобщенная характеристика вязкостных свойств представляет собой зависи-

мость вязкости от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , инвариантную (независящую) относительно температуры  $T$ , давления  $P$ , влажности  $B$  и молекулярной массы полимера  $\bar{M}$  [9]. Эта зависимость получается при нормировании скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  и вязкости  $\eta_{\dot{\gamma}(T, P, B, \bar{M})}$  полимера с молекулярной массой  $\bar{M}$  при скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , температуре  $T$ , давлении  $P$  и влажности  $B$  по ньютоновской вязкости  $\eta_{H(T, P, B, \bar{M})}$ , которая учитывает влияние температуры  $T$ , давления  $P$ , влажности  $B$  и молекулярной массы полимера  $\bar{M}$ . В таких координатах зависимости вязкости  $\eta_{\dot{\gamma}(T, P, B, \bar{M})}$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , полученные для полимера с разной молекулярной массой  $\bar{M}$  при различных температурах  $T$ , давлении  $P$  и разном содержанием влаги  $B$ , совмещаются в одну кривую. Обобщенные характеристики получают для каждого полимера или для каждой марки полимера в отдельности, если полимер разных марок отличается по реологическому поведению в широком температурно-скоростном диапазоне в связи с неодинаковым молекулярно-массовым распределением, разной степенью разветвленности, различных добавок и т. д. Зависимости ньютоновской вязкости  $\eta_{H(T, P, B, \bar{M})}$  от  $T, P, B, \bar{M}$  приведены в работе [9].

Уравнение обобщенной характеристики вязкостных свойств позволяет рассчитывать вязкость полимера в условиях формования с учетом влияния всех его параметров (скорости сдвига, температуры, давления) в широких интервалах их изменения, а также с учетом влияния влажности полимера перед переработкой и его молекулярной массы. Поэтому математическое описание, которое в качестве реологического содержит уравнение обобщенной характеристики вязкостных свойств, учитывает влияние всех параметров формования, влажности полимера и его молекулярных характеристик на вязкость в процессе формования и, следовательно, на гидродинамику процесса. В связи с этим такое математическое описание адекватно моделирует процесс формования и с высокой точностью позволяет рассчитывать его параметры.

Важным преимуществом реологического уравнения обобщенной характеристики вязкостных свойств является то, что оно позволяет рассчитывать вязкость полимера в условиях формования по показателям, которые используют для нормирования вязкости марок или отдельных партий полимера, поступающих на переработку (показатель текучести расплава ПТР, молекулярная масса  $\bar{M}$ ), или по единичному значению ньютоновской вязкости  $\eta_{H(T^*)}$  при некоторой фиксированной температуре  $T^*$ . Поэтому показатели ПТР,  $\bar{M}$ ,  $\eta_{H(T^*)}$  можно задавать в качестве исходных данных для расчета процессов формования. Это особенно важно для расчета процессов формования при автоматическом управлении технологическим процессом литья в производственных условиях, поскольку в таком случае не нужно проводить дополнительную оценку в широком температурно-скоростном диапазоне вязкостных свойств поступающих на переработку партий полимера, а использовать значения ПТР, которые, как правило, определяют перед переработкой.

Реологическое уравнение в форме степенного закона [уравнение (46), табл. 1.2] — является аналитическим выражением параллельных прямых, аппроксимирующих кривые течения (в координатах  $\lg \dot{\gamma}$  —  $\lg \tau$ ), полученных при разных температурах [9]. Уравнение (46), константами которого являются  $m_0, E, n$ , позволяет рассчитывать напряжение сдвига в условиях формования только с учетом влияния скорости сдвига и температуры формования. Поэтому математическое описание, которое в качестве реологического содержит уравнение в форме степенного закона, учитывает влияние только скорости сдвига и температуры (но не учитывает влияние давления и влажности полимера) на напряжение сдвига в процессе формования и, следовательно, на гидродинамику процесса.

В процессе формования скорость сдвига  $\dot{\gamma}$  изменяется в широком диапазоне, а кривые течения можно точно описать уравнением в форме степенного закона с постоянными константами  $m_0, E, n$  в пределах одного десятичного порядка в области средних значений  $\dot{\gamma}$  или в пределах двух порядков в области высоких значений  $\dot{\gamma}$ . Поэтому применяется дискретный метод описания кривых течения уравнением в форме степенного закона в пределах одного-двух десятичных порядков. Для расчета процессов формования задают ряд значений констант  $m_0, E, n$  для различных интервалов скоростей сдвига. Константы реологического уравнения обобщенной характеристики вязкостных свойств и реологического уравнения в форме степенного закона для различных полимеров и их марок приведены в работе [9].

**Расчет параметров формования. Перепады давлений, затрачиваемые на течение полимера в формирующих элементах.** Напряжение сдвига, реализуемое при течении полимера в формирующем элементе в процессе формования  $\tau_{xy}$ , можно рассчитать по уравнениям (1а), (1б) [табл. 1.3]. Перепады давлений, затрачиваемые на вязкое течение полимера (исключая входные эффекты) в форме  $\Delta P_{\phi}$ , в литниковой втулке  $\Delta P_{л}$  и в сопле  $\Delta P_{т.с}$  можно определить по уравнениям (2а)—(2г) [табл. 1.3].

Соотношение между напряжением сдвига, реализуемым при течении полимера в формирующем элементе  $\tau_{xy}$ , и градиентом давлений по его длине  $\partial P/\partial x$  [уравнения (1а), (1б) табл. 1.3] в условиях гидравлического приближения получают в результате интегрирования уравнения движения (2а) [табл. 1.2] и определения постоянной интегрирования из условия симметрии: при  $h/2 = 0$  или  $r = 0$ ,  $\tau_{xy} = 0$ . Соотношение для расчета перепадов давлений, затрачиваемых на течение полимера в формирующих элементах  $\Delta P_{\phi}, \Delta P_{л}, \Delta P_{т.с}$ , получают в результате совместного решения в условиях гидравлического приближения уравнения (2а) [табл. 1.2] и реологического (4) [табл. 1.2].

Если в качестве реологического уравнения в математической модели применяют уравнение обобщенной характеристики вязкостных свойств (4а) [табл. 1.2], то перепады давлений  $\Delta P_{\phi}, \Delta P_{л}, \Delta P_{т.с}$  рассчитывают по соотношениям (2а), (2б) [табл. 1.3]. В этом случае в качестве исходных данных для расчета перепадов давлений можно задавать ПТР, молекулярную массу  $\bar{M}$  или единичное значение нью-



Формулы для расчета параметров формования в период заполнения формы и нарастания давления

Параметр	Период <sup>1</sup>	Форма канала <sup>2</sup>	Стадия охлаждения	Расчетные формулы	Примечание
Напряжение сдвига $\tau$	з, н	п	$Fo^* < Fo \leq \leq Fo^*$	$\tau_{xy} = (h - 2\tilde{\delta}) (dP/dx)/2$ (1a)	—
		ц	То же	$\tau_{xy} = (r - \tilde{\delta}) (dP/dx)/2$ (1б)	
Перепады давлений, затрачиваемые на течение расплава в форме $\Delta P_\phi$ , в литниковой втулке $\Delta P_\Delta$ и в сопле $\Delta P_{т.с}$	з, н	п	»	$\Delta P = 4(2n + 1) \eta_{\tilde{\gamma}}(\tilde{T}, \tilde{v}) QLK_\Delta / [nB(h - 2\tilde{\delta})^3]$ (2a)	Исходные данные: ПТР, $\bar{M}$ , $\eta_H(T^*)$
		ц	»	$\Delta P = 2(3n + 1) \eta_{\tilde{\gamma}}(\tilde{T}, \tilde{v}) QLK_\Delta / [n\pi(r - \tilde{\delta})^4]$ (2б)	
		п	»	$\Delta P = 2Lm_0 \exp[(E/RT)] \{ (2n + 1) n^{-1} Q / [B(h - 2\tilde{\delta})^{(2n+1)n^{-1}}] \}^n$ (2в)	Исходные данные: $m_0$ , $E$ , $n$
		ц	»	$\Delta P = 2Lm_0 \exp[(E/RT)] \{ (3n + 1) n^{-1} Q / [\pi(r - \tilde{\delta})^{(3n+1)n^{-1}}] \}^n$ (2г)	
Объемная скорость течения $Q$ на $k$ -й расчетной ступени в период нарастания давления	з	п, ц	$Fo^* < Fo \leq \leq Fo^*$	Задается	$\tilde{P}_{k-1}$ и $\tilde{P}_k$ — среднее давление в форме в начальный $t_{k-1}$ и конечный $t_k$ моменты расчетной ступени
	н	п, ц	То же	$Q = 2 [\bar{T}_{k-1}/(\tilde{P}_{k-1} + \pi) - \bar{T}_k/(\tilde{P}_k + \pi)] v_\phi \times \times \{ [\bar{T}_{k-1}/(\tilde{P}_{k-1} + \pi) + \bar{T}_k/(\tilde{P}_k + \pi) + 2\omega/R'] (t_k - t_{k-1}) \}^{-1}$ (3)	

Продолжение табл. 1.3

Параметр	Период <sup>1</sup>	Форма канала <sup>2</sup>	Стадия охлаждения	Расчетные формулы	Примечание
Скорость сдвига $\dot{\gamma}$	з, н	п	$Fo^* < Fo \leq \leq Fo^*$	$\tilde{\gamma} = (2n + 1) 2Q / [nB(h - 2\tilde{\delta})^2]$ (4a)	—
		ц	То же	$\tilde{\gamma} = (3n + 1) Q / [n\pi(r - \tilde{\delta})^3]$ (4б)	
Толщина пристенного слоя $\delta$	з, н	п	$Fo \leq Fo^*$	$\delta = 3,36 \sqrt{\tilde{a}t} (1 - \sqrt{1 - \bar{\theta}})$ (5a)	При расчете $\tilde{\delta}$ $t = t_3$
			$Fo > Fo^*$	$\delta = 0,5h \{ 1 - \sqrt{1 - \bar{\theta} \exp[3(Fo - Fo^*)]} \}$ (5б)	
		ц	$Fo \leq Fo^*$	$\delta = 4,25 \sqrt{\tilde{a}t} (1 - \sqrt{1 - \bar{\theta}})$ (5в)	
			$Fo > Fo^*$	$\delta = r \{ 1 - \sqrt{1 - [2\bar{\theta} \exp(6Fo)/3]} \}$ (5г)	
Среднеобъемная температура потока расплава в форме $\tilde{T}$	з, н	п	$Fo \leq Fo^*$	$\tilde{T} = [T_{ср}(\tilde{\chi} - \tilde{\delta}) + T_0(0,5h_\phi - \tilde{\chi})] / (0,5h_\phi - \tilde{\delta})$ (6a) $\tilde{\chi} = 3,36 \sqrt{\tilde{a}t_3}$ (6б); $T_{ср} = T_0 - [(T_0 - T_\delta)/3]$ (6в)	—
		ц	То же	$\tilde{T} = [T_{ср}(\tilde{\chi} - \tilde{\delta}) + T_0(r_\phi - \tilde{\chi})] / (r_\phi - \tilde{\delta})$ (6г); $\tilde{\chi} = 4,25 \sqrt{\tilde{a}t_3}$ (6д) $T_{ср} = T_0 - \{ (T_0 - T_\delta) \{ 1 - [(\tilde{\chi} - \tilde{\delta})/3(r_\phi - \tilde{\delta})] \} / 3 \{ 1 - [(\tilde{\chi} - \tilde{\delta})/2(r_\phi - \tilde{\delta})] \} \}$ (6е)	

Параметр	Период <sup>1</sup>	Форма канала <sup>2</sup>	Стадия охлаждения	Расчетные формулы	Примечание
Среднеобъемная температура потока расплава в форме $\tilde{T}$	з, н	п	$Fo > Fo^*$	$\tilde{T} = T_{\text{ц}} - [(T_{\text{ц}} - T_{\delta})/3]$ (6ж) $T_{\text{ц}}$ [см. (1.5в)]	—
		ц	То же	$\tilde{T} = T_{\text{ц}} - [(T_{\text{ц}} - T_{\delta})/3]$ (6з) $T_{\text{ц}}$ [см. (1.5д)]	
Среднеобъемная температура полимера в форме $\bar{T}$	н	п	$Fo \leq Fo^*$	$\bar{T} = [T_{\text{ср}}\tilde{\chi} + T_0(0,5h_{\phi} - \tilde{\chi})]/(0,5h_{\phi})$ (7а) $\tilde{\chi} = 3,36 \sqrt{\tilde{a}t}$ (7б); $T_{\text{ср}} = T_0 - [(T_0 - T_{\phi})/3]$ (7в)	При расчете $\bar{T}_{\text{к-1}}$ параметр $t = t_3$ в начальный момент $t_{\text{к-1}}$ расчетной ступени, при расчете $\bar{T}_{\text{к}}$ параметр $t = t_3$ в конечный момент $t_{\text{к}}$ расчетной ступени
		ц	То же	$\bar{T} = [T_{\text{ср}}\tilde{\chi} + T_0(r_{\phi} - \tilde{\chi})]/r_{\phi}$ (7г); $\tilde{\chi} = 4,25 \sqrt{\tilde{a}t}$ (7д) $T_{\text{ср}} = T_0 - \{(T_0 - T_{\phi}) [1 - \tilde{\chi}/(3r_{\phi})]/[3(1 - \tilde{\chi}/(2r_{\phi}))]\}$ (7е)	
		п	$Fo > Fo^*$	$\bar{T} = T_{\text{ц}} - [(T_{\text{ц}} - T_{\phi})/3]$ (7ж) $T_{\text{ц}}$ [см. (1.5в)]	
		ц	То же	$\bar{T} = T_{\text{ц}} - [(T_{\text{ц}} - T_{\phi})/3]$ (7з) $T_{\text{ц}}$ [см. (1.5д)]	
Эквивалентное время охлаждения полимера $t_3$ в оформляющих элементах	з	п, ц	$Fo^* < Fo \leq Fo^*$	$t_3 = 0,44t$ (8а)	$t_3$ в форме
				$t_3 = t$ (8б)	$t_3$ в литниковой втулке

Продолжение табл. 1.3

Параметр	Период <sup>1</sup>	Форма канала <sup>2</sup>	Стадия охлаждения	Расчетные формулы	Примечание
Эквивалентное время охлаждения полимера $t_3$ в оформляющих элементах	н	п, ц	$Fo^* < Fo \leq Fo^*$	$t_3 = 0,44t_3 + t$ (8в), где $t = t_{\text{к-1}}$ , $\bar{t}$ или $t_{\text{к}}$	$t_3$ в форме
				$t_3 = t_3 + t$ (8г), где $t = t_{\text{к-1}}$ , $\bar{t}$ или $t_{\text{к}}$	$t_3$ в литниковой втулке
Вязкость $\eta_{\tilde{\gamma}}(\tilde{T}, B)$ при скорости сдвига $\tilde{\gamma}$ , температуре $\tilde{T}$ , влажности $B$	—	—	$Fo^* < Fo \leq Fo^*$	[9]	—
Коэффициент давления $K_{\text{д}}$ для $\Delta P_{\phi}$ , $\Delta P_{\text{л}}$ , $\Delta P_{\text{т.с}}$	з, н	п, ц	То же	$K_{\text{д}} = \exp \{ [\bar{J}_1 + \bar{J}_2 (\tilde{T} - 273)^{-1}] \bar{P}^{1-\bar{\xi}} \} \{ 1 + A_1 [\tilde{\gamma} \eta_{\text{н}}(\tilde{T})]^{\alpha} + A_2 [\tilde{\gamma} \eta_{\text{н}}(\tilde{T})]^{2\alpha} \} \{ 1 + A_1 [\tilde{\gamma} \eta_{\text{н}}(\tilde{T}, \bar{P})]^{\alpha} + A_2 [\tilde{\gamma} \eta_{\text{н}}(\tilde{T}, \bar{P})]^{2\alpha} \}^{-1}$ , (9а) где $\eta_{\text{н}}(\tilde{T}, \bar{P}) = \eta_{\text{н}}(\tilde{T}) \exp \{ [\bar{J}_1 + \bar{J}_2 (\tilde{T} - 273)^{-1}] \bar{P}^{1-\bar{\xi}} \}$ (9б)	

Дополнительные формулы

Критерий Фурье:

 $Fo = \tilde{a}t/(h/2)^2$  (10а),  $Fo^* = 0,089$  — для прямоугольного канала; $Fo = \tilde{a}t/r^2$  (10б),  $Fo^* = 0,055$  — для цилиндрического канала.

Относительная температура:

 $\bar{\theta} = (T_{\delta} - T_{\phi})/(T_0 - T_{\phi})$  (11)<sup>1</sup> з — период заполнения формы, н — период нарастания давления.<sup>2</sup> п — прямоугольная форма канала, ц — цилиндрическая форма канала.Примечание. При расчете  $\tau_{xy}$ ,  $\Delta P$ ,  $\tilde{\gamma}$ ,  $\delta$ ,  $t_3$ ,  $K_{\text{д}}$  в форме:  $h = h_{\phi}$ ,  $r = r_{\phi}$ ,  $B = B_{\phi}$ ,  $L = L_{\phi}$ ; в литниковой втулке:  $h = h_{\text{л}}$ ,  $r = r_{\text{л}}$ ,  $B = B_{\text{л}}$ ,  $L = L_{\text{л}}$ , температура  $\tilde{T} = T_0$ ; в сопле:  $r = r_{\text{с}}$ ,  $L = L_{\text{с}}$ , температура  $\tilde{T} = T_0$ .

тоновской вязкости  $\eta_{H(T^*)}$  при некоторой фиксированной температуре  $T^*$ . Если в качестве реологического в математической модели применяют уравнение в форме степенного закона [(4б), табл. 1.2], то перепады давлений  $\Delta P_{\phi}$ ,  $\Delta P_{л}$ ,  $\Delta P_{т.с}$  рассчитывают по соотношениям (2в), (2г) [табл. 1.3]. В этом случае в качестве исходных данных для расчета перепадов давлений задают константы  $m_0$ ,  $E$ ,  $n$  реологического уравнения в форме степенного закона. Перепады давлений в формующих элементах с прямоугольным проходным каналом рассчитывают по уравнениям (2а), (2в) [табл. 1.3], а с цилиндрическим — по уравнениям (2б), (2г) [табл. 1.3].

Если в качестве реологического применяют уравнение обобщенной характеристики вязкостных свойств, то математическое описание учитывает влияние давления, реализуемого при формовании, на вязкость, и, следовательно, на перепады давлений. Для упрощения расчета перепадов давлений  $\Delta P_{\phi}$ ,  $\Delta P_{л}$ ,  $\Delta P_{т.с}$  с учетом влияния давления, увеличение этих перепадов за счет влияния давления на вязкость оценивают коэффициентом давления  $K_d$  [уравнения (2а), (2б), табл. 1.3]. Коэффициент  $K_d$  равен отношению вязкости  $\eta_{\tilde{\nu}(\tilde{T}, P)}$  при давлении  $P$ , реализуемом в формующем элементе при формовании; к вязкости  $\eta_{\tilde{\nu}(\tilde{T})}$  при атмосферном давлении. Вязкости  $\eta_{\tilde{\nu}(\tilde{T}, P)}$  и  $\eta_{\tilde{\nu}(\tilde{T})}$  сравнивают при скорости сдвига формования  $\tilde{\nu}$  и средней объемной температуре формования  $\tilde{T}$ . Коэффициент  $K_d$  для перепадов  $\Delta P_{\phi}$ ,  $\Delta P_{л}$ ,  $\Delta P_{т.с}$  рассчитывают по соотношению (9а) [табл. 1.3]. В этом соотношении  $\bar{J}_1$ ,  $\bar{J}_2$ ,  $\bar{\xi}$  — константы зависимости ньютоновской вязкости от давления — взяты из работы [9]. Среднее давление  $\bar{P}$  в формующем элементе (форме, литниковой втулке, сопле) принимают равным среднему значению давления на входе  $P_{вх}$  и выходе  $P_{вых}$  формующего элемента. Если давление практически не влияет на вязкость полимера, коэффициент давления  $K_d$  принимают равным единице.

*Скоростные параметры формования.* В период заполнения формы объемная скорость течения  $Q$  — исходный параметр, который задают. В период нарастания давления, когда объемная скорость течения определяется изменением плотности полимера в форме в результате повышения давления и снижения температуры, среднее значение  $Q$  на каждой расчетной ступени определяют по уравнению (3) [табл. 1.3]. Это значение  $Q$  присваивают фиксированному моменту  $\tilde{t}$  соответствующей расчетной ступени.

Соотношение для расчета среднего значения объемной скорости течения  $Q$  на каждой расчетной ступени получают из выражения, характеризующего изменение объема полимера в форме  $\Delta v$  (в результате увеличения его плотности  $\rho$ ) в единицу времени на данной расчетной ступени:

$$Q = \Delta v / (t_k - t_{k-1}), \quad (1.3)$$

откуда

$$Q = \Delta m / [\bar{\rho}_{ср} (t_k - t_{k-1})] = 2 (\bar{\rho}_k - \bar{\rho}_{k-1}) v_{\phi} / [(\bar{\rho}_{k-1} + \bar{\rho}_k) (t_k - t_{k-1})], \quad (1.4)$$

где  $\Delta m$  — увеличение массы полимера в форме в течение расчетной ступени;  $\bar{\rho}_{k-1}$ ,  $\bar{\rho}_k$  и  $\bar{\rho}_{ср}$  — усредненная плотность полимера в форме в начальный  $t_{k-1}$  и конечный  $t_k$  моменты расчетной ступени и ее среднее значение в течение всей расчетной ступени;  $v_{\phi}$  — объем формы.

Плотность полимера в форме  $\rho$  определяется температурой  $T$  и давлением  $P$ . Изменение плотности полимера при изменении температуры и давления характеризует уравнение состояния (5) [табл. 1.2]. Для усреднения плотности полимера  $\bar{\rho}$  в форме по объему в начальный  $t_{k-1}$  и конечный  $t_k$  моменты расчетной ступени в уравнение состояния в качестве параметров температуры  $T$  и давления  $P$  подставляют их усредненные значения в эти моменты времени: среднеобъемную температуру полимера в форме  $\tilde{T}$  и среднее давление в форме  $\tilde{P}$ . В результате подстановки уравнения состояния (5а) [табл. 1.2] с усредненными параметрами  $\tilde{T}$  и  $\tilde{P}$  в уравнение (1.4) получается соотношение (3) [табл. 1.3] для расчета объемной скорости течения  $Q$  в фиксированные моменты расчетных ступеней. Среднее давление в форме в начальный  $\tilde{P}_{k-1}$  и конечный  $\tilde{P}_k$  моменты расчетной ступени принимают равным среднему значению давления на входе  $P_{\phi.вх}$  и выходе  $P_{\phi.вых}$  формы в соответствующие  $t_{k-1}$  и  $t_k$  моменты.

Скорость сдвига  $\dot{\nu}$ , реализуемую при течении полимера в формующем элементе в процессе формования в условиях гидравлического приближения с учетом усредненной по длине формующего элемента толщины пристенного слоя  $\delta$  можно определить по уравнению (4а) [табл. 1.3], если проходной канал элемента имеет прямоугольную форму, или по уравнению (4б) [табл. 1.3], если проходной канал имеет цилиндрическую форму.

*Толщина пристенного слоя, среднеобъемная температура потока расплава в форме, среднеобъемная температура полимера в форме, эквивалентное время охлаждения.* Формулы для расчета толщины пристенного слоя  $\delta$  в формующем элементе (5а)—(5г) [табл. 1.3], среднеобъемной температуры потока расплава в форме  $\tilde{T}$  (6а)—(6з) [табл. 1.3] и среднеобъемной температуры полимера в форме  $\bar{T}$  (7а)—(7з) [табл. 1.3] получают на основе решения уравнения энергии (3) [табл. 1.2].

Требование простоты математического описания для расчета параметров литьевых машин и автоматизации управления технологическим процессом литья приводит к тому, что для решения уравнения энергии применяют приближенные методы решения и допущения. Эти методы и допущения не искажают основные закономерности процесса охлаждения полимера в формующих элементах и незначительно снижают точность математического описания, но существенно упрощают расчет параметров формования.

Для упрощения уравнения энергии (3) [табл. 1.2] вводят следующие допущения. Теплопередачу учитывают только вдоль главного (наиболее интенсивного) направления теплообмена (вдоль оси  $y$ ) от горячего расплава к более холодным стенкам формы, поскольку теплопередача в двух других направлениях ( $x$  и  $z$ ) мала. Поэтому

процесс теплопередачи считают одномерным вдоль оси  $y$ . При решении уравнения энергии параболический профиль распределения скорости течения расплава в канале формующего элемента заменяют плоским. Конвективно-кондуктивный теплоперенос заменяют кондуктивным теплообменом.

Течение расплава полимеров сопровождается диссипативными тепловыделениями  $q_g$ , которые зависят от напряжения сдвига. Реологические характеристики полимеров определяют при тех же напряжениях и скоростях сдвига, которые реализуются при формовании. Причем обычно эффект диссипативного тепловыделения при определении реологических свойств полимеров не учитывают, т. е. при расчете реологических характеристик этот эффект не выделяют отдельно. Поэтому при решении уравнения энергии можно принять допущение, что  $q_g = 0$ .

Охлаждение кристаллизующихся полимеров при формовании сопровождается фазовым переходом из вязкотекучего в твердое состояние, при этом выделяется теплота плавления. В реальном процессе литья теплота фазового перехода оказывает сравнительно малое влияние на температурное поле (распределение температуры) в поперечном сечении канала формы: отклонение результатов решения уравнения энергии с учетом и без учета теплоты плавления не превышает 10—15 %. Поэтому для упрощения уравнения энергии можно принять допущение, заключающееся в том, что теплоту плавления учитывают, подставляя в это уравнение в качестве коэффициента температуропроводности  $a$  его среднеинтегральное (эффективное) значение  $\bar{a}$ , рассчитанное с учетом этой теплоты [уравнение (3а), табл. 1.2].

Коэффициент температуропроводности полимеров  $a$  в некоторой степени зависит от температуры и давления [9]. Но учитывая сравнительно небольшое их влияние на коэффициент  $a$ , для упрощения решения уравнения энергии можно принять допущение, что коэффициент  $a$  в условиях формования постоянен. Для уменьшения снижения точности описания процесса охлаждения введением этого допущения коэффициент  $a$  принимают равным среднему значению в интервале изменения температуры от температуры формы до температуры литья и в диапазоне давлений, реализуемом при формовании. Рассмотренные допущения упрощают уравнение энергии (3а) [табл. 1.2].

Для решения уравнения энергии используют граничные и начальные условия, характеризующие условия, в которых протекает реальный тепловой процесс. Условия теплообмена в литьевой форме характеризуются тем, что критерий Био  $Bi$  существенно больше единицы. Это позволяет принять граничные условия первого рода. Согласно этим условиям температура соприкасающихся со стенкой формы слоев полимера равна температуре формы  $T_\phi$  в течение всего времени формования, т. е. при  $y = h/2$   $T_{(h/2, t)} = T_\phi$ ; температура формы постоянна (пренебрегают незначительным изменением температуры литьевой формы при правильной системе охлаждения); контакт между формой и формующим полимером не нарушается; градиент

температур полимера в центре проходного канала формующих элементов равен нулю, т. е.  $dT/dy = 0$  при  $y = 0$ .

Начальные условия определяются законом распределения температуры внутри тела в начальный момент теплообмена. Согласно этим условиям температура расплава в начальный момент заполнения системы сопло — форма равна той, с которой он поступает из нагревательного цилиндра, т. е.  $T_{(0)} = T_0$ .

Охлаждение полимера в литьевой форме в период ее заполнения и нарастания давления отличается кратковременностью теплообмена. Для характеристики процесса охлаждения используют критерий Фурье [уравнения (10а), (10б), табл. 1.3]. В период заполнения формы и нарастания давления критерий Фурье имеет малое значение ( $< 0,1$ ). В условиях кратковременности теплообмена для решения уравнения энергии используют приближенный метод.

Процесс охлаждения полимера в форме разделяют на две стадии. Первая стадия (см. рис. 1.35, а) начинается с момента поступления горячего расплава в более холодную форму, т. е. с момента начала теплообмена. С увеличением продолжительности теплообмена фронт охлаждения расплава  $\chi$ , ограничивающий область со стороны формы, в которой температура снизилась по сравнению с начальной  $T_0$ , перемещается к центру канала. По достижении фронта охлаждения  $\chi$  центра канала заканчивается первая стадия и начинается вторая. На второй стадии температура полимера по всему поперечному сечению канала ниже начальной  $T_0$  и по мере увеличения продолжительности охлаждения (развития охлаждения) снижается в каждой точке по высоте канала, в том числе в центре канала понижается температура центра  $T_\pi$  (см. рис. 1.35, б). Вторая стадия продолжается до конца охлаждения. В момент перехода от первой стадии ко второй критерий Фурье  $Fo$  характеризуется критическим значением  $Fo^*$ . На первой стадии критерий Фурье меньше критического:  $Fo < Fo^*$ , а на второй стадии больше:  $Fo > Fo^*$ .

Приближенный метод предусматривает замену действительных кривых распределения температуры в поперечном сечении канала формы на обеих стадиях охлаждения параболами второго порядка. Это позволяет применять для описания распределения температуры простые аналитические зависимости, которые аппроксимируют точные решения дифференциального уравнения теплопроводности (3а) [табл. 1.2] и удовлетворяют граничным и начальным условиям (см. табл. 1.2):

на первой стадии для прямоугольной и цилиндрической формы канала

$$T_\delta = T_0 - (T_0 - T_\phi) [1 - (\delta/\chi)^2]; \quad (1.5a)$$

на второй стадии для прямоугольной формы канала

$$T_\delta = T_\phi + (T_\pi - T_\phi) [1 - (1 - 2\delta/h)^2], \quad (1.5б)$$

где

$$T_\pi = (T_0 - T_\phi) \exp[-3(Fo - Fo^*)] + T_\phi; \quad (1.5в)$$

для цилиндрической формы канала

$$T_{\delta} = T_{\phi} + (T_{\pi} - T_{\phi}) [1 - (1 - 2\delta/h)^2], \quad (1.5г)$$

где

$$T_{\pi} = (T_0 - T_{\phi}) 1,5 \exp(-6Fo) + T_{\phi}. \quad (1.5д)$$

Приближенные решения зависимостей распределения температуры полимера отклоняются от точных по дифференциальному уравнению теплопроводности менее, чем на 3 %.

Для получения формул (5а)—(5г) [табл. 1.3], позволяющих рассчитать толщину пристенного слоя  $\delta$  (граница слоя с расплавом есть фронт заглубления изотермы  $T_{\delta}$ ) в зависимости от параметров формования и продолжительности охлаждения  $t$ , используют уравнение теплового баланса. Это уравнение показывает, что количество теплоты  $dQ_{от}$ , отданное полимером в процессе охлаждения в форме, равно количеству теплоты  $dQ_{пр}$ , принятому формой от полимера:  $dQ_{от} = dQ_{пр}$ . В результате совместного решения этого уравнения и уравнения распределения температуры полимера (1.5а)—(1.5д) получают формулы (5а)—(5г) [табл. 1.3] для расчета толщины пристенного слоя  $\delta$ .

Для расчета  $\delta$  предварительно определяют критерий  $Fo$  для данного момента охлаждения [уравнения (10а), (10б), табл. 1.3]. Если полученный критерий  $Fo$  меньше критического  $Fo^*$  ( $Fo \leq Fo^*$ ), то толщину  $\delta$  определяют по формулам (5а), (5в) [табл. 1.3], если  $Fo > Fo^*$  — по формулам (5б), (5г) [табл. 1.3]. Толщину пристенного слоя  $\delta$  в канале прямоугольного сечения определяют по формулам (5а), (5б) [табл. 1.3], а цилиндрического — по формулам (5в), (5г) [табл. 1.3].

Температура слоя  $T_{\delta}$ , по которому расплав течет в формующем элементе, на 40—70 °С выше температуры стеклования  $T_0$  аморфных полимеров и на 5—15 °С выше температуры плавления  $T_{пл}$  кристаллизирующихся полимеров;  $T_{\delta}$  и  $T_{пл}$  для различных полимеров приведены в работе [9].

В условиях гидравлического приближения для расчета параметров формования (см. табл. 1.3) используют усредненную по длине затекания полимера в формующий элемент толщину  $\bar{\delta}$  пристенного слоя. Для получения усредненной толщины пристенного слоя  $\bar{\delta}$  в качестве временного параметра охлаждения  $t$  в расчетные формулы (5а)—(5г) [табл. 1.3] подставляют эквивалентное время охлаждения  $t_3$ .

По определению эквивалентное время охлаждения  $t_3$  равно продолжительности образования пристенного слоя  $\bar{\delta}$ , толщина которого равна усредненной по длине затекания полимера в формующий элемент. Эта толщина  $\bar{\delta}$  в зависимости от продолжительности заполнения  $t$  формующего элемента (продолжительности охлаждения в формующем элементе с момента поступления расплава в него) определяется уравнением

$$\bar{\delta} = \int_0^t C' \sqrt{at} (1 - \sqrt{1 - \bar{\theta}}) dt/t, \quad (1.6)$$

где для цилиндрического канала  $C' = 4,25$ ; для прямоугольного  $C' = 3,36$ .

Исходя из определения эквивалентного времени охлаждения  $t_3$  и с учетом выражения (1.6) время  $t_3$  определяется уравнением

$$t_3 = \left[ C' \int_0^t \sqrt{at} (1 - \sqrt{1 - \bar{\theta}}) dt/t \right]^2 [C' \sqrt{a} (1 - \sqrt{1 - \bar{\theta}})]^{-2}. \quad (1.7)$$

Расчетные формулы (8а)—(8г) [табл. 1.3] эквивалентного времени  $t_3$  охлаждения получают в результате решения уравнения (1.7).

В период заполнения формы в режиме постоянной объемной скорости течения эквивалентное время охлаждения полимера  $t_3$  в форме с прямоугольным и цилиндрическим проходными каналами в зависимости от продолжительности  $t$  ее заполнения к текущему (рассчитываемому) моменту периода на обеих стадиях охлаждения ( $Fo^* < Fo \leq Fo^*$ ) можно определить по уравнению (8а) [табл. 1.3]. При расчете эквивалентного времени охлаждения полимера в литниковой втулке  $t_3$  принимают допущение, что толщина пристенного слоя по ее длине одинакова. Поэтому эквивалентное время охлаждения  $t_3$  в литниковой втулке считают равным продолжительности заполнения формы  $t$  к текущему (рассчитываемому) моменту периода.

В период нарастания давления эквивалентное время охлаждения полимера  $t_3$  в форме с прямоугольным и цилиндрическим проходными каналами в начальный  $t_{k-1}$ , фиксированный  $\bar{t}$  и конечный  $t_k$  моменты каждой расчетной ступени можно определить по уравнению (8в) [табл. 1.3]. При этом принимается допущение, что после заполнения формы скорость увеличения пристенного слоя одинакова по всей ее длине. Поэтому эквивалентное время охлаждения в период нарастания давления суммируется из эквивалентного времени охлаждения полимера к концу периода заполнения формы и продолжительности периода нарастания давления к рассматриваемому моменту времени: к начальному  $t_{k-1}$ , фиксированному  $\bar{t}$  и конечному  $t_k$  моментам расчетной ступени. Эквивалентное время охлаждения полимера  $t_3$  в литниковой втулке можно определить по уравнению (8г) [табл. 1.3].

Среднеобъемную температуру  $\bar{T}$  потока расплава в форме в период заполнения формы и нарастания давления можно определить по уравнениям (6а)—(6з) [табл. 1.3]. Эта температура получается при усреднении температуры в поперечном сечении канала формы, в котором течет расплав. Температура неоднородна по высоте этого сечения (см. рис. 1.35) и по длине формы. В поперечном сечении канала формы температуру усредняют, исходя из следующих предположений. На первой стадии охлаждения, когда его фронт не достиг центра формы, на кривой распределения температуры в поперечном сечении, в котором течет расплав ( $\frac{h}{2} - \bar{\delta}$  или  $r - \bar{\delta}$ ), можно выделить два участка (см. рис. 1.35, а). На первом участке ( $\bar{\chi} - \bar{\delta}$ ) температура неоднородна и ниже начальной  $T_0$ , с которой расплав поступает из нагревательного цилиндра. Этот участок характеризуется средней температурой  $T_{ср}$ . На втором участке ( $\frac{h}{2} - \bar{\chi}$  или  $r - \bar{\chi}$ )

температура однородна и не изменилась по сравнению с начальной  $T_0$  и равна  $T_0$ .

Температуру по высоте поперечного сечения канала формы, в котором течет расплав  $\left(\frac{h}{2} - \bar{\delta}\right)$  или  $\bar{r} - \bar{\delta}$ , усредняют по уравнениям (6а), (6г) [табл. 1.3]. При этом принимают, что вклад температур  $T_{ср}$  (характеризует среднюю температуру на первом участке кривой) и  $T_0$  (температура на втором участке кривой) в среднее значение  $\bar{T}$  пропорционален относительной высоте соответствующего участка  $(\bar{\chi} - \bar{\delta})$  и  $\left(\frac{h}{2} - \bar{\chi}\right)$  или  $r - \bar{\chi}$ . Среднюю температуру расплава  $T_{ср}$  на первом участке рассчитывают по приближенным аналитическим выражениям (6в), (6е) [табл. 1.3].

На второй стадии охлаждения по всей высоте поперечного сечения канала формы, в котором течет расплав  $\left(\frac{h}{2} - \bar{\delta}\right)$  или  $r - \bar{\delta}$ , температура неоднородна (см. рис. 1.35, б) и изменяется от температуры слоя  $T_\delta$ , по которому течет расплав, до температуры  $T_c$  в центре формы. Температуру по высоте этого сечения усредняют по приближенным аналитическим выражениям (6ж), (6з) [табл. 1.3].

Усреднение температуры расплава по длине затекания в форму достигается тем, что в расчетные формулы  $\bar{T}$  подставляют усредненные значения заглубления фронта охлаждения  $\bar{\chi}$  и толщины пристенного слоя  $\bar{\delta}$ . Для получения усредненных  $\bar{\chi}$  [уравнения (6б), (6д), табл. 1.3] и  $\bar{\delta}$  [уравнения (5а)—(5г), табл. 1.3] в качестве временного параметра  $t$  подставляют эквивалентное время охлаждения полимера в форме  $t_0$  в текущий (рассчитываемый) момент в период заполнения формы или в фиксированный момент расчетной ступени в период нарастания давления.

Для расчета среднеобъемной температуры потока расплава  $\bar{T}$  в форме предварительно определяют критерий Фурье [уравнения (10а), (10б), табл. 1.3]. Если  $Fo \leq Fo^*$ , то температуру  $\bar{T}$  определяют по формулам (6а), (6г) [табл. 1.3], если  $Fo > Fo^*$  — по формулам (6ж), (6з) [табл. 1.3]. Температуру  $\bar{T}$  в формах с прямоугольным проходным каналом определяют по формулам (6а), (6ж) [табл. 1.3], а с цилиндрическим — по формулам (6г), (6з) [табл. 1.3].

Среднеобъемную температуру полимера в форме  $\bar{T}$  в начальный  $t_{k-1}$  и конечный  $t_k$  моменты расчетных ступеней в период нарастания давления можно определить по формулам (7а)—(7з) [табл. 1.3]. Величину  $\bar{T}$  определяют для расчета объемной скорости течения  $Q$ . Эта температура получается при усреднении температуры по всему поперечному сечению проходного канала формы и по длине формы. Для получения расчетных формул  $\bar{T}$  применяют те же методы, что и для получения расчетных формул среднеобъемной температуры потока расплава  $\bar{T}$  (см. выше). Порядок расчета  $\bar{T}$  и  $\bar{T}$  аналогичен. При расчете  $\bar{T}$  в начальный  $t_{k-1}$  и конечный  $t_k$  моменты каждой расчетной

ступени продолжительность охлаждения  $t$  задают равной эквивалентному времени охлаждения  $t_0$  в соответствующий  $t_{k-1}$  или  $t_k$  момент.

*Вязкость полимера в условиях формования.* Расчет вязкости полимеров  $\eta_{\tilde{\gamma}}(\tilde{\gamma}, v)$  при скорости сдвига формования  $\tilde{\gamma}$ , температуре  $\tilde{T}$  и влажности перед переработкой В для определения перепадов давлений  $\Delta P_\phi$ ,  $\Delta P_\pi$ ,  $\Delta P_{т.с}$  по известному значению ПТР, молекулярной массе  $\bar{M}$  или по единичному значению ньютоновской вязкости  $\eta_H(t^*)$  при некоторой фиксированной температуре  $T^*$  подробно изложен в работе [9].

Расчет ньютоновской вязкости полимеров  $\eta_H(\tilde{T})$  при температуре формования  $\tilde{T}$  для определения коэффициента давления  $K_d$  по известному значению ПТР,  $\bar{M}$ ,  $\eta_H(t^*)$  также приведен в работе [9].

*Входные потери давления.* Математическая модель учитывает, что течение расплава через вход в сопло сопровождается входными эффектами, обусловленными вязкоупругими свойствами полимера. На эти эффекты затрачивается дополнительная энергия, определяющая входные потери давления  $\Delta P_{вх.с}$  (см. п. 1.2.2). Общие входные потери давления  $\Delta P_{вх.с}$  суммируются из потерь давления до входа в сопло  $\Delta P_{о.с}$  и релаксирующей составляющей общих потерь давления на входном участке сопла  $\Delta P_{L.с}$  [уравнение (4), табл. 1.1]. Общий перепад давлений  $\Delta P_c$  в сопле складывается из потерь давлений, затрачиваемых на вязкое течение  $\Delta P_{т.с}$ , и общих входных потерь давления  $\Delta P_{вх.с}$  [уравнение (3), табл. 1.1].

Входные потери давления до входа в сопло  $\Delta P_{о.с}$  можно определить по уравнениям (1а), (1б) [табл. 1.4]. Эти уравнения получены на основе математического описания течения полимеров через вход в канал [9, 13]. В уравнениях (1а), (1б) [табл. 1.4]  $D'$ ,  $\mu$  — константы зависимости входных потерь давления  $\Delta P_{о.с}$ ; для различных полимеров их значения приведены в работе [9].

Если в качестве реологического в математической модели применяют уравнение обобщенной характеристики вязкостных свойств (4а) [табл. 1.2], то перепад давлений  $\Delta P_{о.с}$  рассчитывают по соотношению (1а) [табл. 1.4]. В этом случае в качестве исходных данных для расчета  $\Delta P_{о.с}$  можно задавать ПТР, молекулярную массу  $\bar{M}$  или единичное значение ньютоновской вязкости  $\eta_H(t^*)$  при некоторой фиксированной температуре  $T^*$ . Если в качестве реологического в математической модели применяют уравнение в форме степенного закона (4б) [табл. 1.2], то перепад давлений  $\Delta P_{о.с}$  рассчитывают по соотношению (1б) [табл. 1.4]. В этом случае в качестве исходных данных для расчета  $\Delta P_{о.с}$  задают константы  $m_0$ ,  $E$ ,  $n$  реологического уравнения в форме степенного закона.

Если в качестве реологического применяют уравнение обобщенной характеристики вязкостных свойств, то математическое описание учитывает влияние давления на входе в сопло  $P_c$  на входные эффекты и, следовательно, на входные потери давления. Для упрощения расчета перепада давлений  $\Delta P_{о.с}$  с учетом влияния давления увеличение этого перепада за счет влияния давления на входные

Формулы для расчета входных потерь давления в сопле

Потери давления	Расчетные формулы	Примечание
Входные потери давления до входа в сопло $\Delta P_{0,c}$	$\Delta P_{0,c} = D' [\eta_{\dot{\gamma}}(T_0, V) \dot{\gamma}]^\mu K_{д.вх}$ $\Delta P_{0,c} = D' \{m_0 \exp [E/(RT_0)] \dot{\gamma}^\eta\}^\mu$	<p>Исходные данные: ПТР, <math>\bar{M}</math>, <math>\eta_H(T^*)</math></p> <p>Исходные данные: <math>m_0, E, n</math></p>
Релаксирующая составляющая общей потерь давления на входном участке сопла $\Delta P_{Lc}$	$\Delta P_{Lc} = A' \Delta P_{0,c} \{1 - \exp [-(L_c / (\bar{V} \theta_{\dot{\gamma}}(T_0, P_c, V)))^K]\}$ <p>где</p> $\theta_{\dot{\gamma}}(T_0, P_c, V) = \eta_H(T_0, P_c, V) / \{C_1 + C_2 [\dot{\gamma} \eta_H(T_0, P_c, V)]^\beta + C_3 [\dot{\gamma} \eta_H(T_0, P_c, V)]^{2\beta}\}$ $\eta_H(T_0, P_c, V) = \eta_H(T_0) \exp \{J_1 + J_2 (T_0 - 273)^{-1}\} P_c^{1-\xi} / [1 + D_1 V^\varphi + D_2 V^{2\varphi}]$ $\bar{V} = Q / (\pi r_c^2) \quad (2\gamma) \text{ — средняя скорость течения в сопле}$ $\Delta P_{Lc} = A' \Delta P_{0,c}$ <p>при <math>L_c \geq L_{вх} = 3,7^{1/K} \bar{V} \theta_{\dot{\gamma}}(T_0, P_c, V)</math></p>	<p>(2а)</p> <p>(2б)</p> <p>(2в)</p> <p>(3а)</p> <p>(3б)</p>
Коэффициент давления $K_{д.вх}$ для $\Delta P_{0,c}$	$K_{д.вх} = \{ \exp \{ [J_1 + J_2 (T_0 - 273)^{-1}] P_c^{1-\xi} \} \{ 1 + A_1 [\dot{\gamma} \eta_H(T_0)]^\alpha + A_2 [\dot{\gamma} \eta_H(T_0)]^{2\alpha} \}^{-1} \}^\mu$ $\eta_H(T_0, P_c) = \eta_H(T_0) \exp \{ [J_1 + J_2 (T_0 - 273)^{-1}] P_c^{1-\xi} \}$	<p>(4а)</p> <p>(4б)</p>

Дополнительная формула:

$$\dot{\gamma} = (3n + 1) Q / (\pi \pi r_c^3) \quad (5)$$

эффекты оценивают коэффициентом давления  $K_{д.вх}$  [уравнение (1а), табл. 1.4]. Коэффициент давления  $K_{д.вх}$  равен отношению перепада  $\Delta P_{0,c}$  при давлении  $P_c$ , реализуемом на входе в сопло при формовании, к перепаду  $\Delta P_{0,c}$  при атмосферном давлении. Коэффициент давления можно определить по выражению (4а) [табл. 1.4]. Коэффициенты  $J_1, J_2, \xi$  для различных полимеров приведены в работе [9].

Расчет вязкости расплава полимеров  $\eta_{\dot{\gamma}}(T_0, V)$ , при скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , реализуемой в сопле, начальной температуре материала  $T_0$  и влажности  $V$  для определения  $\Delta P_{0,c}$  [уравнение (1а), табл. 1.4] и ньютоновской вязкости  $\eta_H(T_0)$  при начальной температуре  $T_0$  для определения коэффициента давления  $K_{д.вх}$  [уравнения (4а), (4б), табл. 1.4] по известным значениям ПТР, молекулярной массы  $\bar{M}$  и ньютоновской вязкости полимера  $\eta_H(T^*)$  при некоторой фиксированной температуре  $T^*$  приведен в работе [9].

Релаксирующую составляющую общих потерь давления на начальном участке сопла  $\Delta P_{Lc}$  можно определить по уравнениям (2а)—(2г) [табл. 1.4]. В уравнении (2а)  $A'$  — константа зависимости входных потерь давления  $\Delta P_{Lc}$ ,  $K$  — релаксационная константа кривой релаксации  $\Delta P_{Lc}$ ; для различных полимеров эти константы приведены в работе [9].

Характерное время релаксации  $\theta_{\dot{\gamma}}(T_0, P_c, V)$  в уравнении (2а) [табл. 1.4] определяет скорость релаксации релаксирующей составляющей входных потерь давления  $\Delta P_{Lc}$ . Оно зависит от параметров формования (скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , температуры  $T_0$ , давления  $P_c$ ), влажности  $V$  полимера перед переработкой и его молекулярных характеристик. Для описания зависимости  $\theta_{\dot{\gamma}}(T, P, V, \bar{M})$  от параметров  $\dot{\gamma}, T, P, V, \bar{M}$  применяют уравнение обобщенной характеристики характерных времен релаксации входных потерь давления  $\Delta P_{Lc}$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  [9], которое является аналитическим ее выражением. Обобщенная характеристика характерных времен релаксации представляет собой зависимость характерных времен релаксации  $\theta_{\dot{\gamma}}(T, P, V, \bar{M})$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , инвариантную относительно температуры  $T$ , давления  $P$ , влажности  $V$  и молекулярной массы полимера  $\bar{M}$ . Эта зависимость получается при нормировании характерного времени релаксации  $\theta_{\dot{\gamma}}(T, P, V, \bar{M})$  полимера с молекулярной массой  $\bar{M}$  при скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , температуре  $T$ , давлении  $P$  и влажности  $V$  и скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  по ньютоновской вязкости  $\eta_H(T, P, V, \bar{M})$ , которая учитывает влияние температуры  $T$ , давления  $P$ , влажности  $V$  и молекулярной массы полимера  $\bar{M}$ . В таких координатах зависимости характерных времен релаксации  $\theta_{\dot{\gamma}}(T, P, V, \bar{M})$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , полученные для полимера с разной молекулярной массой  $\bar{M}$  при различных температурах  $T$ , давлениях  $P$  и разном содержании влаги  $V$  совмещаются в одну кривую. Характерное время релаксации  $\theta_{\dot{\gamma}}(T_0, P_c, V)$  в условиях формования (при скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , реализуемой в сопле [уравнение (5), табл. 1.4], начальной температуре полимера  $T_0$ , давлении  $P_c$ , реализуемом на входе в сопло при

формовании, и влажности В) можно определить по уравнению (2б) [табл. 1.4]. В этом уравнении  $C_1, C_2, C_3, \beta$  — константы уравнения обобщенной зависимости характерных времен релаксации; эти константы приведены в работе [9].

Ньютоновскую вязкость полимера  $\eta_H(T_0, P_c, B)$  [уравнение (2б), табл. 1.4] при начальной температуре  $T_0$ , давлении  $P_c$  и влажности В можно определить по уравнению (2в) [табл. 1.4]. В этом уравнении  $J_1, J_2, \zeta$  и  $D_1, D_2, \varphi$  — константы зависимости ньютоновской вязкости полимера от давления и влажности; для различных полимеров эти константы приведены в работе [9]. Расчет ньютоновской вязкости при начальной температуре  $T_0$  по известным значениям ПТР, молекулярной массы  $\bar{M}$  или по ньютоновской вязкости  $\eta_H(T^*)$  при некоторой фиксированной температуре  $T^*$  приведен в работе [9].

Если проходной канал сопла имеет длину  $L_c$ , превышающую длину входового участка  $L_{вх}$  [уравнение (3б), табл. 1.4], на котором заканчивается релаксация входовых потерь давления  $\Delta P_{Lc}$ , релаксирующую составляющую входовых потерь давления  $\Delta P_{Lc}$  можно определить по уравнению (3а) [табл. 1.4].

Дополнительные условия для взаимосвязи параметров формования в различных оформляющих элементах системы (форме, литниковой втулке, сопле и др.) и для учета режимов заполнения формы и двух стадий периода нарастания давления. *Условия для взаимосвязи параметров формования в различных оформляющих элементах системы.* Процессы формования, протекающие в различных оформляющих элементах системы сопло — форма, взаимосвязаны. Поэтому взаимосвязаны и параметры формования в этих элементах. Для учета этого в общую математическую модель процессов формования в системе сопло — форма вводят следующие условия:

в текущие моменты периода заполнения формы и в фиксированные моменты расчетных ступеней периода нарастания давления объемная скорость течения по длине всех элементов системы сопло — форма одинакова;

давление непрерывно изменяется по всей длине системы сопло — форма, поэтому давление на выходе каждого предыдущего элемента системы  $P_{вых}$  равно давлению на входе  $P_{вх}$  последующего за ним: давление на выходе сопла  $P_{с. вых}$  равно давлению на входе в литниковую втулку  $P_{л. вх}$  ( $P_{с. вых} = P_{л. вх}$ ), давление на выходе литниковой втулки  $P_{л. вых}$  равно давлению на входе в форму  $P_{ф. вх}$  ( $P_{л. вых} = P_{ф. вх}$ ); давление на входе в сопло  $P_c$  равно давлению на входе в систему;

в текущие моменты периода заполнения формы и в фиксированные моменты расчетных ступеней периода нарастания давления общий перепад давлений в системе сопло — форма  $\Delta P_{с-ф}$  складывается из потерь давления в каждом оформляющем элементе системы (см. табл. 1.1).

*Условия для учета режимов заполнения формы.* При заполнении формы могут реализоваться два режима течения полимера в форме: с постоянной объемной скоростью течения, равной задаваемой, и с убывающей объемной скоростью (см. п. 1.2.2). Для учета этих двух режимов заполнения вводят следующие условия:

если в текущие моменты периода заполнения формы давление на входе в сопло  $P_c$ , равное общему перепаду давлений по длине системы сопло — форма  $\Delta P_{с-ф}$ , меньше максимально реализуемого давления на входе в сопло  $P_{с max}$ , которое определяется установленным давлением в гидроприводе и потерями давления в инжекционном узле машины, то полимер заполняет форму в режиме постоянной объемной скорости течения, равной задаваемой; этот режим заканчивается в момент достижения на входе в сопло  $P_c$  максимально реализуемого значения давления  $P_{с max}$ ;

после достижения на входе в сопло  $P_c$  максимально реализуемого значения давления  $P_{с max}$  полимер заполняет форму в режиме убывающей объемной скорости течения.

*Условия для учета двух стадий периода нарастания давления.* Период нарастания давления состоит из двух стадий: первая стадия характеризуется уменьшением перепадов давлений в элементах системы сопло — форма и повышением давления по всей длине системы, вторая стадия «динамического равновесия» характеризуется постоянством перепадов давлений и давления по всей длине системы (см. п. 1.2.3). Для учета этих двух стадий вводят следующие условия:

если перепад давлений в системе сопло — форма  $\Delta P_{с-ф}$  на текущей расчетной ступени получается меньше того же перепада давлений на предыдущей расчетной ступени, то протекает первая стадия периода нарастания давления;

первая стадия заканчивается, если на последующей  $(\xi + 1)$ -й расчетной ступени перепад давлений в системе  $(\Delta P_{с-ф})_{\xi+1}$  получается больше рассчитанного перепада  $(\Delta P_{с-ф})_{\xi}$  на предыдущей  $\xi$ -й ступени. Увеличение расчетного перепада давлений  $\Delta P_{с-ф}$  означает, что закончилась первая стадия периода нарастания давления и началась вторая стадия. Момент развития в системе максимальных усилий соответствует фиксированному  $\bar{t}$  моменту  $\xi$ -й расчетной ступени. Значения параметров формования в момент развития максимальных усилий и на второй стадии периода нарастания давления задают равными рассчитанным в фиксированный момент  $\bar{t}$   $\xi$ -й расчетной ступени.

**Период спада давления.** В период спада давления, когда в отличие от периода заполнения формы и нарастания давления форма изолирована от инжекционного цилиндра и в нее не поступают новые порции расплава, охлаждение полимера вызывает понижение давления в форме.

В период спада давления полимер охлаждается в результате теплопроводности от горячего полимера к более холодным стенкам формы. Кондуктивный процесс теплообмена описывается дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье. Для упрощения



решения этого уравнения в период спада давления можно принять те же допущения, что и в предыдущие два периода (см. выше). Принимаются граничные условия первого рода. Согласно начальному условию температура полимера по всему поперечному сечению полости формы и по ее длине в начальный момент периода одинакова и равна той  $T_0$ , с которой он поступает из нагревательного цилиндра, т. е. изменение температуры полимера в форме в период заполнения и нарастания давления не учитывают.

В этих условиях уравнение теплопроводности для одномерного тела, приближенно описывающее изменение его температуры во времени, записывается [12]:

для пластины

$$d\bar{\theta}/dt = \bar{a} d^2\bar{\theta}/dy^2; \quad (1.8a)$$

для цилиндра

$$d\bar{\theta}/dt = \bar{a} (d^2\bar{\theta}/dr^2 + d\bar{\theta}/r dr), \quad (1.8б)$$

где  $\bar{\theta}$  — относительная температура:  $\bar{\theta} = (T_{t,y} - T_{\phi})/(T_0 - T_{\phi})$ ; здесь  $T_{t,y}$  — температура полимера в слое с координатой  $y$  в текущий момент  $t$  периода.

Граничные условия первого рода имеют вид  $\frac{d\bar{\theta}}{dy} = \frac{d\bar{\theta}}{dr} \Big|_{y=0} = 0$ ;  $\bar{\theta}_{(\pm h/2 \text{ или } r)} = 0$ . Начальное условие имеет вид  $\bar{\theta}_{y,0} = 1$ .

Для расчета параметров формования можно использовать решение уравнения теплопроводности (1.8) с граничными условиями первого рода в следующем виде [12]:

для плоского изделия

$$\bar{\theta} = \sum_{i=1}^n 2\mu_n^{-1} (-1)^{n+1} \cos(\mu_n 2y/h) \exp(-\mu_n^2 Fo); \quad (1.9a)$$

для цилиндрического изделия

$$\bar{\theta} = \sum_{i=1}^n \{2/[\mu_n J_1(\mu_n)]\} J_0(\mu_n y/R) \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (1.9б)$$

где  $\mu_n$  — корень уравнения Фурье;  $\mu_n = (2n-1)\pi/2$  — для пластины;  $\mu_1 = 2,4$ ;  $\mu_2 = 5,52$ ;  $\mu_3 = 8,654$ ;  $\mu_4 = 11,792$  — для цилиндра;  $Fo$  — критерий Фурье [уравнения (10a), (10б), табл. 1.3];  $J_0, J_1$  — функция Бесселя нулевого и первого порядка [12].

Изменение температуры в центре изделия во времени описывается упрощенным уравнением [12]:

для плоского изделия

$$\bar{\theta} = 4 \exp(-\pi^2 Fo/4)/\pi; \quad (1.10a)$$

для цилиндрического изделия

$$\bar{\theta} = 1,6 \exp(-5,76 Fo), \quad (1.10б)$$

где  $\bar{\theta} = (T_{0,t} - T_{\phi})/(T_0 - T_{\phi})$ .

Изменение среднеобъемной относительной температуры изделия  $\bar{\theta}$  во времени описывается уравнением:

для плоского изделия

$$\bar{\theta} = 8 \exp(-\pi Fo/4)/\pi; \quad (1.11a)$$

для цилиндрического изделия

$$\bar{\theta} = 0,694 \exp(-5,76 Fo), \quad (1.11б)$$

$$\bar{\theta} = (\bar{T}_{(t)} - T_{\phi})/(T_0 - T_{\phi}),$$

где  $\bar{T}_{(t)}$  — среднеобъемная температура полимера в форме в текущий момент  $t$  периода.

Основываясь на уравнении состояния (5) [табл. 1.2] и предполагая постоянство плотности полимера, изменение давления в форме  $P_{(t)}$  в текущий момент  $t$  периода можно записать

$$P_{(t)} = [P_{(t_H)} (1 + \pi/P_{(t_H)}) T_{(t)}/T_0] - \pi, \quad (1.12)$$

где  $P_{(t_H)}$  — давление в форме к концу периода нарастания давления,

Теплофизические расчеты по определению энергии (теплоты), которую необходимо отвести, чтобы охладить изделие, основаны на первом законе термодинамики. Согласно этому закону количество теплоты  $W_1$ , отдаваемое охлаждаемым полимером охлаждающей жидкости (хладагенту), равно количеству теплоты  $W_2$ , принятому охлаждающей жидкостью от охлаждающегося полимера, т. е.  $W_1 = W_2$ . При этом для упрощения расчетов пренебрегают потерями теплоты через стенки формы.

Количество теплоты  $W_1$ , отдаваемое охлаждаемым полимером охлаждающей жидкости, можно приближенно определить по соотношению

$$W_1 = C_M m_1 (T_0 - \bar{T}_K), \quad (1.13)$$

где  $C_M$  — удельная теплоемкость полимера;  $m_1$  — масса охлаждаемого полимера в форме;  $\bar{T}_K$  — среднеобъемная температура полимера в форме к концу охлаждения, определяемая по соотношениям (1.11).

Процесс нагревания текущей охлаждающей жидкости — конвективный теплообмен. Расчет конвективного теплообмена производят на основе закона Ньютона. Согласно этому закону количество теплоты  $W_2$  (равное  $W_1$ ), принятое охлаждающей жидкостью, можно определить по соотношению

$$W_2 = \bar{a} (T_{\phi} - T_{\text{ср. х}}) S t_{\text{ц}}, \quad (1.14)$$

где  $\bar{a}$  — коэффициент теплоотдачи;  $T_{\text{ср. х}}$  — средняя температура хладагента;  $T_{\text{ср. х}} = (T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}})/2$ , здесь  $T_{\text{вх}}$  и  $T_{\text{вых}}$  — температура хладагента на входе и выходе из формы;  $S$  — площадь поверхности каналов;  $t_{\text{ц}}$  — продолжительность цикла, определяемая по уравнению (2.17).

Коэффициент теплоотдачи  $\bar{a}$  определяют из критериальных соотношений:

для  $Re < 2 \cdot 10^3$

$$Nu = \bar{a}d/\lambda = 0,15 Re^{0,33} Pr_{\text{ж}}^{0,43} Gr^{0,1} (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25},$$

для  $Re > 10^4$

$$Nu = \bar{a}d/\lambda = 0,021 Re^{0,8} Pr_{\text{ж}}^{0,43} (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25},$$

где  $Re$  — число Рейнольдса,  $Re = Vd/\nu$ ;  $Nu$  — критерий Нуссельта;  $d$  — диаметр канала;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $Pr$  — критерий Прандтля,  $Pr = \nu/a$ ;  $Pr_{\text{ж}}$  — критерий при температуре жидкости,  $Pr_{\text{ст}}$  — критерий при температуре стенки формы;  $Gr$  — критерий Грасгофа,  $Gr = gd^3\beta \Delta T/\nu^2$ ; здесь  $V$  — скорость течения жидкости;  $\nu$  — кинематическая вязкость;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $\beta$  — относительный температурный коэффициент объемного расширения;  $\Delta T = T_{\phi} - T_{\text{ср. х}}$ .

Значения  $\varepsilon_l$  при различных Re и  $l/d$ 

Re	$l/d$								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$2 \cdot 10^3$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,4	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1
$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,1	1,08	1,06	1,03	1,02	1

Коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  зависит от соотношения длины канала к его диаметру  $l/d$ , если  $l/d$  меньше 50, и от кривизны каналов при течении жидкости в изогнутых каналах. Для учета этого вводят поправочные коэффициенты:  $\bar{\alpha}_д = \bar{\alpha}_л \varepsilon_l \varepsilon_r$ . Значения  $\varepsilon_l$  в зависимости от соотношения  $l/d$  приведены в табл. 1.5. Коэффициент  $\varepsilon_r$ , учитывающий изогнутость каналов, можно определить по соотношению  $\varepsilon_r = 1 + 1,77d/r$ , где  $r$  — радиус скругления канала.

Количество теплоты  $W_2$ , отводимое хладагентом, связано с его массой  $m_2$  и определяется с помощью соотношения

$$W_2 = C_x m_2 (T_{вх} - T_{вых}), \quad (1.15)$$

где  $C_x$  — удельная теплоемкость хладагента.

Средний объемный расход хладагента  $Q_x$ , обеспечивающий охлаждение полимера, в зависимости от массы хладагента  $m_2$  можно определить по соотношению

$$\bar{Q}_x = m_2/t_ц = W_2/[C_x (T_{вх} - T_{вых}) t_ц]. \quad (1.16)$$

Соотношения (1.13)—(1.16) позволяют рассчитать охлаждающие каналы формы. По соотношению (1.13) определяют количество теплоты, отдаваемой полимером. Принимая  $W_1 = W_2$  и задавая разность температур  $(T_{вх} - T_{вых})$ , по соотношению (1.16) определяют расход воды или другого теплоносителя. Можно задаваться расходом теплоносителя, тогда определяют разность  $(T_{вх} - T_{вых})$ . Исходя из практического опыта и конструкции формы задают диаметр охлаждающих каналов и определяют скорость течения хладагента. Из критериальных соотношений находят коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}$ . По соотношению (1.14) вычисляют площадь поверхности каналов и по ней рассчитывают их длину и количество.

### 1.3. ПРОЦЕССЫ ПЛАСТИКАЦИИ ПОЛИМЕРОВ В ШНЕКОВЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ УЗЛАХ

**Общие закономерности процесса пластикации.** На стадии пластикации шнек вращается и транспортирует (перемещает) полимер от бункера к соплу. При транспортировке полимер, поступающий из бункера в цилиндр в твердом состоянии, нагревается за счет

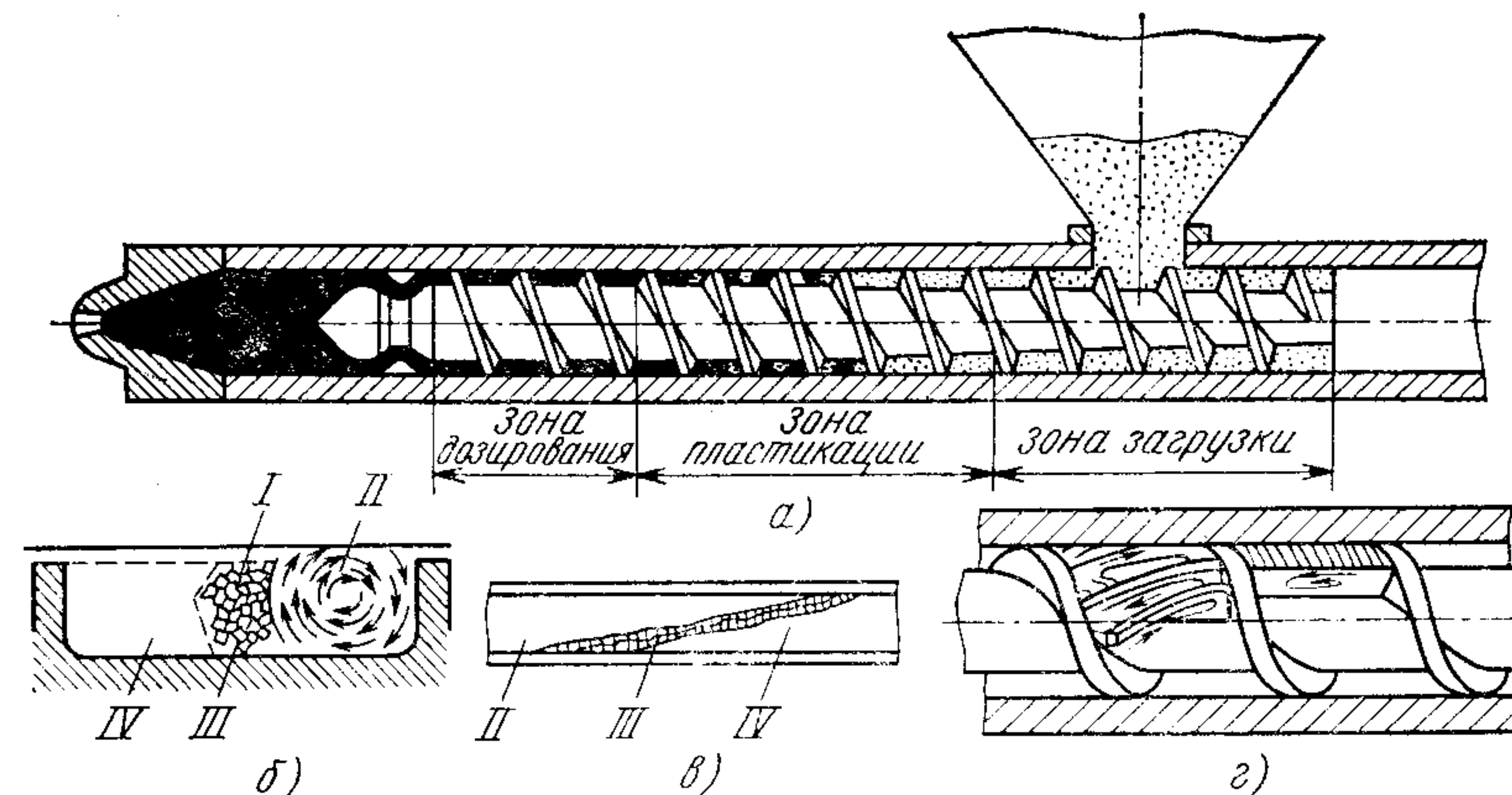


Рис. 1.36. Схемы распределения полимера в шнековом цилиндре

теплоты, выделяемой от внешних нагревателей и при внутреннем трении, расплавляется (переходит в вязкотекучее состояние), перемешивается и равномерно прогревается. По мере перемещения полимера в зону сопла шнек отходит назад. При этом на шнек действует противодействие, препятствующее его перемещению и тем самым обеспечивающее уплотнение полимера. В шнековых инжекционных узлах выполняется главное требование, предъявляемое к стадии пластикации для получения изделий хорошего качества: равномерный прогрев полимера. В шнековых узлах хорошо пластицируются полимеры с различными физико-химическими и технологическими свойствами.

Шнек условно можно разделить на три зоны: загрузки, пластикации и дозирования (рис. 1.36, а), отличающиеся по своему назначению. В зоне загрузки шнек витками захватывает полимер, поступающий из бункера, и транспортирует его вперед. Для обеспечения эффективного перемещения полимера шнеком коэффициент трения полимера о стенки цилиндра должен превышать коэффициент трения полимера о шнек, чтобы исключить проскальзывание полимера относительно цилиндра. На процесс транспортирования полимера и производительность зоны загрузки помимо коэффициентов трения оказывают влияние параметры шнека (диаметр, глубина витка, угол подъема винтовой линии), температуры цилиндра и шнека, а также объемные характеристики перерабатываемого полимера (гранулометрический состав, сыпучесть, насыпная масса). Увеличение диаметра шнека и глубины канала в зоне загрузки повышает производительность этой зоны. Улучшение сыпучести и увеличение насыпной массы полимера также способствуют повышению производительности. Эффективность транспортирования возрастает, если гранулы имеют кубическую и цилиндрическую форму. В зоне загрузки полимер частично перемешивается в результате смещения слоев в винтовом канале шнека.

В зоне пластикации полимер продвигается по цилиндру, нагревается, размягчается, переходит из твердого в вязкотекучее состояние и перемешивается (см. рис. 1.36, а). Полимер нагревается от двух источников теплоты. Первый источник — внешние нагреватели, установленные на корпусе цилиндра. Второй источник — внутренний. Эта внутренняя теплота, выделяющаяся при сдвиговой деформации, которой подвергается полимер в винтовом канале шнека и в зазоре между гребнями шнека и стенкой цилиндра. В зоне пластикации полимер находится в различных физических состояниях: твердом, высокоэластическом и вязкотекучем. Точка начала размягчения полимера в шнеке зависит от давления пластикации (прикладывается к шнеку) и смещается в направлении бункера при увеличении давления.

Полимер начинает расплавляться вблизи стенки цилиндра (зона I, рис. 1.36, б) и около передней толкающей кромки винтовой нарезки шнека (зона II, рис. 1.36, в). В зоне II происходит циркуляционное движение расплавленного полимера. В первых витках шнека, относящихся к зоне пластикации, зона II занимает сравнительно небольшую площадь по сечению канала. В последующих витках зона расплавленного полимера увеличивается. К зоне II примыкает зона III, в которой поверхность гранул оплавляется, они частично расплавляются, уплотняются и слипаются. На границе зон II и III частично расплавившиеся частицы полимера смешиваются с уже расплавившимися и вовлекаются в циркуляционное движение. В зоне IV полимер находится в твердом состоянии (гранулы).

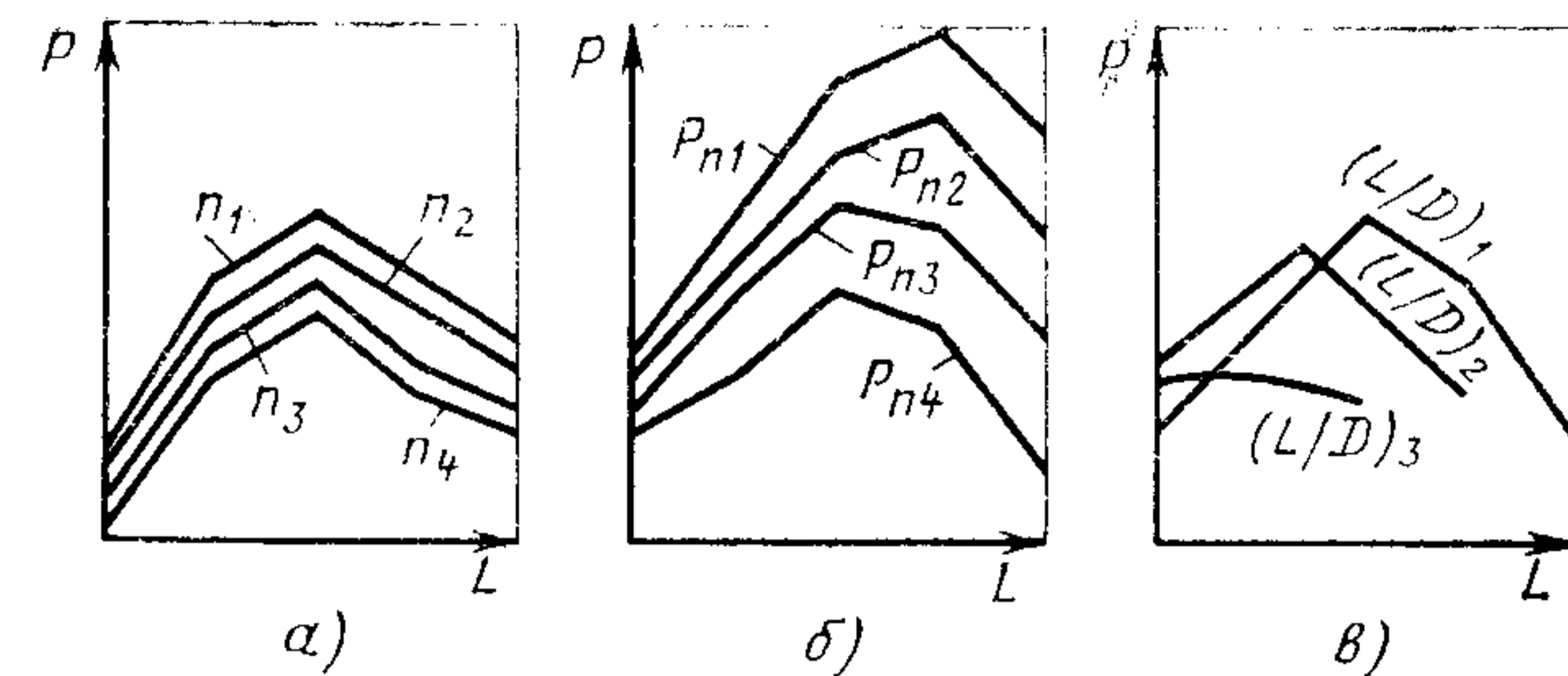
Размягчение полимера сопровождается его уплотнением (сжатием) в межвитковом пространстве. Сжатие достигается изменением параметров шнека на определенном участке: межвитковое пространство уменьшается за счет изменения (уменьшения) глубины канала при постоянном шаге или за счет изменения (уменьшения) шага при постоянной глубине. Поскольку происходит сжатие полимера, воздух, поступающий с гранулами, уходит через зазоры между ними и не проникает в расплав. При пластикации порошкообразного полимера удаление воздуха затруднено.

В зоне дозирования полимер находится в расплавленном (вязкотекучем) состоянии (см. рис. 1.36, а). При правильном режиме пластикации полимер поступает в эту зону только в расплавленном состоянии и не содержит твердых частиц. В этой зоне полимер равномерно прогревается и температура его достигает заданного значения, после чего он поступает в форму (начинается процесс формования). Движение полимера в зоне дозирования очень сложное. Суммарное перемещение полимера складывается из четырех потоков. Вращение шнека относительно неподвижного цилиндра вызывает основной поток, направленный от бункера к соплу. Возникающий по длине шнека перепад давлений вызывает обратный поток в канале шнека, направленный от сопла к бункеру, а также поток утечек между гребнями витка шнека и внутренней стенкой цилиндра. В межвитковом пространстве возникает поперечный поток (циркуляционное движение).

Рис. 1.37. Зависимости давления  $P$  от общей длины  $L$  шнека в зонах пластикации и дозирования (полимер движется справа налево) при изменении:

а — частоты вращения  $n$  шнека ( $n_1 > n_2 > n_3 > n_4$ ); б — давления  $P_{\text{п}}$  пластикации ( $P_{\text{п}1} > P_{\text{п}2} > P_{\text{п}3} > P_{\text{п}4}$ );

в — отношения длины шнека к диаметру [ $(L/D)_1 > (L/D)_2 > (L/D)_3$ ]



Циркуляционное движение полимера в каналах шнека обеспечивает хорошее его перемешивание (на рис. 1.36, г стрелками показано направление движения полимера). В результате интенсивного перемешивания выравнивается температура полимера. В каналах шнека расплав подвергается сдвиговым деформациям, которые сопровождаются выделением теплоты. Сдвиговые деформации при пластикации имеют большое значение, поскольку в существенной мере определяют качество подготовки полимера: температуру, равномерность ее распределения по объему подготовленной порции, качество смешения.

Выделяющаяся при сдвиговой деформации теплота приводит к повышению температуры расплава. Обычно уплотнение полимера создается за счет изменения глубины канала. Но в тех случаях, когда напряжения сдвига могут значительно разогреть нетермостабильный полимер и тем самым вызвать его деструкцию, полимер уплотняют немного, причем за счет изменения шага шнека.

Движение полимера в зоне дозирования достаточно подробно рассмотрено при математическом описании процесса экструзии полимеров в работе [15]. Основные положения этой работы можно использовать для анализа работы пластикаторов литьевых машин.

При пластикации по длине шнека возникает перепад давлений (рис. 1.37). Это обусловлено тем, что в зоне пластикации при приложении давления к шнеку полимер постепенно уплотняется за счет перехода его в расплавленное состояние и уменьшения межвиткового пространства, что приводит к повышению давления по длине шнека до определенного максимума. После прохождения максимума давление снижается по направлению к концу шнека, поскольку уменьшается плотность полимера. Значение максимума и его положение зависят от параметров шнека в процессе пластикации (см. ниже).

Совокупность процессов, проходящих в каждой зоне, определяет производительность пластикатора и качество расплава. Изменением основных параметров процессов и подбором нужной геометрии шнека можно регулировать его производительность и достигать требуемых температур расплава [15].

**Параметры процесса пластикации и их взаимосвязь.** Параметры процесса пластикации можно условно подразделить на две группы:

входные и производные. К входным параметрам относят параметры шнека (длина, диаметр, шаг, глубина канала, угол подъема винтовой линии), частота вращения шнека, температура нагревательного цилиндра, давление пластикации. Рабочая длина шнека уменьшается при перемещении шнека назад в процессе набора порции полимера перед впрыском. К производным параметрам можно отнести температуру полимера, давление по длине шнека, производительность шнекового пластикатора. Производные параметры определяются входными параметрами и взаимосвязаны между собой.

Для выявления взаимосвязи различных параметров процесса пластикации можно использовать закономерности процесса экструзии полимеров [15]. Однако пластикация полимеров на литьевых машинах вследствие периодичности процесса, изменения длины шнека при наборе порции полимера имеет некоторые особенности, которые следует учитывать.

**Температура полимера.** Температура полимера в шнековых инъекционных узлах определяется, во-первых, количеством теплоты, передаваемой от внешних нагревателей через стенки цилиндра к полимеру, и, во-вторых, количеством внутренней теплоты, выделяющейся в полимере при деформации сдвига, которой он подвергается в канале шнека при его вращении.

Количество теплоты, передаваемой полимеру от внешних нагревателей, зависит от устанавливаемой на них температуры, продолжительности пластикации (продолжительности теплообмена). Скорость изменения температуры полимера (нагрева) при определенном тепловом потоке определяется теплофизическим свойством полимера — коэффициентом температуропроводности.

Количество внутренней теплоты зависит от напряжения сдвига, реализуемого при деформировании полимера в канале шнека: количество теплоты увеличивается с увеличением напряжения сдвига. Напряжение сдвига увеличивается с возрастанием скорости вращения шнека, уменьшением глубины канала или шага шнека и увеличением диаметра шнека. Поэтому температура полимера увеличивается при повышении частоты вращения шнека (рис. 1.38, а), уменьшении глубины канала шнека или шага (рис. 1.38, б) и при увеличении диаметра шнека.

Температура полимера при пластикации повышается с увеличением давления пластикации (см. рис. 1.38, б, в). Повышение давления пластикации оказывает тем большее влияние на температуру полимера, чем короче шнек вследствие значительно больших обратных потоков (см. рис. 1.38, в). Поскольку температура полимера повышается с увеличением давления пластикации, то все факторы, вызывающие повышение давления, способствуют увеличению температуры. В частности, температура полимера увеличивается при повышении степени сжатия шнека, равной отношению глубины канала шнека в зоне загрузки к таковой в зоне дозирования.

Качество смешения улучшается, а температура полимера увеличивается при повышении частоты вращения шнека и давления пластикации. Поэтому для достижения равных условий по качеству

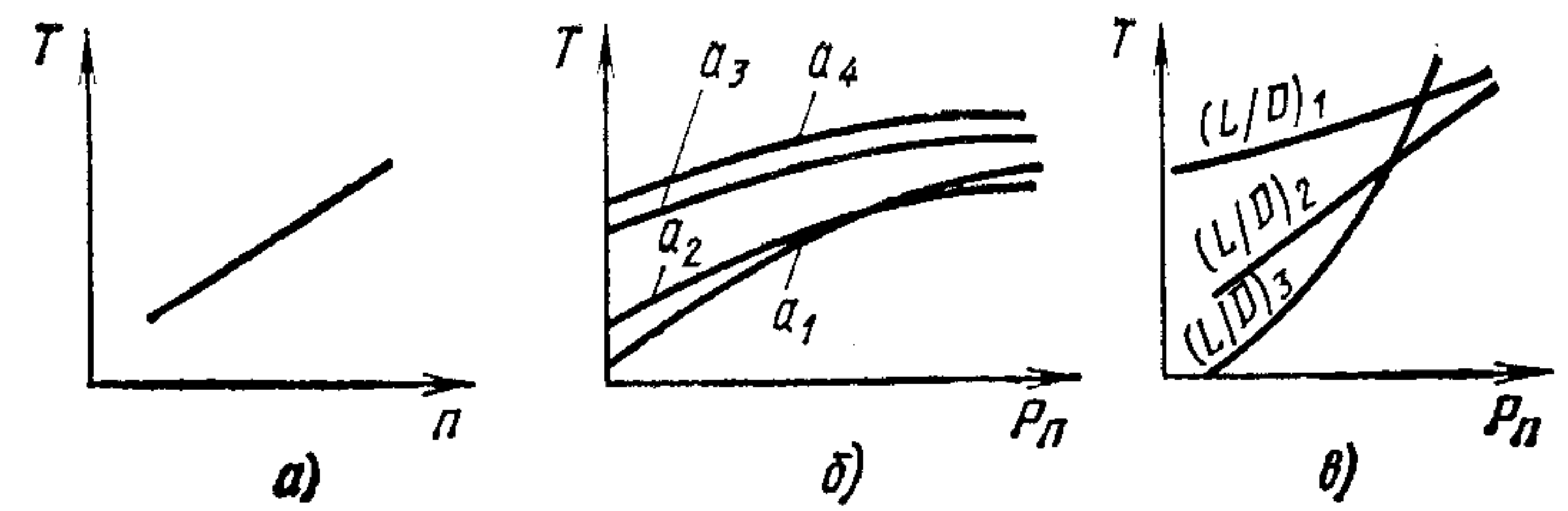


Рис. 1.38. Зависимости температуры  $T$  полимера: а — от частоты вращения шнека  $n$ ; б, в — от давления пластикации  $P_n$  при различных значениях шага  $a$  шнека ( $a_1 > a_2 > a_3 > a_4$ ) и при различных отношениях длины шнека к диаметру  $[(L/D)_1 > (L/D)_2 > (L/D)_3]$

смешения и температуре расплава при пластикации полимера на разных (коротких и длинных) шнеках частота вращения коротких шнеков должна быть больше, а прикладываемое к ним давление пластикации выше.

Температура полимера при прочих равных условиях зависит от длины шнека (см. рис. 1.38, в). Перемещение шнека назад при наборе порции влияет на изменение температуры полимера по длине порции. Так, смещение шнека, равное  $2D$ , при длине шнека  $10D$  приводит к снижению температуры полимера приблизительно на  $23^\circ\text{C}$ . Такое же смещение шнека при его длине  $18D$  приводит к меньшему уменьшению температуры, примерно, на  $18^\circ\text{C}$ . Температура полимера в нагревательном цилиндре зависит от величины давления и характера его распределения по длине шнека.

**Давление по длине шнека.** Максимальное давление и положение максимума по длине шнека зависят от многих параметров. Возрастание частоты вращения шнека способствует уплотнению полимера, поэтому максимальное давление в канале шнека увеличивается (см. рис. 1.37, а). Повышение давления пластикации приводит к лучшему уплотнению полимера и к увеличению максимального давления в канале шнека (см. рис. 1.37, б). При этом положение максимума давления смещается от начала зоны дозирования к бункеру. В цилиндрах с большой длиной шнека полимер лучше уплотняется. Поэтому увеличение длины шнека вызывает повышение максимального давления (см. рис. 1.37, в). Увеличение длины зоны дозирования и уменьшение глубины канала в этой зоне способствуют смещению максимума давления к бункеру.

При пластикации полимеров с высокой вязкостью в диапазоне скоростей сдвига, реализуемых при сдвиговом деформировании в канале шнека, обычно развивается большое давление. Максимальное давление в канале шнека зависит от температурного режима нагревательного цилиндра по зонам. Увеличение температуры цилиндра в зоне дозирования (на выходе) снижает вязкость полимера, что облегчает его течение. В результате этого максимальное давление при прочих равных условиях уменьшается. При пластикации кристаллизующихся полимеров с резко выраженной температурой перехода из твердого в вязкотекучее состояние желательнее увеличивать

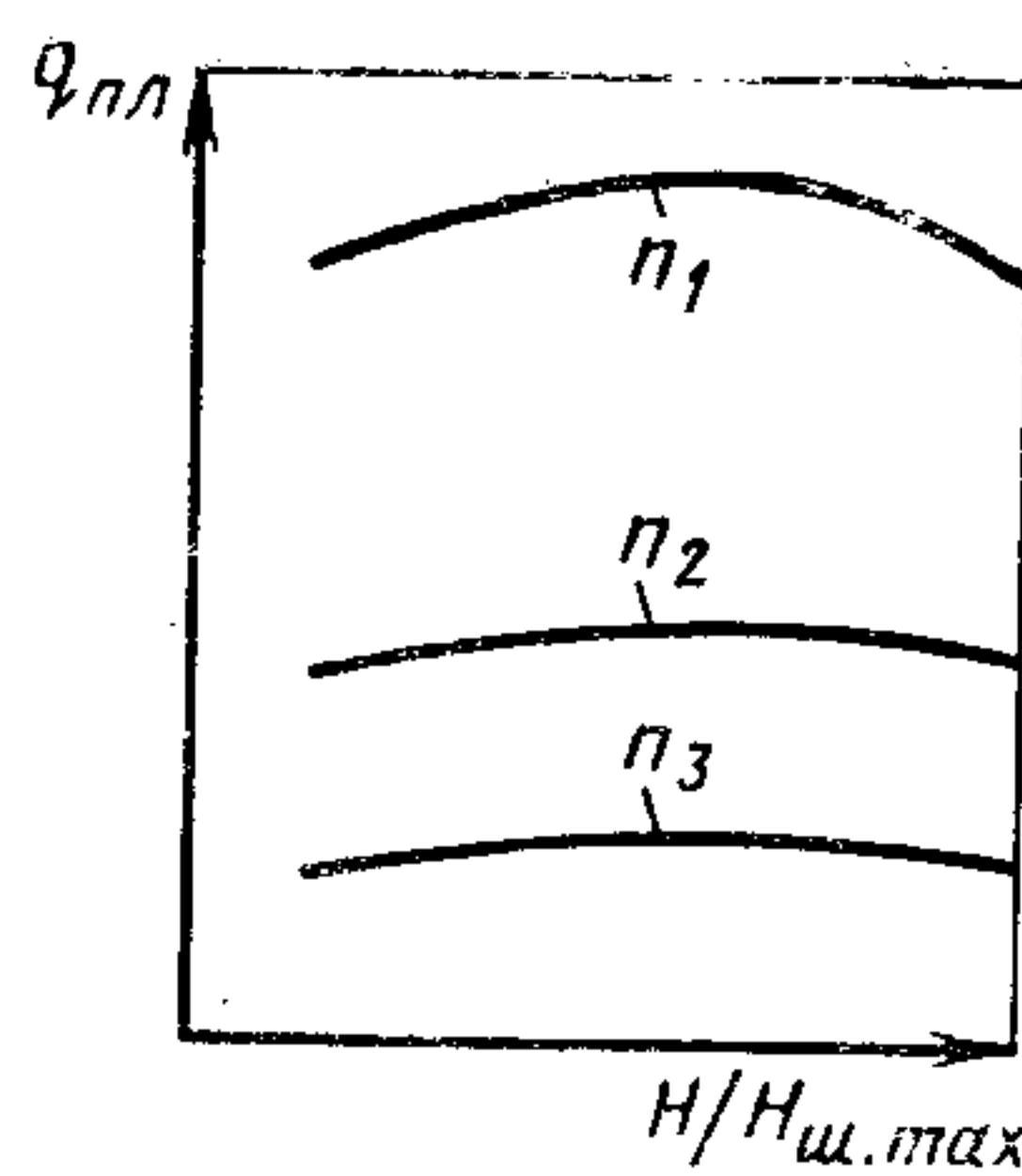
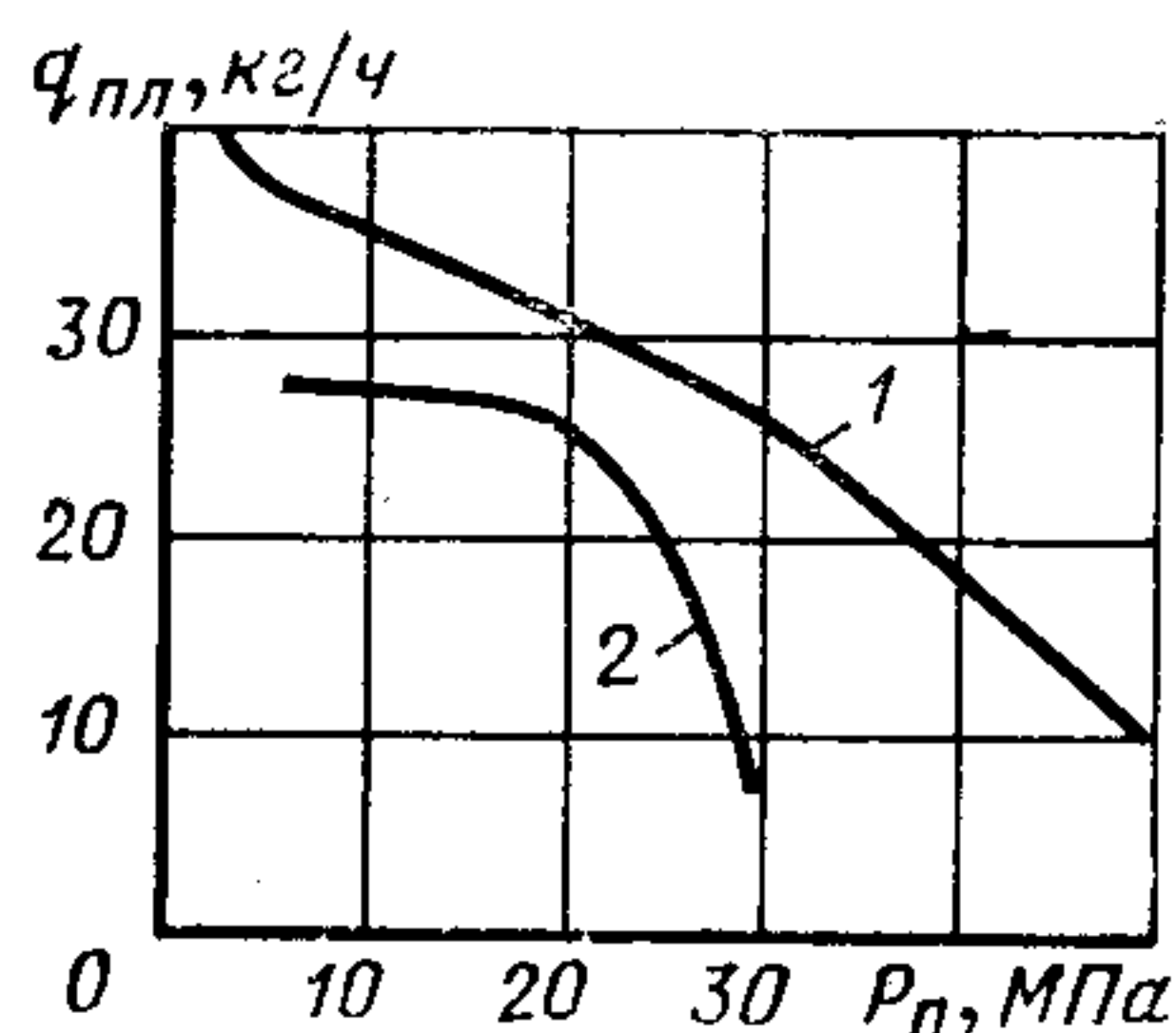


Рис. 1.39. Зависимость производительности  $q_{пл}$  пластикатора от отношения хода шнека к максимальному ходу  $H/H_{ш. max}$  при различной частоте вращения шнека ( $n_1 > n_2 > n_3$ )

Рис. 1.40. Зависимость производительности  $q_{пл}$  пластикатора от давления  $P_{п}$  пластикации:

1 — для полистирола; 2 — для полиэтилена



температуру цилиндра в зоне загрузки (у бункера). Это способствует более быстрому размягчению и уплотнению полимера, что увеличивает давление.

Производительность шнекового пластикатора (цилиндра со шнеком). Она зависит от многих факторов. Увеличение частоты вращения шнека повышает производительность пластикатора (рис. 1.39). Увеличение давления пластикации приводит к снижению производительности (рис. 1.40) потому, что возрастает обратный поток и поток утечек. Влияние изменения давления на производительность увеличивается на шнеках небольшой длины, поскольку на таких шнеках обратный поток составляет существенную часть от основного потока. Однако, чтобы на коротких шнеках добиться равномерного прогревания полимера, давление пластикации необходимо повышать. Влияние давления пластикации на производительность увеличивается при возрастании частоты вращения шнека. Это объясняется тем, что повышается температура полимера и поэтому уменьшается его вязкость. Повышение давления на одно и то же значение приводит к большему увеличению обратного потока, а следовательно, к большему снижению производительности, если текучесть полимера выше. Изменение давления пластикации для различных перерабатываемых полимеров по-разному влияет на производительность (см. рис. 1.40).

Повышение температуры нагревательного цилиндра увеличивает текучесть полимера. Это приводит к увеличению обратного потока и потока утечек, возникающих под действием перепада давлений. В результате этого производительность уменьшается.

Увеличение диаметра шнека способствует повышению его производительности. Глубина канала шнека по-разному влияет на производительность в зависимости от давления пластикации. При малом давлении пластикации увеличение глубины канала шнека приводит к повышению производительности. При высоком давлении шнек с большой глубиной канала может давать меньшую производительность, чем шнек с малой глубиной канала. Это объясняется тем, что при большом давлении пластикации обратный поток значителен, и он еще более возрастает с увеличением глубины канала шнека, что приводит к понижению производительности.

Рабочая длина шнека уменьшается при его перемещении назад в процессе набора порции полимера. При этом производительность шнека изменяется (см. рис. 1.39). Производительность длинных шнеков в меньшей мере зависит от изменения рабочей длины при пластикации, чем производительность коротких шнеков. Так, смещение (ход) шнека, равное  $2D$ , при сравнительно небольшой общей его длине  $10D$  вызывает снижение производительности более чем на 37 %. Такое же смещение шнека ( $\sim 2D$ ) при большей длине шнека  $18D$  вызывает снижение производительности только на 3 %. В первом случае эффективная длина шнека уменьшается на 20 %, а во втором — на 11 %. При возрастании частоты вращения шнека усиливается влияние длины шнека на производительность (см. рис. 1.39).

Усилие, прикладываемое к поршню гидроцилиндра впрыска  $F_{п}$ , передается на полимер у входа в систему сопло — форма, т. е. у входа в сопло  $F_{с}$  с потерями в узлах машины. Эти потери  $\Delta F_{м}$  складываются из потерь усилий в гидроцилиндре впрыска  $\Delta F_{г. ц}$ , в передающем механизме  $\Delta F_{п. м}$  и в инжекционном цилиндре машины  $\Delta F_{и. ц}$ . Поэтому усилие  $F_{с}$ , прикладываемое к полимеру у входа в сопло, равно:

$$F_{с} = F_{п} - \Delta F_{м} = F_{п} - (\Delta F_{г. ц} + \Delta F_{п. м} + \Delta F_{и. ц}). \quad (1.17)$$

В свою очередь, усилие  $F_{п}$ , создаваемое на поршне гидроцилиндра впрыска, меньше расчетного значения  $F_{п. р}$ , определяемого по давлению  $P_{п}$ , развиваемому насосом, вследствие потерь усилия  $\Delta F_{г. с}$  (давления  $\Delta P_{г. с}$ ) в гидросистеме машины. Действительное усилие  $F_{п}$ , прикладываемое к поршню с диаметром  $D_{п}$  гидроцилиндра, равно:

$$F_{п} = F_{п. р} - \Delta F_{г. с} = (P_{п} - \Delta P_{г. с}) \pi D_{п}^2 / 4. \quad (1.18)$$

Потери давления (усилия) в гидросистеме  $\Delta P_{г. с}$  (1.18) и гидроцилиндре  $\Delta F_{г. ц}$  (1.17) можно рассчитать по известным соотношениям. Для промышленных машин потери  $\Delta P_{г. с}$  составляют 1—3 %, а  $\Delta F_{г. ц}$  составляют 0,25—0,5 % максимального давления (усилия) впрыска.

Потери давления в инжекционном цилиндре машины  $\Delta F_{и. ц}$  в значительной мере зависят от его конструкции. В инжекционных цилиндрах с предварительной пластикацией усилие инжекционного шнека передается непосредственно на расплав. Поэтому потери давления в цилиндрах такой конструкции невелики. Потери давления в инжекционном цилиндре со шнековой пластикацией в зависимости от давления и объемной скорости впрыска и температуры полимера изменяются в интервале 1—8 МПа. Суммарные потери давления в инжекционном цилиндре и в передаточном механизме на машинах со шнековой пластикацией при заполнении формы не превышают 5—6 % прикладываемого к поршню гидроцилиндра давления. В период нарастания давления эти потери давления

## ПАРАМЕТРЫ ЛИТЬЕВЫХ МАШИН И ИХ РАСЧЕТ

снижаются и в момент развития максимальных усилий составляют 2—5 % прикладываемого к поршню гидроцилиндра давления. Эти значения можно использовать для расчета давления формования на подобных машинах. Потери давления в инжекционных цилиндрах без предварительной пластикации, в которых полимер перемещается поршнем, гораздо выше (см. п. 1.3.2).

Отличительная особенность машин со шнековой пластикацией та, что потери давления в инжекционном цилиндре на перемещение шнека при впрыске полимера в форму и в течение периода выдержки его под давлением небольшие и мало зависят от технологических параметров литья (температуры полимера, прикладываемого усилия, продолжительности прогрева полимера в цилиндре). Поэтому на одних и тех же машинах со шнековой пластикацией потери давления в цилиндре практически одинаковы в различных циклах литья и сохраняются постоянными в течение выдержки под давлением после развития в системе максимальных усилий, что обеспечивает постоянство давления на входе в форму в течение этого периода (см. линию 1 на рис. 1.24). Это обстоятельство является важным технологическим преимуществом машин со шнековой пластикацией и упрощает подбор технологического режима литья, а также позволяет легко и точно регулировать давление на входе в форму, изменяя давление в гидроприводе.

В настоящее время в СССР и за рубежом большинство литьевых машин разрабатывают с универсальными параметрами для обеспечения возможности переработки различных пластмасс в изделия разной конфигурации и размеров.

Машина с наиболее высокими технико-экономическими показателями может быть создана только при сочетании прогрессивной конструкции с оптимальными параметрами [10].

Наряду с универсальными машинами создают машины специального назначения. Параметры этих машин определяются конкретными требованиями потребителей.

### 2.1. ПАРАМЕТРЫ ЛИТЬЕВЫХ МАШИН

Сопоставительный анализ машин различных стран и фирм, выпущенных за период с 50-х годов по настоящее время, позволяет установить общие тенденции в изменении параметров машин за этот период и показывает, что значения отдельных параметров принимаются на основе как аналогий, так и рекламных и интуитивных соображений. В силу этого параметры различных машин даже с одинаковыми номинальными объемами впрыска за цикл (объемами отливок) отличаются. Поэтому простого сопоставления параметров машин для выявления тенденций развития машин недостаточно, а требуется теория расчета параметров.

В основе создания литьевых машин универсального назначения с оптимальными параметрами должен лежать параметрический анализ, базирующийся на системном подходе. Этот анализ позволяет выявить всю совокупность параметров, определяющих целевое назначение литьевой машины и всех составляющих ее подсистем, а также установить их взаимосвязь и значимость.

Количественные значения параметров литьевых машин разрабатывают на основе изучения возможного ассортимента изделий, предполагаемых к изготовлению на машине с данным номинальным объемом отливки; изучения особенностей процессов литья и применения их математического описания для расчета параметров с учетом полного комплекса технологических свойств полимеров,

выявления влияния процессов на параметры; выявления диапазона изменения технологических параметров.

**Классификация подсистем литейных машин.** Общие принципы параметрического анализа. При анализе объекта — первой стадии параметрического анализа — подробно формируют целевое назначение объекта и требования к нему. Они вытекают из условий реализации технико-экономического уровня развития производства на данном этапе.

В число задач качественного анализа объекта входит также установление подсистем, которые составляют объект, выявление элементов подсистем. При этом выявляется структура объекта. После этого устанавливается целевое назначение подсистем и выделенных элементов.

На второй стадии анализа определяют числовые характеристики подсистем. Эти характеристики являются параметрами подсистем и элементов. На этой стадии анализа изучают также внутренние свойства подсистем, их взаимосвязь и выявляют структуру этих взаимосвязей. Исследование структуры объекта и его подсистем позволяет установить иерархическую связь подсистем в достижении целевого назначения и, следовательно, степень значимости их, а также выявить модели, определяющие взаимосвязи внутри подсистемы и между подсистемами. На второй стадии анализа также выявляют основные закономерности, определяющие существование подсистем, и устанавливают необходимые объем и степень точности информации для оптимизации подсистем с учетом ограничений, обусловленных внешними связями.

Подобный параметрический анализ позволяет достаточно полно охарактеризовать объект, сформулировать требования к объекту в целом, требования к его составным частям и выявить систему параметров (характеристик), его определяющих. Преимущество такого анализа заключается в том, что на самой ранней стадии удается сформулировать уровень требований к объекту, их обоснование и обеспечивается гарантия достижения этих требований в результате формулирования соответствующих параметров в пределах установленных их числовых значений. Основной смысл анализа в том, что требуемые признаки закрепляются через числовые характеристики. Тем самым закладывается обоснованная возможность нормализовать признаки на ранней стадии создания объектов как по перечню параметров, так и по численному их значению.

Выявленная совокупность параметров включает все числовые характеристики, определяющие целевые признаки объекта, а также все числовые характеристики, определяющие целевое назначение всех подсистем и элементов, включенных в объект. Это позволяет составить достаточно полную систему параметров, пригодную для последующей оценки значимости установленных параметров.

Для создания объекта, удовлетворяющего данному целевому назначению, на стадии параметрического анализа не обязательно стремиться вскрыть все параметры, фактически заложенные в объекте. Отсутствие в системе какого-либо параметра проявляется при

анализе объекта по соответствующему признаку (выявляется при исследовании структуры). При этом общим условием обнаружения отсутствия параметра является невозможность воздействия на объект (т. е. невозможность его регулирования) для достижения результата по данному признаку при выполнении общего целевого назначения объекта. Поэтому система параметров, характеризующих объект, как правило, является не полной, поскольку система  $x_1 \dots x_n$  всегда может быть дополнена параметрами  $x_{kt_1} \dots x_{kt_n}$ . Это указывает, в частности, на возможность создания объекта по заданному его целевому назначению в условиях отсутствия полных данных для его разработки.

Степень значимости параметра определяется степенью значимости подсистемы, которую он определяет в реализации целевого назначения объекта. Однако, поскольку каждая подсистема характеризуется также большим числом своих подсистем и параметров, которые не обязательно должны быть существенны для объекта в целом, степень их значимости определяется влиянием параметра на характеристики всего объекта.

**Литейная машина — объект параметрического анализа.** Целевое назначение литейной машины — разогреть полимер до требуемой температуры, переместить его в замкнутый объем охлаждаемой формы, отформовать изделие и извлечь его из формы (табл. 2.1). Целевое назначение может быть усложнено и сформулировано через дополнительные требования по точности процесса, степени его управления (автоматическое управление разной степени сложности, числовое программное управление, управление с применением ЭВМ), через дополнительные требования к качеству литейной продукции (размерная точность, определенные эксплуатационные показатели, структура изделий и пр.). Эти требования определяют задачи подсистем, составляющих литейную машину. В свою очередь, они вытекают из условий реализации технико-экономического уровня развития отраслей промышленности (приборостроение, машиностроение, автомобилестроение, медицинская промышленность и пр.), потребляющих полимерные изделия.

Литейную машину как объект можно подразделить на следующие подсистемы: технологические, в узлах которых непосредственно протекают литейные процессы (инжекционная, прессовая), привод и управление (рис. 2.1).

Подсистемы литейной машины и их параметры. Каждая подсистема литейной машины имеет определенное целевое назначение (см. табл. 2.1). Анализ целевых назначений каждой подсистемы позволяет установить систему параметров машины. Рис. 2.1 иллюстрирует метод подразделения литейной машины на подсистемы. Детализация признаков может проводиться по приведенной схеме до простейших элементов.

По приводу основные параметры можно сформулировать посредством параметров инжекционного и прессового узлов (расход жидкости для обеспечения объемной скорости впрыска, частоты вращения

## Общая форма анализа объекта

Объект и подсистемы	Целевое назначение (параметры)
Литьевая машина — объект	Подготовить (разогреть) полимер в течение требуемого времени до заданной температуры, переместить требуемое количество расплава за заданное время в литьевую форму заданных размеров, отформовать изделие заданных размеров при определенном режиме, обеспечивающем требуемые показатели его качества, извлечь изделие из формы
Инжекционный узел — подсистема	Подготовить заданное количество полимера $v$ в течение требуемого времени до заданной температуры (температура инжекционного цилиндра $T_{и.ц}$ , пластикационная способность $q_{пл}$ ), переместить требуемое количество расплава за заданное время при определенном режиме заполнения формы (объемная скорость впрыска $Q_{впр}$ и режимы ее изменения, диаметр $D$ и ход $H_{ш}$ шнека, давление пластикации $P_{пл}$ и режимы его изменения); отформовать изделие при заданных величинах давления и его распределения по длине формы, которые в зависимости от режима формования могут регулироваться по заданной программе в течение периода выдержки полимера в форме под внешним давлением (давление литья $P_{л}$ , режимы создания давления)
Прессовый узел — подсистема	Обеспечить возможность формования изделий заданных размеров (площадь литья $S$ , максимальное расстояние между плитами $H_{пл}$ , ход подвижной плиты $H_x$ , регулировка расстояния между плитами $h_p$ ); переместить подвижную плиту за требуемое время (быстроходность $B$ ); удерживать форму в закрытом состоянии и раскрыть форму (усилие запирания формы $F$ и усилие раскрытия формы $F_p$ ); обеспечить заданную размерную точность изделий (жесткость механизма $C$ )
Привод — подсистема	Механизировать основные технологические и вспомогательные операции, обеспечить требуемые скорости перемещения узлов, требуемые давления формования, запирания и раскрытия формы, различные режимы литья
Управление — подсистема	Обеспечить выполнение в требуемой последовательности технологического процесса (при заданных технологических условиях и с достижением заданной точности операций), а также различные режимы литья, стабилизировать и оптимизировать параметры процесса

шнека, скорости перемещения формовочной плиты и др.); давление наряду с расходом жидкости определяет мощность привода и т. д. В подсистеме привода можно сформулировать свои дополнительные требования к температуре рабочей среды, рабочему давлению и др. Система управления имеет параметры, определяющие точность выполнения команд и технологическую оснащенность системы, а также ее информационно-логический уровень.

Численные характеристики параметров определяют на основе анализа размеров характерного ассортимента изделий, предполагаемых к изготовлению на литьевой машине, т. е. внешних факторов по отношению к машине. Такие параметры называют входными. Другую группу параметров (производных) определяют расчетными

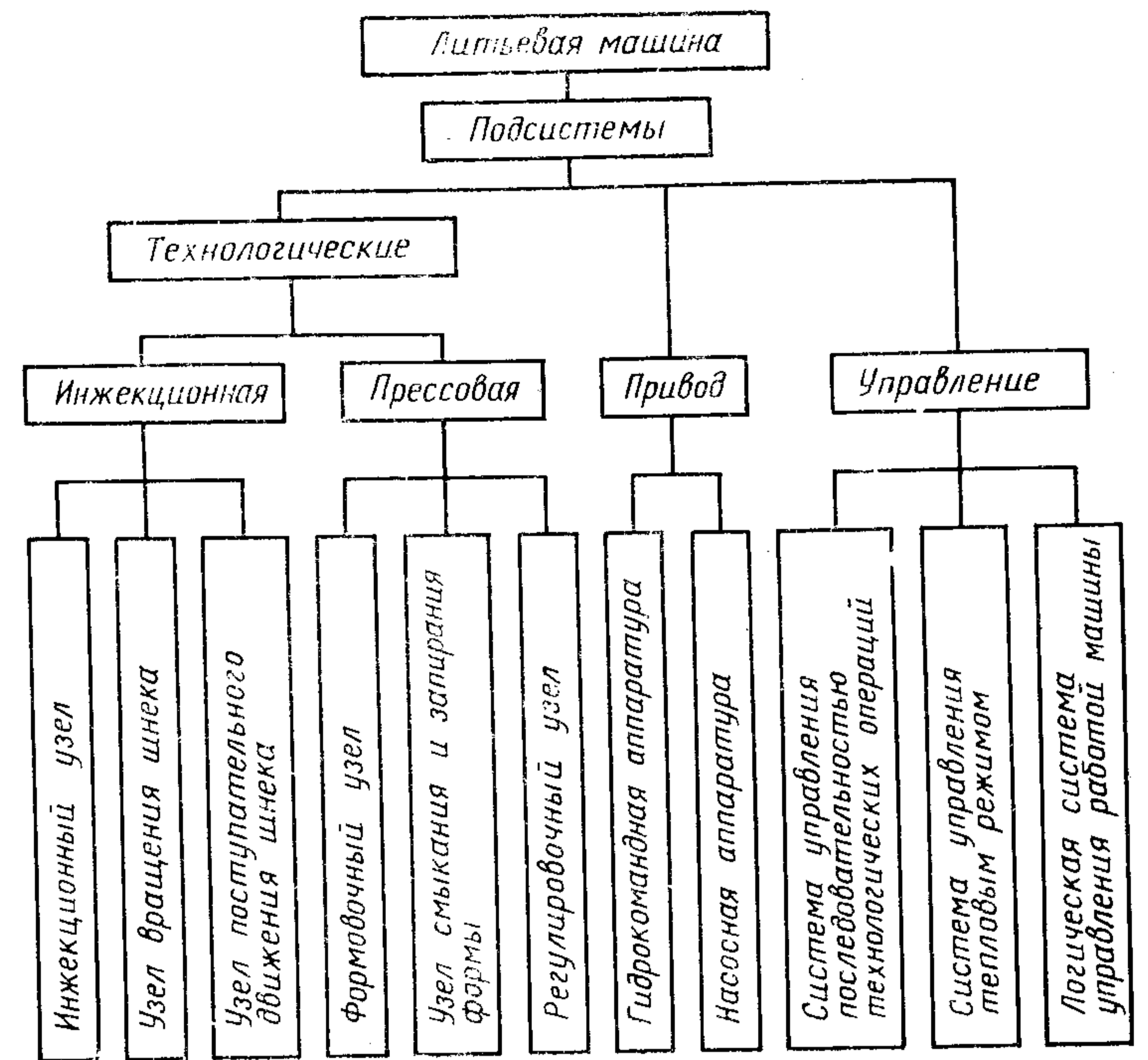


Рис. 2.1. Схема подсистем литьевой машины

методами, вытекающими из математического описания литьевых процессов (см. п. 2.2).

**Основные параметры литьевых машин.** Основными параметрами (см. табл. 2.1), которые оказывают наиболее сильное влияние на конструкцию и технико-экономические характеристики машин и которые необходимы для разработки универсальной и специальной конструкций литьевых машин, являются: объем впрыска за цикл (объем отливки)  $v$ , объемная скорость впрыска  $Q_{впр}$  (время впрыска  $t_{впр}$ ), давление литья  $P_{л}$ , площадь литья  $S$ , усилия запирания и раскрытия формы  $F$  и  $F_p$ , ход подвижной плиты  $H_x$ , максимальное расстояние между плитами  $H_{пл}$ , жесткость, быстроходность  $B$ , пластикационная способность  $q_{пл}$  и диапазон температур инжекционного цилиндра ( $T_{и.ц\max}$ — $T_{и.ц\min}$ ).

Объем впрыска за цикл  $v$ . В настоящее время выпускают литьевые машины с объемом впрыска за один цикл 0,1—200 000 см<sup>3</sup>. Несмотря на то что сотни различных по типоразмерам литьевых машин выпускаются большим количеством изготовителей, трудно установить предпочтительный объем впрыска за цикл. Так, различные изготовители выпускают литьевые машины с разными объемами впрыска за цикл (6—6000 см<sup>3</sup>), например: 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 100 см<sup>3</sup> и т. д. Каждый изготовитель производит литьевые машины нескольких типоразмеров, отличающихся между собой



объемом впрыска за цикл (ряд машин). Для различных рядов машин отношение объема впрыска за цикл последующей машины к объему впрыска за цикл предыдущей (коэффициент  $\varphi$ ) может иметь различные значения. Для большинства фирм коэффициент  $\varphi$  составляет 1,5—3 и иногда не выдерживается постоянным даже в пределах одного ряда.

Для отечественных литевых машин принят коэффициент  $\varphi$ , равный 2. Машины имеют следующие номинальные объемы впрыска за цикл: 8, 16, 32, 63, 125, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 см<sup>3</sup>. В этой главе для примера анализ параметров проведен применительно к существующему в Советском Союзе ряду литевых машин с объемом впрыска за цикл до 1000 см<sup>3</sup>.

**Объемная скорость впрыска.** Параметр определяет скорость, с которой полимер заполняет форму, а следовательно, гидродинамику (потери давления) и термодинамику (величину охлажденного слоя, образующегося при заполнении полимером формы, понижение температуры текущего полимера) литевого процесса. От объемной скорости впрыска существенно зависит структура изделий, образующаяся при формовании. Этот параметр влияет также на механодеструкцию полимера, протекающую при заполнении формы. В связи с этим объемная скорость впрыска должна быть такой, чтобы: 1) для заполнения литниковой системы и формы требовались сравнительно небольшое давление литья (для этого скорость впрыска не должна быть, с одной стороны, слишком большой, чтобы при заполнении не возникали большие напряжения сдвига и, следовательно, большие потери давления, и, с другой стороны, слишком малой, чтобы при заполнении не образовался большой охлажденный слой полимера и значительно понизилась температура текущего расплава, так как в противном случае возникают большие потери давления), причем форма должна заполняться с постоянной объемной скоростью течения; 2) формировалась структура изделий, обеспечивающая их хорошие эксплуатационные показатели; 3) не произошла существенная механодеструкция полимера.

Объемная скорость впрыска определяется временем впрыска полимера в форму, поэтому в характеристике машины часто задают время впрыска. Машины с временем впрыска 0,5—3 с (верхний предел относится к машинам с объемом впрыска за цикл более 500 см<sup>3</sup>) обладают удовлетворительными технологическими показателями. Средние значения времени впрыска для некоторых зарубежных машин с разными объемами впрыска за цикл приведены ниже.

Объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6, \text{ м}^3$	8	16	32	63
Время впрыска $t_{\text{впр}}, \text{ с}$	0,4—0,5	0,4—0,5	0,4—1,2	0,5—1,3
Объемная скорость впрыска $Q_{\text{впр}} \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$	16—20	32—40	25—80	50—125
Давление литья $P_{\text{л}}, \text{ МПа}$	45—90	45—90	50—120	50—120
Площадь литья $S \cdot 10^4, \text{ м}^2$	32	60	90—120	125—200
Усилие запирания $F, \text{ кН}$	60—80	100—150	120—350	300—800
Ход подвижной плиты $H_{\text{х}} \cdot 10^3, \text{ м}$	—	100—250	170—200	120—250

Максимальное расстояние между плитами $H_{\text{пл}} \cdot 10^3, \text{ м}$	—	230—270	260—360	250—470
Высота формы $H_{\text{ф}} \cdot 10^3, \text{ м}$ :				
максимальная	—	150	250	250
минимальная		80	100	120
Объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6, \text{ м}^3$	125	250	500	1000
Время впрыска $t_{\text{впр}}, \text{ с}$	0,8—1,5	0,8—1,8	1—2	1,5—2,5
Объемная скорость впрыска $Q_{\text{впр}} \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$	80—150	130—300	250—500	400—700
Давление литья $P_{\text{л}}, \text{ МПа}$	60—140	60—140	60—180	60—180
Площадь литья $S \cdot 10^4, \text{ м}^2$	250—400	450—700	1000—1300	1500—1800
Усилие запирания $F, \text{ кН}$	750—1800	1300—2300	2000—3500	3000—5000
Ход подвижной плиты $H_{\text{х}} \cdot 10^3, \text{ м}$	250—400	350—500	400—600	500—800
Максимальное расстояние между плитами $H_{\text{пл}} \cdot 10^3, \text{ м}$	400—500	430—580	500—900	820—1050
Высота формы $H_{\text{ф}} \cdot 10^3, \text{ м}$ :				
максимальная	300	400	500	600
минимальная	160	200	250	300

Примечание. Параметры даны применительно к существующим в СССР машинам с объемами отливок 8, 16, 32, 63, 125, 250, 500, 1000 см<sup>3</sup>.

Для изготовления тонкостенных изделий (толщиной 0,2—1 мм) требуются высокие скорости впрыска (время впрыска до 1 с).

Регулирование объемной скорости впрыска от номинального до минимально возможного значения осуществляется изменением расхода рабочей жидкости в гидросистеме.

На технико-экономические показатели машины и особенно на ее технические возможности существенно влияет конструкция привода инжекционного поршня. В свою очередь, конструкция привода инжекционного поршня зависит от заданной объемной скорости впрыска. Объемная скорость впрыска — основной фактор, определяющий энергоемкость машины.

**Давление литья.** Давление литья, необходимое для заполнения литниковой системы и формы, устанавливают в гидроприводе литевой машины. Его значение определяют в каждом конкретном случае, учитывая конструкцию формы, свойства перерабатываемого полимера, параметры переработки (см. п. 2.2). Давление литья влияет на качество изделий.

Давление, необходимое для заполнения формы, зависит от времени впрыска. Высокие давления впрыска требуются при литье тонкостенных изделий из полимеров большой вязкости. Вместе с тем давление формования (при выдержке полимера в форме под внешним давлением), при котором получают изделия хорошего качества, в большинстве случаев невелико. Для многих полимеров оно составляет 25—50 МПа.

Параметром машины служит максимальное давление, необходимое главным образом для заполнения формы. На современных машинах устанавливают давление 60—200 МПа. Давление литья для машин с разными объемами впрыска за цикл приведено выше.

Существенные различия в давлениях литья на современных литевых машинах определяются многообразием используемых конструкций форм и различием в свойствах перерабатываемых поли-

меров. Для переработки большинства полимеров на машинах с предварительной пластикацией достаточно давление до 100 МПа, для переработки высоковязких полимеров в тонкостенные детали, а также для формования реактопластов необходимо давление 120—200 МПа.

**Площадь литья.** Ею называют проекцию поверхности детали на плоскость формы. Для большого числа получаемых деталей на машине с определенным номинальным объемом впрыска за цикл можно установить пределы площадей литья для широкого класса деталей данного объема.

Площадь литья определяется ассортиментом деталей данного объема и является одним из основных параметров литьевой машины. Этот параметр оказывает влияние на усилие, необходимое для запираания форм, на габаритные размеры плит, на которые устанавливаются формы, и, следовательно, на технико-экономические показатели машины.

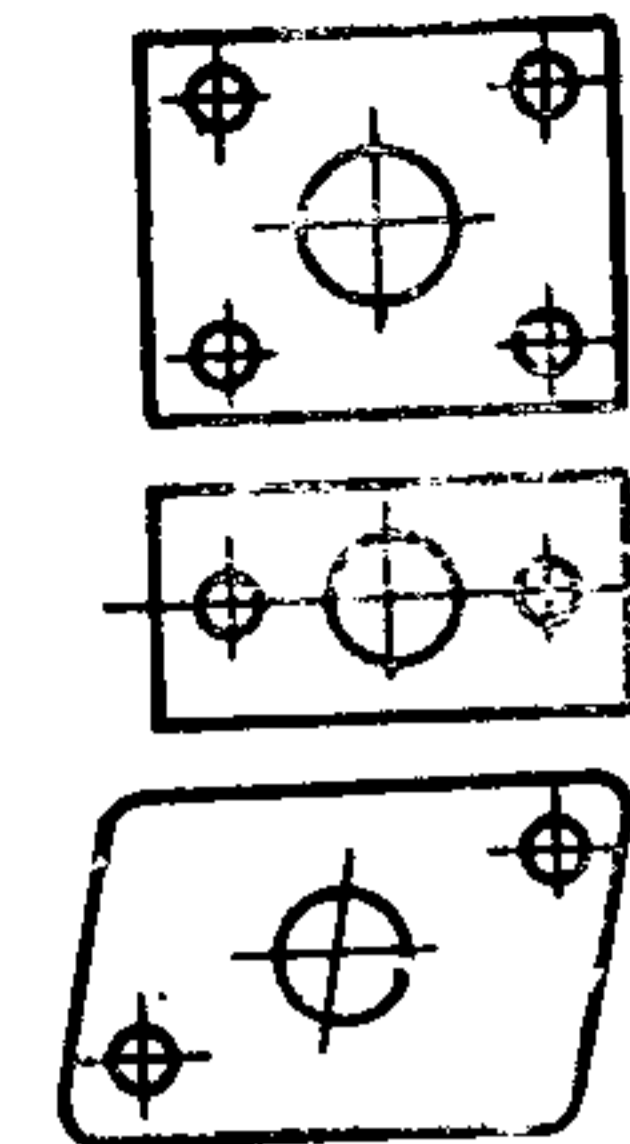
Увеличение площади литья повышает универсальность проектируемой машины, но ухудшает ее технико-экономические показатели. Ориентировочные значения площади литья для машин с разными объемами впрыска за цикл приведены выше.

Площадь литья определяет размеры плит, которые оказывают заметное влияние на массу машины. Масса плит зависит от их конструкции (литые, сварные и т. д.), расположения и конструкции крепежных отверстий, размеров центрирующих отверстий.

Формы закрепляют на плитах с помощью резьбовых отверстий или продольных пазов, различным образом расположенных на плитах. Пазы создают большие удобства для закрепления форм и, кроме того, уменьшают размеры плит. Однако при наличии пазов увеличивается толщина плит приблизительно на 40—50 мм и повышается их масса, особенно на крупных машинах. Поэтому на больших машинах целесообразнее для крепления форм предусматривать резьбовые соединения, а плиты выполнять сварными. Наилучшее решение — совмещение пазов и резьбовых отверстий в плитах небольших машин; при этом отверстия выполняют в центральной части плиты, а пазы — на периферии. При таком расположении крепежных приспособлений можно полнее использовать площадь плиты и вместе с тем сделать плиту более жесткой. Расположение крепежных отверстий, пазов и размеры центрирующих отверстий должны быть такими, чтобы была возможность перестановки форм на различные машины. Расположение колонн определяет способ установки форм и возможность более полного использования площади плит.

Конструкции прессовых узлов литьевых машин отличаются по числу и расположению колонн. На машинах с небольшим объемом впрыска за цикл прессовые узлы имеют обычно две колонны, расположенные по горизонтали или по диагонали (рис. 2.2). Установка литьевых форм и обслуживание машины в этом случае облегчаются. На машинах с усилием запираания 500 кН и более прессовые узлы имеют обычно четыре колонны. На машинах с усилием запираания 500 кН расстояние по горизонтали между колоннами в большинстве

Рис. 2.2. Схемы расположения отверстий в плитах для установки колонн



случаев больше расстояния по вертикали. На машинах с усилием запираания 1000 кН и более устанавливают плиты с различными соотношениями этих расстояний. На плиты, у которых горизонтальное расстояние больше вертикального, формы удобнее устанавливать сверху. Установка форм на такие плиты облегчается также при механизации работ с помощью подъемно-транспортного оборудования (особенно на крупных машинах, где масса формы составляет 1,5—10 т и более).

На современных машинах с номинальным объемом впрыска за цикл до 1000 см<sup>3</sup> соотношение между площадью литья и площадью плиты между колоннами (рабочей площадью) составляет в среднем 30—60 %. Отношение полезной площади (площади литья) к общей площади плит колеблется от 12 до 25 %. Более устойчиво отношение площади плит между колоннами к общей площади плит; оно составляет в среднем 35—40 %.

Горизонтальное расстояние между колоннами влияет на ширину плит, которая определяет первоначальные размеры станины. Ширину станины увеличивают с учетом размеров устанавливаемой в ней гидро- и электроаппаратуры. На ширину машины (габаритный размер) влияют конструкция ограждения, компоновка электрошкафа и ряд других конструктивных элементов.

**Усилие запираания формы.** Усилие, необходимое для запираания формы, определяется площадью литья и распределением давления в форме в процессе ее заполнения или выдержки полимера под давлением. Это усилие должно быть равным усилию, возникающему в форме при литье, или превышать его. Несоблюдение этого условия приводит к тому, что форма раскрывается, образуется облой и размеры изделий изменяются, а это особенно недопустимо при изготовлении изделий с повышенной точностью.

При увеличении площади литья возникает необходимость в повышении усилия, требуемого для запираания формы. Необходимое усилие запираания формы зависит от технологии литья, технологических свойств полимера и многих других факторов процесса литья. При работе на машинах с небольшим усилием запираания можно получать детали высокого качества только при наличии специальных режимов (со сбросом давления) и при высокой культуре производства. Средние значения усилия запираания формы для машин с разными объемами впрыска за цикл приведены выше (см. с. 94). Усилие запираания формы определяет конструкцию прессового узла машины.

**Расстояние между плитами и ход подвижной плиты.** Расстояние между плитами и ход подвижной плиты зависят от ассортимента отливаемых изделий. Максимальное расстояние между плитами и ход подвижной плиты определяют макси-

мальную высоту формы и, следовательно, высоту изделия, которую можно получить на данной машине.

Расстояние между плитами можно регулировать. Величина возможного регулирования этого расстояния определяет допустимую высоту устанавливаемых форм. Расстояние между плитами можно регулировать в широких пределах, которые выбираются для каждой машины. При оптимальных значениях предела регулирования снижается масса формы, облегчается ее эксплуатация, отпадает необходимость в использовании специальных проставок в формах и т. д. При завышении значений предела регулирования ухудшаются технико-экономические показатели, а при занижении — снижается универсальность литейной машины.

Ход подвижной плиты и максимальное расстояние между плитами связаны между собой; от их значения в определенной степени зависит конструкция машины. Например, ход влияет на длину рычагов и условия их работы в гидромеханических конструкциях прессовых частей узлов; от хода зависят длина гидроцилиндра, размеры некоторых вспомогательных механизмов. Для регулирования расстояния между плитами можно использовать различные механизмы (см. п. 3.8). Выбор конструкции этих механизмов зависит от этого расстояния. Средние значения хода подвижной плиты, максимального расстояния между плитами, а также максимальной и минимальной высоты формы приведены выше (см. с. 94).

**Пластикационная способность.** Под пластикационной способностью понимают производительность, которую может обеспечить инжекционный цилиндр по расплавленному полимеру. Расчетная пластикационная способность  $q_{пл}$  (кг/ч) машины с учетом подготовки нужной массы полимера  $m$  за время пластикации  $t_{пл}$  определяется выражением

$$q_{пл} = 3600m/t_{пл}. \quad (2.1)$$

Задаваемая продолжительность пластикации в реальном процессе ниже расчетной и зависит от продолжительности технологического времени (времени охлаждения детали до заданной температуры), которая, в свою очередь, зависит от теплофизических свойств перерабатываемого полимера, толщины изделия, режима переработки. Поэтому фактическая пластикационная способность машины — величина достаточно условная и переменная. В технической документации и каталогах на литейные машины обычно приводят пластикационную способность по полистиролу при максимальной частоте вращения шнека (см. приложение 1) и температуре инжекционного цилиндра 190—220 °С.

Под производительностью литейных машин  $q_m$  понимают количество полимера, переработанного в изделия за единицу времени. На производительность влияют длительность цикла литья, эффективный фонд времени работы машины и объем впрыска за цикл.

**Быстроходность.** Быстроходность машины определяется количеством холостых циклов в единицу времени (за 1 ч):

$$B = 3600/t_m, \quad (2.2)$$

где  $t_m$  — машинное время;

$$t_m = t_{см} + t_{впр} + t_{разм}, \quad (2.3)$$

здесь  $t_{см}$ ,  $t_{разм}$  — время смыкания и размыкания формы.

## 2.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЛИТЬЕВЫХ МАШИН, КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ ПАРАМЕТРОВ

**Общие принципы определения параметров литейных машин.** Определение параметров литейных машин включает три этапа: 1) формирование входных параметров (например, объем впрыска за цикл  $v$ , площадь литья  $S$ , высота  $H$  и толщина  $h$  изделий); 2) расчет производных параметров (например, время впрыска  $t_{впр}$ , давление литья  $P_{л}$ , усилие запирания формы  $F$ , ход подвижной плиты  $H_x$ , максимальное расстояние между плитами  $H_{пл}$ , жесткость, быстроходность  $B$ , пластикационная способность  $q_{пл}$ ); 3) оптимизация параметров.

При расчете параметров литейной машины существенное значение имеют входные параметры, т. е. параметры литейной продукции, которые численно формализуют целевое назначение объекта. Входные параметры указывают на характер внешнего воздействия на объект в период его создания. В качестве входных параметров для литейных машин принимают параметры изготавливаемых изделий  $v$ ,  $S$ ,  $h$ ,  $H$  (рис. 2.3). Численные значения параметров устанавливают на основе выявления ассортимента изделий, предполагаемых к изготовлению на данной машине, и анализа их размеров.

Размеры изделий характерного ассортимента для всего ряда литейных машин непрерывно изменяются при переходе от одного типоразмера машин к другому. Но для каждого типоразмера машин можно выделить предпочтительный ассортимент изделий и установить граничные условия, определяющие интервалы, в которых могут изменяться входные параметры. Анализ входных параметров показывает, что можно установить критериальные соотношения между отдельными входными параметрами для машины одного типоразмера и критериальные соотношения между одноименными входными параметрами для различных по типоразмерам машин внутри одного ряда.

Определение производного параметра (единичного) машины состоит в выявлении факторов, влияющих на данный параметр, в установлении функциональной зависимости параметра от этих факторов, в расчете числового значения параметра при заданных входных параметрах и ограничивающих условиях.

Ограничивающие условия выбираются на основе физических, технико-экономических и конструктивных предпосылок.

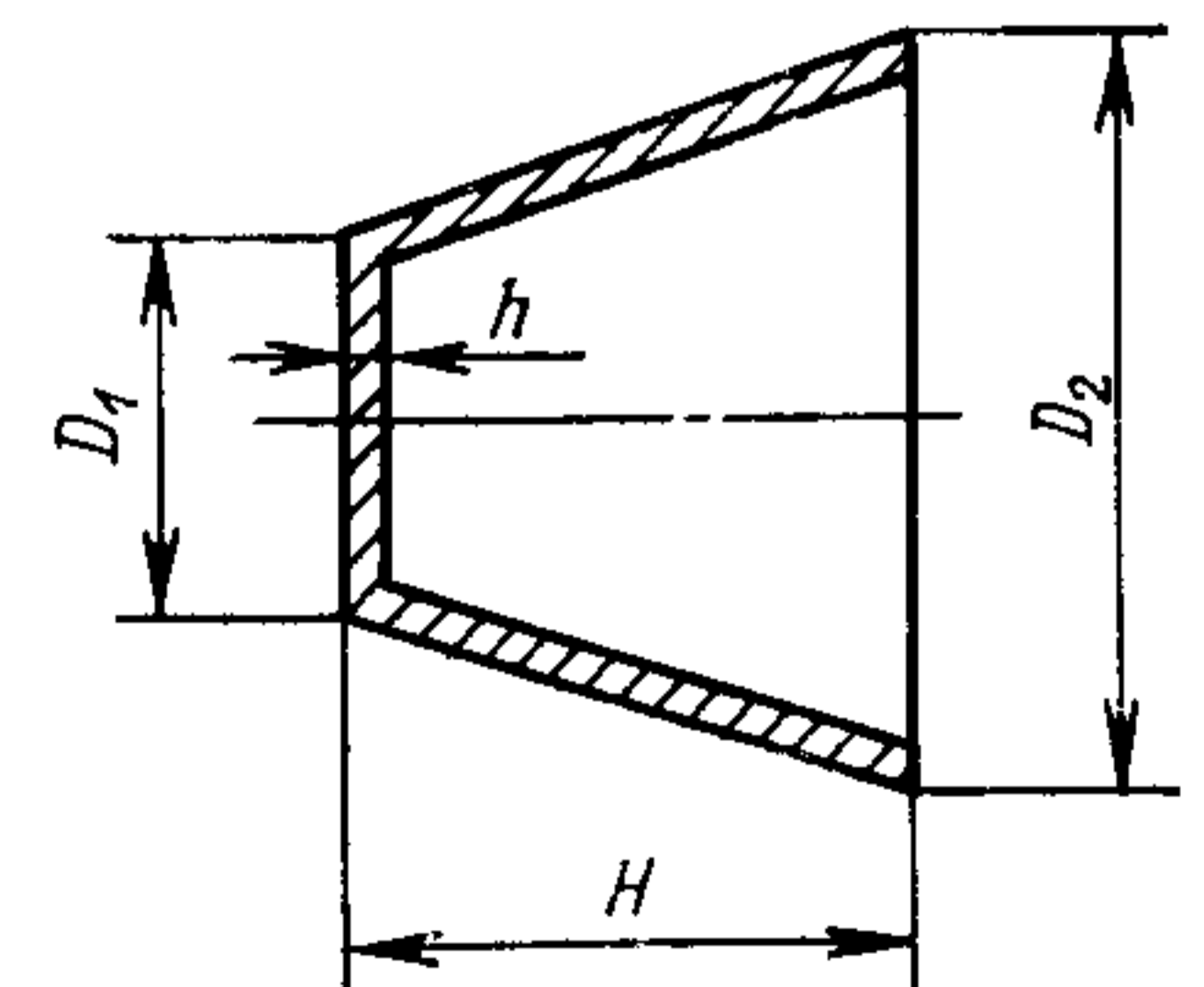


Рис. 2.3. Схема изделия. Площадь литья  $S = \pi D^2/4$

К ограничивающим условиям можно отнести параметры формования (температура полимера, температура формы), обеспечивающие получение изделий высокого качества, свойства полимера, определяющие процессы литья (реологические, теплофизические), допустимую влажность полимера для переработки, гарантирующую стабильность процесса переработки и получение высококачественных изделий со стабильными свойствами, условие обеспечения постоянства объемной скорости течения полимера при заполнении формы для получения изделий со стабильными свойствами по длине и отливаемых в разных циклах литья.

Для расчета производных параметров необходимы функциональные зависимости (определяющие функции) или константы, которые позволяют с помощью входных параметров и ограничивающих условий получать единственные решения. Такие определяющие функции для расчета производных параметров получают на основе математического описания процессов, протекающих при литье. Таким образом, для расчета параметров для конкретного вида оборудования важнейшими условиями являются выявление и нормирование входных параметров; установление определяющих функций и определение ограничивающих условий.

Поскольку численные значения входных параметров критериально связаны между собой, а производные параметры определяются ими, а также в связи с тем, что на литьевых машинах разных типоразмеров процессы литья протекают по одинаковым закономерностям, можно установить связи между отдельными производными параметрами для машины одного типоразмера и между одноименными параметрами для различных по типоразмерам машин внутри целого ряда. Причем эти связи выражаются соответствующими критериями подобия.

Граничные условия по входным параметрам для расчета производных параметров принимают эмпирически. Поэтому необходима последующая оптимизация параметров. Для этого выявляют систему более высокого иерархического уровня (ряд литьевых машин) и оптимизируют параметры всей этой системы в целом. Выявляют критерии оптимизации (например, уровень капитальных, эксплуатационных или приведенных затрат, масса совокупности машин всего ряда и др.). С помощью оптимизации корректируют граничные условия входных параметров и соответственно производные параметры всего ряда.

**Формирование входных параметров.** Методологический подход к формированию входных параметров. Для литьевых машин системой более высокого порядка является система, которая включает в качестве составных частей систему литьевых машин и систему изделий характерного ассортимента, изготавливаемого на этих машинах. Внутри такой системы входные параметры для системы литьевых машин можно сформулировать через требования к параметрам изделий, которые, в свою очередь, вытекают из потребностей производства.

Литьевые изделия можно характеризовать следующими параметрами: объем отливки  $v$ , площадь литья  $S$ , толщина  $h$  и высота  $H$  изделия (см. рис. 2.3). Наряду с таким делением существуют возможности дальнейшего подразделения ассортимента литьевых изделий по многим дополнительным признакам.

Весь ассортимент изделий, изготавливаемых литьевым способом, характеризуется широкими интервалами изменения отдельных входных параметров. Поэтому для создания литьевых машин с высокими технико-экономическими показателями необходимо разделить весь ассортимент изделий на группы, по которым можно создавать отдельные типоразмеры машин (ввести граничные условия для каждой группы изделий). Каждая такая группа изделий характеризуется более узкими интервалами изменения своих параметров.

Величины, характеризующие изменение отдельных входных параметров при переходе от одной группы изделий (типоразмера машины) к другой (другому типоразмеру), называют коэффициентами изменения входных параметров, или критериями подобия входных параметров,  $\varphi = v_{i+1}/v_i$ ,  $K_S = S_{i+1}/S_i$ ,  $K_h = h_{i+1}/h_i$ ,  $K_H = H_{i+1}/H_i$ , где индексы  $i+1$  и  $i$  обозначают последующую и предыдущую группы изделий (типоразмер машин).

Для обеспечения возможности оптимизации параметров литьевых машин всего ряда и систематизации размеров изделий всего характерного ассортимента необходимо, чтобы коэффициенты изменения входных параметров  $\varphi$ ,  $K_S$ ,  $K_h$ ,  $K_H$  сохраняли свои значения постоянными в пределах ряда и чтобы коэффициенты изменения отдельных входных параметров были взаимосвязаны между собой критериальными соотношениями  $\varphi = f(K_S, K_h, K_H)$ .

При формировании групп изделий среди входных параметров выбирают два, по которым первоначально формируют группы изделий. Задают начальные значения выбранных входных параметров (например,  $v_1$ ,  $S_1$ ) и коэффициенты их изменения (например,  $\varphi$ ,  $K_S$ ). По этим значениям устанавливают два ряда двух исходных входных параметров, например:  $v_1, v_2, \dots, v_n$  ( $v_{i+1} = v_i \varphi$ );  $S_1, S_2, \dots, S_n$  ( $S_{i+1} = S_i K_S$ ). Формально каждый из входных параметров можно использовать в качестве исходного. Для литьевых машин в качестве первого исходного параметра традиционно задают объем отливки  $v$ . В качестве второго исходного параметра может быть задана площадь литья  $S$  или толщина изделия  $h$ . При этом первоначально коэффициент  $\varphi$  задают равным 1,5—3;  $K_S = 1,5 \div 2,5$ ;  $K_h = 1,1 \div 1,5$ .

Для определения численных значений остальных входных параметров используют критериальные соотношения  $\varphi = f(K_S, K_h, K_H)$  между коэффициентами изменения входных параметров  $\varphi$ ,  $K_S$ ,  $K_h$ ,  $K_H$  (вид критериальных соотношений приведен ниже). По этим критериальным соотношениям рассчитывают коэффициенты изменения определяемых входных параметров, например  $K_h$ ,  $K_H$ . Используя коэффициенты изменения, определяют численные значения искомых входных параметров, например:  $h_1, h_2, \dots, h_n$  ( $h_{i+1} = h_i K_h$ );  $H_1, H_2, \dots, H_n$  ( $H_{i+1} = H_i K_H$ ). Таким образом, образуются

Критериальные соотношения

Задаваемые пары коэффициентов	Рассчитываемые коэффициенты			
	$\varphi$	$K_S$	$K_h$	$K_H$
$\varphi, K_S$	$\varphi$	$K_S$	$\varphi/K_S$	$\sqrt{K_S}$
$\varphi, K_h$	$\varphi$	$\varphi/K_h$	$K_h$	$\sqrt{\varphi/K_h}$
$\varphi, K_H$	$\varphi$	$K_H^2$	$\varphi/K_H^2$	$K_H$

ряды всех входных параметров:  $v_1, v_2, \dots, v_n; S_1, S_2, \dots, S_n; h_1, h_2, \dots, h_n; H_1, H_2, \dots, H_n$ .

По входным параметрам рассчитывают численные значения производных параметров (см. с. 103). Далее параметры литьевых машин всего ряда оптимизируют (см. с. 123). С помощью оптимизации корректируют задаваемые коэффициенты изменения исходных входных параметров.

**К р и т е р и а л ь н ы е с о о т н о ш е н и я.** Объем отливки  $v$ , площадь литья  $S$ , толщина изделия  $h$  связаны между собой выражением (при допущении равнотолщинности изделий)

$$S_i = v_i/h_i. \quad (2.4)$$

Основываясь на этом выражении, можно нормировать значения изменения входных параметров  $v, S, h$  при переходе от одного типоразмера литьевых машин к другому в ряду таким образом, чтобы изменения были взаимосвязаны:

$$S_{i+1}/S_i = (v_{i+1}/h_{i+1})/(v_i/h_i) = S_i K_S/S_i = [v_i \varphi / (h_i K_h)] / (v_i/h_i),$$

откуда критериальное соотношение между коэффициентами  $K_S, \varphi, K_h$  имеет вид  $K_S = \varphi/K_h$  или  $\varphi = K_S K_h$ .

Аналогично можно получить расчетные критериальные соотношения между коэффициентами  $\varphi, K_H$  и  $K_h$ . Для этого запишем выражение для объема отливки  $v$  в зависимости от толщины  $h$  и высоты  $H$  изделия (см. рис. 2.3) при том же допущении:

$$v = [\pi (H\varepsilon_1)^2 h/4] + [\pi (H\varepsilon_1 + H\varepsilon_2) Hh/2] = \pi H^2 h (\varepsilon_1^2/2 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2)/2, \quad (2.5)$$

где  $\varepsilon_1 = D_1/H; \varepsilon_2 = D_2/H$ .

Основываясь на этом выражении, можно нормировать значения изменения входных параметров  $v, H, h$  при переходе от одного типоразмера литьевых машин к другому в ряду таким образом, чтобы эти изменения были взаимосвязаны:

$$v_{i+1}/v_i = H_{i+1}^2 h_{i+1} / (H_i^2 h_i) = v_i \varphi / v_i = H_i^2 K_H^2 h_i K_h / (H_i^2 h_i),$$

откуда критериальное соотношение между коэффициентами  $\varphi, K_H, K_h$  имеет вид  $\varphi = K_H^2 K_h$  или  $K_H = \sqrt{\varphi/K_h}$ .

Критериальные соотношения между коэффициентами изменения входных параметров приведены в табл. 2.2.

Для плоских изделий начальные значения входных параметров  $v_1, S_1, h_1$  должны быть связаны между собой соотношением (2.4), а для объемных изделий начальные значения входных параметров  $v_1, h_1, H_1$  должны быть связаны соотношением (2.5).

**И з м е н е н и е в х о д н ы х п а р а м е т р о в.** Ассортимент литьевых изделий изменяется во времени, поэтому можно считать, что входные параметры (параметры изделий) литьевой машины в общем случае зависят от времени, т. е.  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ .

Если изменение входных параметров за определенный срок  $[(t_2 - t_1) > B]$  превышает некоторую величину  $A$ , т. е.  $\{[x_i(t_2) -$

$- x_i(t_1)] > A$  при  $(t_2 - t_1) > B\}$ , которая влияет на изменение параметров машины, то входные параметры и соответственно производные параметры машин необходимо пересмотреть. Параметры пересматривают через определенные промежутки времени. Так, в настоящее время параметры машин должны пересматриваться примерно через  $T = 3 \div 7$  лет.

**Р а с ч е т п а р а м е т р о в е д и н и ч н о й м а ш и н ы.** Производные параметры единичной машины: объемная скорость впрыска  $Q_{впр}$ , давление литья  $P_{л}$ , усилие запираания формы  $F$ , ход подвижной плиты  $H_x$ , максимальное расстояние между плитами  $H_{пл}$ , быстроходность  $B$ , пластикационная способность  $q_{пл}$  находят по функциональным зависимостям (определяющим функциям), которые получают на основе математического описания процессов, протекающих при литье (см. гл. 1). Для расчета производных параметров единичной машины задают входные параметры и ограничивающие условия и дополнительные данные, приведенные ниже.

**Основные входные параметры**

Объем отливки  $v$   
Площадь литья  $S$   
Толщина изделия  $h = h_{\varphi}$   
Высота изделия  $H$

**Дополнительные данные (параметры системы сопло—форма)**

Длина  $L_{\varphi}$   
Ширина  $B_{\varphi}$   
Радиус  $r_{\varphi}$   
Длина  $L_{\varphi}$   
Радиус  $R_{\varphi}$   
Толщина  $h_{\varphi}$   
Радиус на входе во втулку  $r_{л. вх}$   
Радиус на выходе из втулки  $r_{л. вых}$   
Длина  $L_{л}$   
Радиус  $r_c$   
Длина  $L_c$   
Температура полимера  $T_0$   
Температура формы  $T_{\varphi}$

*Форма с прямоугольным каналом*

*Форма с цилиндрическим каналом*

*Форма в виде диска*

*Литниковая втулка<sup>1</sup>*

*Сопло<sup>1</sup>*

*Параметры формования*

Показатель вязкости полимера<sup>2</sup>

Показатель текучести расплава ПТР

Молекулярная масса  $\bar{M}$

Ньютоновская вязкость  $\eta_H(T^*)$  при некоторой фиксированной температуре  $T^*$ .

Константы реологического уравнения в форме степенного закона  $m_0, E, n$ .

Вязкостные свойства полимера<sup>3</sup>

Константы обобщенной характеристики вязкостных свойств  $A_1, A_2, \alpha$

Энергия активации вязкого течения в ньютоновской области  $E_H$

Константы зависимости вязкости от давления  $J_1, J_2, \zeta; \bar{J}_1, \bar{J}_2, \bar{\zeta}$ .

Константы зависимости вязкости от влажности  $D_1, D_2, \varphi$

Индекс течения для различных диапазонов  $\dot{\gamma}, n$

Константы зависимости<sup>4</sup> ньютоновской вязкости  $\eta_H(T_{ПТР})$  при температуре

определения ПТР ( $T_{ПТР}$ ) от ПТР,  $B, b, T_{ПТР}$

Константы зависимости<sup>5</sup> ньютоновской вязкости  $\eta_H(T_{\bar{M}})$  при температуре  $T_{\bar{M}}$

от  $\bar{M}, K', N, T_{\bar{M}}$

Константы для расчета течения полимера через вход в сопло

Константы зависимости входов потерь давления до входа в сопло  $\Delta P_{0,c}$  от напряжения сдвига  $\tau, D', \mu$ .

Константы зависимости релаксирующей составляющей общих потерь давления на входном участке сопла  $\Delta P_{L,c}$  от напряжения сдвига  $\tau, A'$

Константы обобщенной зависимости характерных времен релаксации входных потерь давления  $C_1, C_2, C_3, \beta$

Константа релаксационного процесса  $K$

Теплофизические свойства полимера

Среднеинтегральное значение коэффициента температуропроводности  $\tilde{\alpha}$

Температура слоя, по которому течет расплав в формующем элементе  $T_\delta$

Характеристики объемного изменения полимера под влиянием давления и температуры

Константы уравнения состояния  $\pi, \omega, R'$

Влажность полимера перед переработкой  $B$

<sup>1</sup> Расчет размеров литниковой втулки и сопла по известным размерам формы приведен в п. 2.7.

<sup>2</sup> Для расчета задают один из известных показателей: ПТР,  $\bar{M}, \eta_H(T^*)$  или ( $m_0, E, n$ ).

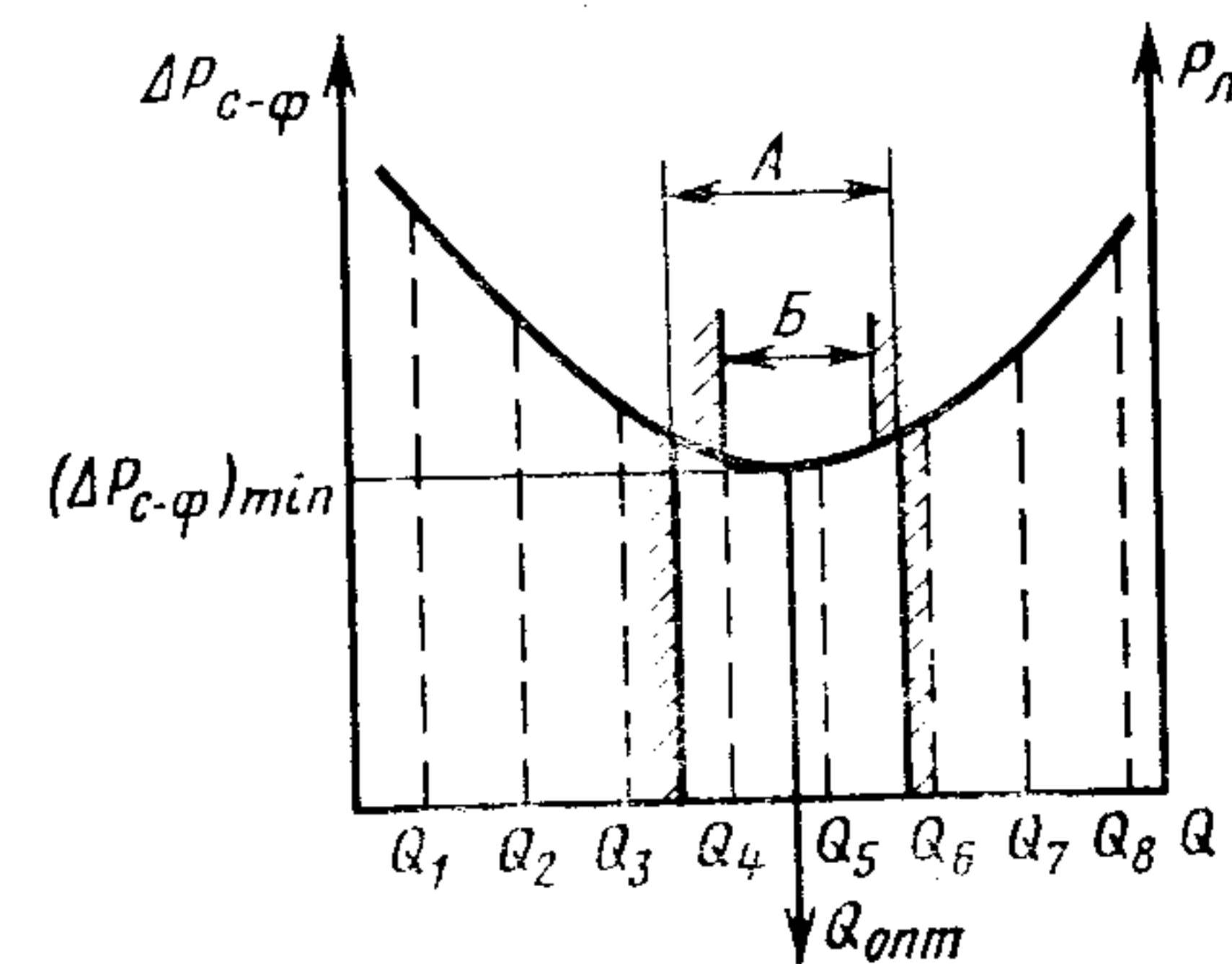
<sup>3</sup> Характеристики вязкостных свойств задают, если в качестве их показателя задают или ПТР, или  $\bar{M}$ , или  $\eta_H(T^*)$ .

<sup>4</sup> Константы  $B, b, T_{ПТР}$  задают, если в качестве показателя вязкости полимера используют ПТР.

<sup>5</sup> Константы  $K', N, T_{\bar{M}}$  задают, если в качестве показателя вязкости полимера используют  $\bar{M}$ .

Для различных полимеров значения ПТР,  $\bar{M}, \eta_H(T^*), (m_0, E, n), (A_1, A_2, \alpha), E_H, (J_1, J_2, \zeta, \bar{J}_1, \bar{J}_2, \bar{\zeta}), (D_1, D_2, \varphi), n, (B, b, T_{ПТР}), (K', N, T_{\bar{M}}), (D', \mu), A', (C_1, C_2, C_3, \beta), K, \tilde{\alpha}, T_\delta, (\pi, \omega, R'), B$  приведены в работе [9].

Рис. 2.4. Зависимость перепада давлений в системе сопло — форма  $\Delta P_{c-ф}$  и давления литья  $P_L$  от объемной скорости течения  $Q$ : А — область оптимальных значений  $Q$  по минимуму  $\Delta P_{c-ф}$ , Б — область значений  $Q$ , при которых формируется структура изделий, обеспечивающая их высокое качество



Объемная скорость в прыска. Объемную скорость впрыска проектируемой машины определяют из двух условий: давление литья  $P_L$ , необходимое для заполнения системы сопло —

форма, должно быть в заданных пределах; при заполнении формы должна формироваться структура изделий, обеспечивающая их высокое качество. Объемная скорость впрыска  $Q_{впр}$  определяет объемную скорость течения полимера, а в системе сопло — форма от объемной скорости течения  $Q$  зависят перепад давления, возникающий при заполнении системы сопло — форма  $\Delta P_{c-ф}$  (рис. 2.4), и давление литья  $P_L$ , которое необходимо установить в гидроприводе машины для заполнения системы. Перепад давлений  $\Delta P_{c-ф}$  суммируется из перепадов давлений в системе сопло — литниковая втулка  $\Delta P_{c-л}$  и в форме  $\Delta P_{ф}$  (см. рис. 1.7). Перепад давлений  $\Delta P_{c-л}$  складывается из перепадов давлений в каждом из элементов, составляющих систему сопло — литниковая втулка, например, если система включает сопло и литниковую втулку, то  $\Delta P_{c-л}$  суммируется из перепадов давлений в сопле  $\Delta P_c$  и литниковой втулке  $\Delta P_{л}$ . Зависимость перепадов давлений  $\Delta P_{c-ф}$  от объемной скорости течения  $Q$  имеет оптимальную область, в которой  $\Delta P_{c-ф}$  принимает минимальное значение  $(\Delta P_{c-ф})_{min}$  (см. рис. 2.4).

Возрастание объемной скорости течения  $Q$  от оптимального значения  $Q_{opt}$  приводит к увеличению  $\Delta P_{c-ф}$ . Это объясняется тем, что с возрастанием  $Q$  увеличивается скорость сдвига  $\dot{\gamma}$ , реализуемая при течении полимера в формующих элементах системы в процессе ее заполнения. Это, в свою очередь, приводит к увеличению напряжения сдвига  $\tau$  течения полимера в формующих элементах системы и по этой причине к возрастанию перепадов давлений в каждом из них  $[\Delta P = 2\tau L/h]$ . С возрастанием  $\dot{\gamma}$  увеличиваются также входные потери давления в сопле  $\Delta P_{вх,c}$ . Все это приводит к увеличению общего перепада давлений в системе сопло — форма  $\Delta P_{c-ф}$  с возрастанием  $Q$ .

Уменьшение объемной скорости течения  $Q$  от оптимального значения  $Q_{opt}$  также приводит к увеличению  $\Delta P_{c-ф}$ , так как с уменьшением  $Q$  увеличивается продолжительность заполнения системы, что приводит к возрастанию толщины охлажденного слоя, образующегося при заполнении. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению проходного сечения каналов формующих элементов, а следовательно, к увеличению напряжения сдвига  $\tau$ , реализуемого при заполнении этих элементов и определяющего возникающие в них перепады

давлений  $\Delta P$ . Кроме того, увеличение времени заполнения системы приводит к более сильному охлаждению текущего расплава и к увеличению вязкости расплава. Это также вызывает возрастание перепадов давлений  $\Delta P$  в формирующих элементах. Таким образом, причинами увеличения перепада давлений в системе сопло — форма  $\Delta P_{с-ф}$  являются увеличение толщины охлажденного слоя и понижение температуры текущего расплава в результате увеличения времени заполнения системы при понижении объемной скорости течения.

Для обеспечения высоких технико-экономических показателей проектируемой машины допустимый интервал изменения объемной скорости течения следует выбирать в оптимальной области зависимости  $\Delta P_{с-ф} = f(Q)$  (в этой области  $\Delta P_{с-ф}$  превышает свое минимальное значение не более чем в 1,2—1,3 раза) (см. рис. 2.4). Для построения такой зависимости задают ряд значений  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  и при этих значениях  $Q$  рассчитывают перепады давлений  $\Delta P_{с-ф}$ , образующиеся при заполнении системы. По рассчитанным значениям  $(\Delta P_{с-ф})_1, (\Delta P_{с-ф})_2, \dots, (\Delta P_{с-ф})_n$  строят зависимость  $\Delta P_{с-ф} = f(Q)$  (см. рис. 2.4).

Перепад давлений в системе сопло — форма  $\Delta P_{с-ф}$  рассчитывают по уравнению (1) [табл. 1.1]. Порядок расчета его составляющих — перепада давлений в форме  $\Delta P_{ф}$  и в системе сопло — литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$  — приведен в табл. 2.3 и 2.4.

В области оптимума зависимости  $\Delta P_{с-ф} = f(Q)$  определяют интервал значений  $Q$  (см. рис. 2.4), при которых формируется структура изделий, обеспечивающая их хорошие показатели по внешнему виду, размерной точности, стабильности, механической прочности. Порядок определения этого интервала следующий:

в области оптимума зависимости  $\Delta P_{с-ф} = f(Q)$  задают ряд значений  $Q : Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ ;

для заданных значений  $Q_i$  рассчитывают толщину  $\varphi_i$  центрального слоя морфологической структуры изделий, образующейся при их формировании (см. п. 4.3);

для заданных значений  $Q_i$  рассчитывают отношение площади центрального слоя к площади поперечного сечения изделия  $(S_{\varphi}/S)_i$ ;

по полученным значениям отношения  $(S_{\varphi}/S)_i$  и заданным значениям  $Q_i$  строят зависимость  $S_{\varphi}/S = f(Q)$  (рис. 2.5).

на оси ординат откладывают точки со значениями  $S_{\varphi}/S = 0,2$  и  $S_{\varphi}/S = 0,3$  (в интервале  $S_{\varphi}/S = 0,2 \div 0,3$  изделия имеют хорошие показатели по внешнему виду, размерной точности, стабильности, механической прочности), из этих точек восстанавливают перпендикуляры до пересечения с зависимостью  $S_{\varphi}/S = f(Q)$  (см. рис. 2.5).

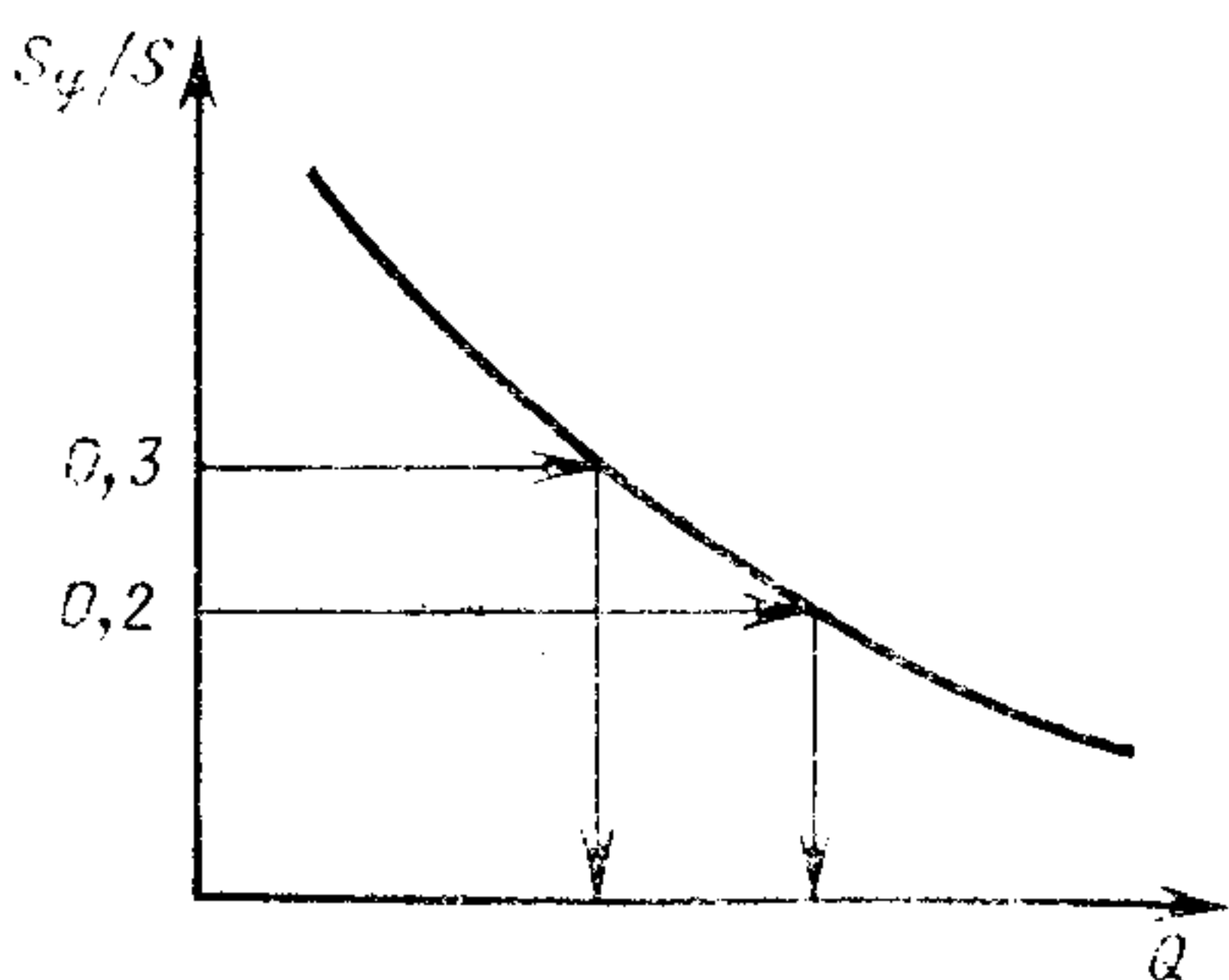


Рис. 2.5. Зависимость отношения площади центрального слоя к площади поперечного сечения изделия  $S_{\varphi}/S$  от времени заполнения формы  $t_3$  (на рисунке  $Q$ )

Абсциссы точек пересечения ограничивают интервал значений  $Q$ , при которых формируется структура изделий, обеспечивающая их хорошие эксплуатационные свойства.

В результате рассмотренных операций получают интервал оптимальных значений объемной скорости течения  $Q$  в системе сопло — форма. Для обеспечения реализации этих значений объемная скорость впрыска  $Q_{впр}$  должна быть больше  $Q$ , так как происходит утечка расплава полимера в шнеке и его сжатие в инжекционном цилиндре. Объемную скорость впрыска  $Q_{впр}$  по известному значению объемной скорости течения полимера в системе сопло — форма  $Q$  можно определить по уравнению

$$Q_{впр} = K_{ут_1} K_{сж} Q, \quad (2.6)$$

где  $K_{ут_1}$  — коэффициент, учитывающий утечки расплава полимера в шнеке, принимают равным 1,05—1,07;  $K_{сж}$  — коэффициент, учитывающий сжатие расплава в инжекционном цилиндре;  $K_{сж} = (1 - \kappa P_c)^{-1}$ , здесь  $P_c$  — давление на входе в сопло, равное  $\Delta P_{с-ф}$ ;  $\kappa$  — коэффициент сжимаемости полимера (его значения для различных полимеров приведены в работе [9]);  $K_{сж}$  принимают равным 1,07—1,1.

Произведение  $K_{ут_1}$  и  $K_{сж}$  можно приближенно принять равным коэффициенту  $k$  (см. табл. 3.9).

**Д а в л е н и е л и т ь я.** Давление литья  $P_{л}$ , необходимое для заполнения системы сопло — форма, суммируется из потерь давления  $\Delta P_{м}$ , возникающих в рабочих органах машины до входа в сопло, и перепада давлений  $\Delta P_{с-ф}$ , возникающего в системе сопло — форма. Потери давления  $\Delta P_{м}$  складываются из потерь давления в гидросистеме и гидроцилиндре впрыска и в инжекционном цилиндре. Давление литья  $P_{л}$  можно рассчитать по формуле

$$P_{л} = \Delta P_{м} + \Delta P_{с-ф} = K_{п} \Delta P_{с-ф}, \quad (2.7)$$

где  $K_{п}$  — коэффициент, учитывающий потери давления  $\Delta P_{м}$ ; при проектировании литьевых машин принимают равным 1,09—1,12.

Перепад давлений  $\Delta P_{с-ф}$  рассчитывают по уравнению (1) [табл. 1.1], порядок расчета составляющих его перепада давлений в форме  $\Delta P_{ф}$  и в системе сопло — литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$  приведен в табл. 2.3 и 2.4.

В качестве параметра  $P_{л}$  выбирается давление не меньше, чем получается по расчетам формулы (2.7).

**У с и л и е з а п и р а н и я ф о р м ы.** Усилие запирания прессовой части литьевой машины (необходимое для предотвращения раскрытия формы под действием усилия, возникающего в ее внутренней полости в процессе формования) рассчитывают по уравнению

$$F = P_{ср} S / K_{зап}, \quad (2.8)$$

где  $P_{ср}$  — среднее давление в форме;  $S$  — площадь литья;  $K_{зап}$  — коэффициент запаса, при проектировании литьевых машин обычно задают равным 0,9.

Среднее давление в форме  $P_{ср}$  в зависимости от давления на входе  $P_{ф.вх}$  и выходе формы  $P_{ф.вых}$  можно определить приближенно:

$$P_{ср} = (P_{ф.вх} + P_{ф.вых}) / 2 \text{ — для пластины,} \quad (2.9a)$$

$$P_{ср} = P_{ф.вых} + [(P_{ф.вх} - P_{ф.вых}) / 3] \text{ — для диска.} \quad (2.9b)$$

Таблица 2.3

Последовательность расчета перепада давлений в форме в режиме постоянной объемной скорости течения в период заполнения формы

Операция	Номер уравнения (номер таблицы) или источник
Рассчитывают эквивалентное время охлаждения полимера $t_3$ в форме <sup>1</sup>	8а (1.3)
Рассчитывают критерий Фурье $Fo$ , подставляя $t = t_3$	10а, 10б (1.3)
Рассчитывают усредненную по длине затекания полимера в форму толщину пристенного слоя $\bar{\delta}$	5а—5г (1.3)
Рассчитывают среднеобъемную температуру потока расплава в форме $\bar{T}$	6а—6з (1.3)
Рассчитывают скорость сдвига $\tilde{\dot{\gamma}}$ , реализуемую при заполнении формы	4а, 4б (1.3)
Рассчитывают вязкость $\eta_{\tilde{\dot{\gamma}}(\bar{T}, B)}$ при скорости сдвига $\tilde{\dot{\gamma}}$ , температуре $\bar{T}$ и влажности $B$ или выбирают константы $m_0$ , $E$ , $n$ реологического уравнения в форме степенного закона (в зависимости от исходных данных)	[9]
Рассчитывают перепад давлений в форме $\Delta P_{\phi}$ без учета влияния давления на вязкость, т. е. коэффициент давления $K_d = 1$	2а—2г (1.3)
Рассчитывают коэффициент давления $K_d$ для перепада давлений $\Delta P_{\phi}$ ( $K_d$ рассчитывают, если давление оказывает влияние на вязкость полимера, в противном случае $K_d = 1$ ). $K_d$ рассчитывают методом последовательных приближений. В первом приближении давление на входе в форму $P_{\phi, вх}$ задают равным ( $\Delta P_{\phi}$ при $K_d = 1$ ). В $i$ -м приближении $P_{\phi, вх}$ задают равным произведению [ $\Delta P_{\phi}$ при $K_d = 1$ ] на $K_d$ , где $K_d$ полученный в предыдущем ( $i - 1$ )-м приближении. Расчет заканчивают на том приближении, в котором рассчитанный $K_d$ отличается от полученного в предыдущем ( $i - 1$ )-м приближении не более чем на $\Pi\%$ (задаваемая точность приближения)	9а (1.3)
Рассчитывают перепад давлений в форме $\Delta P_{\phi}$ с учетом $K_d$	2а—2г (1.3)

<sup>1</sup> Если рассчитывают  $t_3$  в момент окончания заполнения формы, то в уравнение (8а) [табл. 1.3] подставляют продолжительность ее заполнения  $t_3$ , если рассчитывают  $t_3$  в текущие (задаваемые) моменты периода, то подставляют продолжительность заполнения до этих моментов.

Таблица 2.4

Последовательность расчета перепада давлений в системе сопло — литниковая втулка в режиме постоянной объемной скорости течения в период заполнения формы

Операция	Номер уравнения (номер таблицы) или источник
<i>Расчет параметров формования в сопле</i>	
Рассчитывают скорость сдвига $\dot{\gamma}$ , реализуемую в сопле	5 (1.4)
Рассчитывают вязкость $\eta_{\dot{\gamma}(T_0, B)}$ при скорости сдвига $\dot{\gamma}$ , температуре $T_0$ и влажности $B$ или выбирают константы $m_0$ , $E$ , $n$ реологического уравнения в форме степенного закона (в зависимости от исходных данных)	[9]
Рассчитывают входные потери давления до входа в сопло $\Delta P_{o, c}$ без учета влияния давления на входовые эффекты, т. е. коэффициент давления $K_{d, вх} = 1$	1а, 1б (1.4)
Рассчитывают релаксирующую составляющую общих потерь давления на входовом участке сопла $\Delta P_{Lc}$ при $K_{d, вх} = 1$ и без учета влияния давления на характерное время релаксации $\theta_{\dot{\gamma}(T_0, B)}$ , т. е. давление $P_c$ в уравнении (2б) [табл. 1.4]	2а, 3а (1.4)
задают равным нулю	
Рассчитывают общие входовые потери давления в сопле $\Delta P_{вх, c}$ при $K_{d, вх} = 1$	4 (1.1)
Рассчитывают перепад давлений, затрачиваемый на течение расплава в сопле $\Delta P_{т, c}$ без учета влияния давления на вязкость, т. е. коэффициент давления $K_d = 1$ , при этом $\tilde{\dot{\gamma}} = \dot{\gamma}$	2б, 2г (1.3)
Рассчитывают общий перепад давлений в сопле $\Delta P_c$ при $K_{d, вх} = 1$ и $K_d = 1$	3 (1.1)
Рассчитывают общий перепад давлений в сопле $\Delta P_c$ с учетом $K_{d, вх}$ и $K_d$ (см. ниже в таблице); расчет производят, если давление оказывает влияние на реологические свойства полимера	
<i>Расчет параметров формования в литниковой втулке<sup>1</sup></i>	
Рассчитывают эквивалентное время охлаждения полимера $t_3$ в литниковой втулке <sup>2</sup>	8б (1.3)
Рассчитывают критерий Фурье $Fo$ , подставляя $t = t_3$	10а, 10б (1.3)
Рассчитывают усредненную по длине литниковой втулки толщину пристенного слоя $\bar{\delta}$	5а—5г (1.3)
Рассчитывают скорость сдвига $\tilde{\dot{\gamma}}$ , реализуемую в литниковой втулке	4а, 4б (1.3)
Рассчитывают вязкость $\eta_{\tilde{\dot{\gamma}}(T_0, B)}$ при скорости сдвига $\tilde{\dot{\gamma}}$ , температуре $T_0$ и влажности $B$ или выбирают константы $m_0$ , $E$ , $n$ реологического уравнения в форме степенного закона (в зависимости от исходных данных)	[9]
Рассчитывают перепад давлений в литниковой втулке $\Delta P_{л}$ без учета влияния давления на вязкость, т. е. коэффициент давления $K_d = 1$	2а—2г (1.3)
Рассчитывают перепад давлений в литниковой втулке $\Delta P_{л}$ с учетом $K_d$ (см. ниже в таблице); расчет производят, если давление оказывает влияние на реологические свойства полимера	
Рассчитывают общий перепад давлений в системе сопло — литниковая втулка $\Delta P_{c-л}$ при $K_{d, вх} = 1$ и $K_d = 1$	2 (1.1)



Операция	Номер уравнения (номер таблицы) или источник
<b>Расчет перепада давлений</b>	
Перепад давлений $\Delta P_{с-л}$ пересчитывают с учетом влияния давления (пересчет проводят, если давление оказывает влияние на реологические свойства полимера). Пересчет $\Delta P_{с-л}$ проводят методом последовательных приближений. В каждом $i$ -м приближении снова рассчитывают перечисленные ниже параметры, зависящие от давления	
Коэффициент давления $K_{д, вх}$ для перепада $\Delta P_{о.с}$ ; при этом давление на входе в сопло $(P_c)_i$ задают по соответствующему уравнению <sup>3</sup>	4а (1.4)
Входные потери давления до входа в сопло $\Delta P_{о.с}$ с учетом $K_{д, вх}$	1а (1.4)
Релаксирующую составляющую общих потерь давления на входном участке сопла $\Delta P_{Lc}$ с учетом $K_{д, вх}$ и влияния давления на характерное время релаксации $\theta_{\psi}(T_0, P_c, B)$ ; при расчете $\theta_{\psi}(T_0, P_c, B)$ давление на входе в сопло $(P_c)_i$ задают по соответствующему уравнению <sup>3</sup>	2а, 3а (1.4)
Общие входные потери давления в сопле $\Delta P_{вх.с}$ с учетом $K_{д, вх}$	4 (1.1)
Коэффициент давления $K_d$ для перепада давлений $\Delta P_{т.с}$ ; при этом давление на входе в сопло $(P_c)_i$ задают по соответствующему уравнению <sup>3</sup> , а на выходе из него $P_{с.вых}$ — равным перепаду давлений в форме $\Delta P_{\phi}$	9а (1.3)
Перепад давлений, затрачиваемый на течение расплава в сопле $\Delta P_{т.с}$ с учетом $K_d$	2б, 2г (1.3)
Общий перепад давлений в сопле $\Delta P_c$ с учетом $K_d$ и $K_{д, вх}$	3 (1.1)
Коэффициент давления $K_d$ для перепада $\Delta P_{л}$ ; при этом давление на входе в литниковую втулку $P_{л.вх}$ задают равным $(P_c)_i$ по соответствующему уравнению <sup>3</sup> , а на выходе из него $P_{л.вых}$ равным перепаду давлений в форме $\Delta P_{\phi}$	9а (1.3)
Перепад давлений в литниковой втулке $\Delta P_{л}$ с учетом $K_d$	2а—2г (1.3)
Общий перепад давлений в системе сопло — литниковая втулка $\Delta P_{с-л}$ с учетом $K_d, K_{д, вх}$	2 (1.1)
Расчет заканчивают на $i$ -м приближении, в котором рассчитанный перепад давлений $(\Delta P_{с-л})_i$ отличается от полученного $(\Delta P_{с-л})_{i-1}$ в предыдущем $(i-1)$ -м приближении не более чем на $\Pi$ % (задаваемая точность приближения)	

<sup>1</sup> Схема расчета перепада давлений в разветвленной литниковой системе приведена в табл. 2.15.

<sup>2</sup> Если рассчитывают  $t_{\text{з}}$  в момент окончания заполнения формы, то в уравнение (86) [табл. 1.3] подставляют продолжительность ее заполнения  $t_{\text{з}}$ , если рассчитывают  $t_{\text{з}}$  в текущие (задаваемые) моменты периода — продолжительность заполнения до этих моментов.

<sup>3</sup> Уравнение определения давления на входе в сопло:

$$(\Delta P_c)_i = \Delta P_{\phi} + (\Delta P_{с-л})_{i-1}$$

где  $(\Delta P_{с-л})_{i-1}$  — перепад давлений в системе сопло — литниковая втулка, полученный в предыдущем  $(i-1)$ -м приближении; во втором  $(i-2)$ -м приближении  $(\Delta P_{с-л})_{i-1} = \Delta P_{с-л}$  при  $K_{д, вх}$  и  $K_d = 1$ ; в первом приближении расчеты проводят без учета влияния давления на вязкость и входные эффекты.

Усилие запираения формы  $F$  рассчитывают по максимальному значению среднего давления  $P_{ср}$ , развивающемуся в форме. В обычном режиме литья максимальное давление возникает в период нарастания давления в момент развития в системе максимальных усилий, т. е. в момент перехода от первой стадии нарастания давления ко второй — «динамического равновесия» (см. п. 1. 2. 3). В этот момент в форме возникает наибольшее давление и поэтому требуется большее усилие запираения формы, чтобы предотвратить ее раскрытие. Для обеспечения высокого качества изделий в большинстве случаев не требуется большое давление формования. Поэтому наряду с машинами, работающими в обычном цикле литья, создают машины, конструкция которых предусматривает режим формования со сбросом давления, т. е. в период заполнения или нарастания давления давление литья  $P_{л}$  в гидроприводе изменяют (регулируют) до вторичного значения (вторичное давление), что приводит к изменению давления на входе в форму (см. п. 4.2, 4.4).

При проектировании литьевых машин, конструкцией которых предусмотрен режим формования со сбросом давления, усилие запираения формы  $F$  (2.8) рассчитывают по среднему давлению в форме  $P_{ср}$ , которое возникает в момент окончания ее заполнения. При этом давление на входе в форму  $P_{\phi.вх}$  задают равным перепаду давлений в форме  $\Delta P_{\phi}$  ( $P_{\phi.вх} = \Delta P_{\phi}$ ), а давление на выходе  $P_{\phi.вых} = 0$ . Порядок расчета  $\Delta P_{\phi}$  приведен в табл. 2.3.

При проектировании литьевых машин, конструкцией которых не предусмотрен режим формования со сбросом давления, усилие запираения формы  $F$  (2.8) рассчитывают по среднему давлению  $P_{ср}$  в форме, которое возникает в момент развития в системе максимальных усилий. Для определения максимального  $P_{ср}$  в этот момент последовательно рассчитывают  $P_{ср} = \bar{P}$  в предыдущие текущие моменты периода, начиная с начального.

Для расчета параметров формования (в том числе среднего давления в форме  $P_{ср} = \bar{P}$ ) в текущие моменты периода нарастания давления применяют дискретно-последовательную систему (см. рис. 1.34). Период нарастания давления разбивают на ряд расчетных ступеней  $t_1 - t_2, \dots, t_{k-1} - t_k \dots$  и определяют средний (фиксированный) момент  $\bar{t}$  каждой расчетной ступени. Рекомендуемые продолжительности расчетных ступеней приведены ниже.

Номер расчетной ступени . . . . .	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Временной интервал расчетной ступени $t_{k-1} - t_k$ , с	0,05	0,05	0,1	0,1	0,2	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5
Начальный момент расчетной ступени $t_{k-1}$ , с . . . . .	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0
Конечный момент расчетной ступени $t_k$ , с . . . . .	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5
Фиксированный момент расчетной ступени $\bar{t}$ , с . . . . .	0,025	0,075	0,15	0,25	0,4	0,625	0,875	1,25	1,75	2,25

Коэффициент  $m_1$ :

1) . . . . .	1,65	1,1	1,09	1,06	1,05	1,04	1,02	1,01	1	1
2) . . . . .	1,1	1,06	1,06	1,04	1,04	1,04	1,01	1,01	1	1

Примечание. Коэффициенты  $m_1$  по строке 1 приведены для условий, когда заполнение формы проходило с постоянной скоростью течения; по строке 2 — для условий, когда заполнение формы проходило первоначально с постоянной, а затем с убывающей скоростью течения.

Параметры формования рассчитывают в фиксированные моменты  $\bar{t}$  всех расчетных ступеней. Для расчета параметров формования на каждой  $k$ -й ступени применяют метод последовательных приближений. Задаваемой величиной, по которой ведется приближение, является среднее давление в форме  $\bar{P}_k$  к концу  $t_k$  расчетной ступени. Последовательность расчета параметров формования (в том числе среднего давления в форме  $P_{ср} = \bar{P}$  в  $i$ -м приближении на  $k$ -й расчетной ступени) приведена в табл. 2.5.

Расчет заканчивают на той  $(\xi + 1)$ -й расчетной ступени, на которой перепад давлений в системе сопло — форма  $(\Delta P_{с-ф})_{\xi+1}$  получился больше рассчитанного  $(\Delta P_{с-ф})_{\xi}$  на предыдущей ступени  $\xi$ . Увеличение рассчитанного перепада давлений  $(\Delta P_{с-ф})_{\xi+1}$  означает, что наступил момент развития в системе максимальных усилий. Фиксированный момент  $\bar{t}$  расчетной ступени  $\xi$  соответствует моменту развития в системе максимальных усилий. Среднее давление в форме в этот момент  $\bar{P}_{\xi}$  подставляют в формулу (2.8) для определения усилия записания формы.

При расчете среднего давления в форме в период нарастания давления определяют перепады давлений в форме  $\Delta P_{\phi}$  и в системе сопло — литниковая втулка  $\Delta P_{с-л}$ . Последовательность расчета  $\Delta P_{\phi}$  и  $\Delta P_{с-л}$  в период нарастания давления приведена в табл. 2.6 и 2.7.

Расстояние между плитами и ход подвижной плиты. Максимальное расстояние между плитами  $H_{пл}$  зависит от максимальной высоты формы  $H_{\phi}$ , которую можно устанавливать на проектируемой машине, и от хода подвижной плиты  $H_x$ .

Максимальная высота формы  $H_{\phi}$  определяется допустимой высотой изделий  $H$  (входной параметр), которую можно получать на проектируемой машине. Высоту  $H_{\phi}$  при заданной высоте изделия  $H$  устанавливают на основе опыта конструирования литьевых форм, при этом в конструкции формы должны быть предусмотрены все необходимые элементы (для выталкивания изделия, охлаждения и т. д.). Для объемных изделий:

$$H_{\phi} = H/K_1, \quad (2.10)$$

где  $K_1 = H/H_{\phi} = 0,4 \div 0,6$ .

Для съема изделия требуется определенный ход плиты  $H_x$ , зависящий от конфигурации изделия:

$$H_x = HK_2/K_1 = H_{\phi}K_2, \quad (2.11)$$

где  $K_2 = H_x/H_{\phi} = H_xK_1/H$ , определяют по рис. 2.6 с учетом  $D_2/D_1$ .

Максимальное расстояние между плитами:

$$H_{пл} = H_x + H_{\phi} = HK_2/K_1 + H/K_1 = H(K_2 + 1)/K_1; \quad (2.12a)$$

Последовательность расчета параметров формования в  $i$ -м приближении на  $k$ -й расчетной ступени в период нарастания давления

Номер операции	Операция
1	Определяют среднее давление в форме $\bar{P}_{k-1}$ к началу $t_{k-1}$ расчетной ступени. На первой ( $k=1$ ) расчетной ступени, если к концу периода заполнения давление на входе в сопло $P_c$ достигло максимального значения $P_{л}/K_{л}$ (2.7), $\bar{P}_0$ равно половине перепада давлений в форме $(\Delta P_{\phi})_3$ к концу периода заполнения; в противном случае $\bar{P}_0$ определяется следующим образом: $\bar{P}_0 = P_{л}/K_{л} - (\Delta P_{с-л})_3 - 0,5 (\Delta P_{\phi})_3$ , где $(\Delta P_{с-л})_3$ — перепад давлений в системе сопло—литниковая втулка к концу периода заполнения формы. На последующих расчетных ступенях, начиная со второй ( $k=2, 3 \dots$ ) $\bar{P}_{k-1}$ равно среднему давлению в форме к концу $t_{k-1}$ предыдущей ( $k-1$ )-й расчетной ступени
2	Задают среднее давление в форме $(\bar{P}_k)_i$ к концу $t_k$ расчетной ступени. В первом ( $i=1$ ) приближении $(\bar{P}_k)_{i=1} = m_1 \bar{P}_{k-1}$ ; рекомендуемые значения коэффициента $m_1$ в зависимости от режима заполнения и номера расчетной ступени приведены выше. Во втором ( $i=2$ ) приближении $(\bar{P}_k)_{i=2} = 0,5 [(\bar{P}_k)_{i=1} + (\bar{P}_k)_{i=1}]$ , где $(\bar{P}_k)_{i=1}$ — рассчитанное среднее давление в форме в предыдущем ( $i=1$ ) приближении. В третьем ( $i=3$ ) приближении $(\bar{P}_k)_{i=3} = (\bar{P}_k)_{i=2} [(\bar{P}_k)_{i=1} - (\bar{P}_k)_{i=2}] / [(\bar{P}_k)_{i=1} - (\bar{P}_k)_{i=2}],$ где $(\bar{P}_k)_{i=2}$ — рассчитанное среднее давление в форме в предыдущем ( $i=2$ ) приближении
3	Рассчитывают среднее давление в форме $\bar{P}_{\bar{t}}$ в фиксированный момент $\bar{t}$ расчетной ступени. На первой ( $k=1$ ) расчетной ступени, если заполнение формы проходило в режиме постоянной объемной скорости течения, $\bar{P}_{\bar{t}}$ задают равным: $\bar{P}_{\bar{t}} = \bar{P}_0 + 3(P_1 - P_0)/4$ (1), где $\bar{P}_1$ — задаваемое среднее давление в форме к концу первой ( $k=1$ ) ступени. На следующих ступенях ( $k=2, 3 \dots$ ), а также на первой, если заполнение проходило первоначально с постоянной, а затем с убывающей скоростью течения, $\bar{P}_{\bar{t}}$ задают равным $\bar{P}_{\bar{t}} = 0,5 (\bar{P}_{k-1} + \bar{P}_k)$ (2)
4	Рассчитывают перепад давлений в форме $\Delta P_{\phi}$ ; последовательность расчета приведена в табл. 2.6
5	Рассчитывают давление на входе в форму $P_{\phi, вх} = \bar{P}_{\bar{t}} + 0,5 \Delta P_{\phi}$ (3)
6	Рассчитывают перепад давлений в системе сопло—литниковая втулка $\Delta P_{с-л}$ , последовательность расчета приведена в табл. 2.7
7	Рассчитывают среднее давление в форме $(\bar{P}_{\bar{t}})_{\bar{t}}$ в фиксированный момент $\bar{t}$ расчетной ступени $(\bar{P}_{\bar{t}})_{\bar{t}} = P_c - (\Delta P_{с-л} + 0,5 \Delta P_{\phi})$
8	Рассчитывают среднее давление в форме $(\bar{P}_k)_{\bar{t}}$ к концу $t_k$ расчетной ступени. Если $\bar{P}_{\bar{t}}$ на третьей операции рассчитывали по уравнению (1), то $(\bar{P}_k)_{\bar{t}} = (\bar{P}_{\bar{t}})_{\bar{t}} + (\bar{P}_1 - \bar{P}_0)/4$ . Если $\bar{P}_{\bar{t}}$ на третьей операции рассчитывали по уравнению (2), то $(\bar{P}_k)_{\bar{t}} = (\bar{P}_{\bar{t}})_{\bar{t}} + 0,5 (\bar{P}_k - \bar{P}_{k-1})$

Номер операции	Операция
9	Сравнивают рассчитанное $(\tilde{P}_k)_i$ с заданным $(\tilde{P}_k)_i$ . Если $(\tilde{P}_k)_i$ отличается от $(\tilde{P}_k)_i$ не более чем на $\Pi\%$ (задаваемая точность приближения), то расчет на данной ступени заканчивают и переходят к расчету на следующей $(k + 1)$ -й ступени; в противном случае переходят к расчету последующего приближения

Таблица 2.6

Последовательность расчета перепада давлений в форме в период нарастания давления

Операция	Номер уравнения (номер таблицы) или источник
Рассчитывают эквивалентное время охлаждения полимера $t_3$ в форме в начальный $t_{k-1}$ , фиксированный $\bar{t}$ и конечный $t_k$ моменты ступени	8в (1.3)
Рассчитывают критерий Фурье $Fo$ в начальный $t_{k-1}$ , фиксированный $\bar{t}$ и конечный $t_k$ моменты ступени, подставляя $t = t_3$ в соответствующий момент	10а, 10б (1.3)
Рассчитывают среднеобъемную температуру полимера $\bar{T}$ в форме в начальный $t_{k-1}$ и конечный моменты $t_k$ ступени	7а—7з (1.3)
Рассчитывают объемную скорость течения полимера $Q$	3 (1.3)
Рассчитывают усредненную по длине формы толщину пристенного слоя $\tilde{\delta}$ в момент $\bar{t}$	5а—5г (1.3)
Рассчитывают среднеобъемную температуру потока расплава в форме $\tilde{T}$ в момент $\bar{t}$	6а—6з (1.3)
Рассчитывают скорость сдвига $\tilde{\dot{\gamma}}$ , реализуемую при течении расплава в форме	4а, 4б (1.3)
Рассчитывают коэффициент давления $K_d$ для перепада $\Delta P_{\phi}$ ; при этом $P$ задают равным $\tilde{P}_{\bar{t}}$ [уравнение (1), (2), табл. 2.5]. $K_d$ рассчитывают, если давление оказывает влияние на вязкость полимера, в противном случае $K_d = 1$ .	9а (1.3)
Рассчитывают вязкость $\eta_{\tilde{\dot{\gamma}}}$ ( $\tilde{T}$ , $V$ ) при скорости сдвига $\tilde{\dot{\gamma}}$ , температуре $\tilde{T}$ и влажности $V$ или выбирают константы $m_0$ , $E$ , $n$ реологического уравнения в форме степенного закона (в зависимости от исходных данных)	[9]
Рассчитывают перепад давлений в форме $\Delta P_{\phi}$	2а—2г (1.3)

Последовательность расчета перепада давлений в системе сопло — литниковая втулка в период нарастания давления

Операция	Номер уравнения (номер таблицы) или источник
<i>Расчет параметров формования в сопле</i>	
Рассчитывают давление на входе в сопло $P_c$	См. примечание
Рассчитывают скорость сдвига $\dot{\gamma}$ , реализуемую в сопле	5 (1.4)
Рассчитывают коэффициент давления $K_{d, вх}$ для перепада $\Delta P_{o, c}$ . $K_{d, вх}$ рассчитывают, если давление оказывает влияние на реологические свойства полимера, в противном случае $K_{d, вх} = 1$	4а (1.4)
Рассчитывают вязкость $\eta_{\dot{\gamma}}$ ( $T_0$ , $V$ ) при скорости сдвига $\dot{\gamma}$ , температуре $T_0$ и влажности $V$ или выбирают константы $m_0$ , $E$ , $n$ реологического уравнения в форме степенного закона (в зависимости от исходных данных)	[9]
Рассчитывают входные потери давления до входа в сопло $\Delta P_{o, c}$	1а, 1б (1.4)
Рассчитывают релаксирующую составляющую общих потерь давления на входном участке сопла $\Delta P_{Lc}$	2а, 3а (1.4)
Рассчитывают общие входные потери давления в сопле $\Delta P_{вх, c}$	4 (1.1)
Рассчитывают коэффициент давления $K_d$ для перепада давлений $\Delta P_{т, c}$ ; при этом давление на входе в сопло $P_c$ задают по уравнению (см. примечание к таблице), а на выходе $P_{c, вых}$ — равным давлению на входе в форму $P_{\phi, вых}$ [по уравнению (3), табл. 2.5], $\tilde{\dot{\gamma}} = \dot{\gamma}$ ( $K_d$ рассчитывают, если давление оказывает влияние на вязкость полимера, в противном случае $K_d = 1$ )	9а (1.3)
Рассчитывают перепад давлений, затрачиваемый на течение расплава в сопле $\Delta P_{т, c}$	2б, 2г (1.3)
Рассчитывают общий перепад давлений в сопле $\Delta P_c$	3 (1.1)
<i>Расчет параметров формования в литниковой втулке</i>	
Рассчитывают эквивалентное время охлаждения полимера $t_3$ в литниковой втулке в фиксированный момент $\bar{t}$ ступени	8г (1.3)
Рассчитывают критерий Фурье $Fo$ , подставляя $t = t_3$	10а, 10б (1.3)
Рассчитывают усредненную по длине литниковой втулки толщину пристенного слоя $\tilde{\delta}$	5а—5г (1.3)
Рассчитывают скорость сдвига $\tilde{\dot{\gamma}}$ , реализуемую в литниковой втулке	4а, 4б (1.3)
Рассчитывают коэффициент давления $K_d$ для перепада давлений $\Delta P_{л}$ ; при этом давление на входе в литниковую втулку $P_{л, вх}$ задают равным давлению на входе в сопло $P_c$ (см. уравнение в примечании к таблице), а на ее выходе $P_{л, вых}$ — равным давлению на входе в форму $P_{\phi, вх}$ [по уравнению (3), табл. 2.5]. $K_d$ рассчитывают, если давление оказывает влияние на вязкость полимера, в противном случае $K_d = 1$	9а (1.3)

Операция	Номер уравнения (номер таблицы) или источник
Рассчитывают вязкость $\eta_{\tilde{\gamma}}(T_0, B)$ при скорости сдвига $\tilde{\gamma}$ , температуре $T_0$ и влажности $B$ или выбирают константы $m_0, E, n$ реологического уравнения в форме степенного закона (в зависимости от исходных данных) Рассчитывают перепад давлений в литниковой втулке $\Delta P_{л}$ Рассчитывают общий перепад давлений в системе сопло — литниковая втулка $\Delta P_{с-л}$	[9]  2а—2г (1.3) 2 (1.1)

Примечание. Давление на входе в сопло  $P_c = P_{л}/K_{п}$ , где  $K_{п}$  — коэффициент потерь на первой стадии периода нарастания давления принимается равным 1,05—1,09.

или

$$H_{пл} = H_x + H_x/K_2 = H_x(1 + 1/K_2) = H_x(1 + K_3) = H_x K_4, \quad (2.126)$$

где  $K_3 = 1/K_2, K_4 = 1 + 1/K_2$ , определяют по рис. 2.6 с учетом  $D_2/D_1$ .

Если известен ход подвижной плиты, то по нему рассчитывают максимальную высоту детали, которую можно отлить на машине.

Величина возможного регулирования расстояния между плитами составляет 30—50 % максимальной высоты формы:

$$h_p = (0,3 \div 0,5) H_{\phi} = (0,3 \div 0,5) H/K_1. \quad (2.13)$$

Конструкция и размер плит. При проектировании плит выбирают число колонн, их расположение, конструкцию крепежных приспособлений и размеры центрирующих отверстий. Выбор производят на основе анализа работы действующих машин; при этом могут быть использованы приведенные в п. 2.1 рекомендации. На основе данных анализа определяют основные конструктивные решения.

Размеры плит зависят от расстояния между колоннами и их диаметра. Расстояние между колоннами можно определить следующим образом. Заданным параметром является площадь литья  $S$  (входной параметр) в виде диска (в основу расчета положен диск). Определяют диаметр этого диска, который является внутренним диаметром поверхности соприкосновения полуформ:  $D_{л} \approx \sqrt{1,27S}$ . Внешний диаметр  $D$  поверхности соприкосновения полуформ, исходя из поверхности соприкосновения  $S_{сопр}$  рассчитывают по формуле

$$D = \sqrt{4S_{сопр}/\pi + D_{л}^2}.$$

Далее определяют поверхность соприкосновения  $S_{сопр}$  полуформ, исходя из условия предотвращения их смятия при усилении запирающей формы  $F$ :

$$S_{сопр} = F/[\sigma]_{см}, \quad (2.14)$$

где  $[\sigma]_{см}$  — напряжение на смятие, принимают равным  $(60 \div 80)10^6$  Па.

Минимальное и максимальное расстояние между колоннами по горизонтали

$$a_{min} = D + 2c; \quad (2.15a)$$

$$a_{max} = a_{min} + 2m_2, \quad (2.156)$$

где  $c$  — расстояние между формой и колонной, учитывающее возможность установки формы, а также размеры втулок для колонн;  $m_2$  — припуск, учитывающий размеры центрирующих деталей.

Вертикальный размер плиты с учетом припуска  $h_{пр}$  на размеры крепежных деталей (при условии установки формы сверху) можно определить по формуле

$$H_{пл} = a_{max} + 2h_{пр}. \quad (2.16)$$

Расстояние  $b$  между колоннами по вертикали — конструктивный параметр, который приближенно можно принять равным  $1,2D_{л}$ . Размеры плит, рассчитанные по рассмотренным выше формулам, приведены в табл. 2.8. В результате подобного расчета выявляются основные факторы, влияющие на размер плит. Расчет позволяет проектировать плиты в зависимости от заданных условий, а также определить экономически обоснованные и удобные для обслуживания параметры плит.

Пластиковая способность. Продолжительность одного цикла складывается из машинного времени  $t_m$  (2.3) и технологического времени  $t_T$ :

$$t_{ц} = t_m + t_T. \quad (2.17)$$

Технологическое время  $t_T$  складывается из продолжительности выдержки полимера в форме под внешним давлением  $t_{впд}$  и продолжительности охлаждения полимера в форме без внешнего давления  $t_{охл б/д}$ :

$$t_T = t_{впд} + t_{охл б/д}. \quad (2.18)$$

Технологическое время  $t_T$ , равное продолжительности охлаждения изделия до заданной температуры в центре изделия  $T_{и}$ , при которой можно производить съем изделия, на основе математического описания теплофизических процессов при литье (см. гл. 1) можно приближенно подсчитать по уравнению: для плоского изделия при  $f = B/h > 2,5$

$$t_T = \ln [1,27(T_0 - T_{\phi})/(T_{и} - T_{\phi})] h^2/(\pi^2 \bar{a}); \quad (2.19a)$$

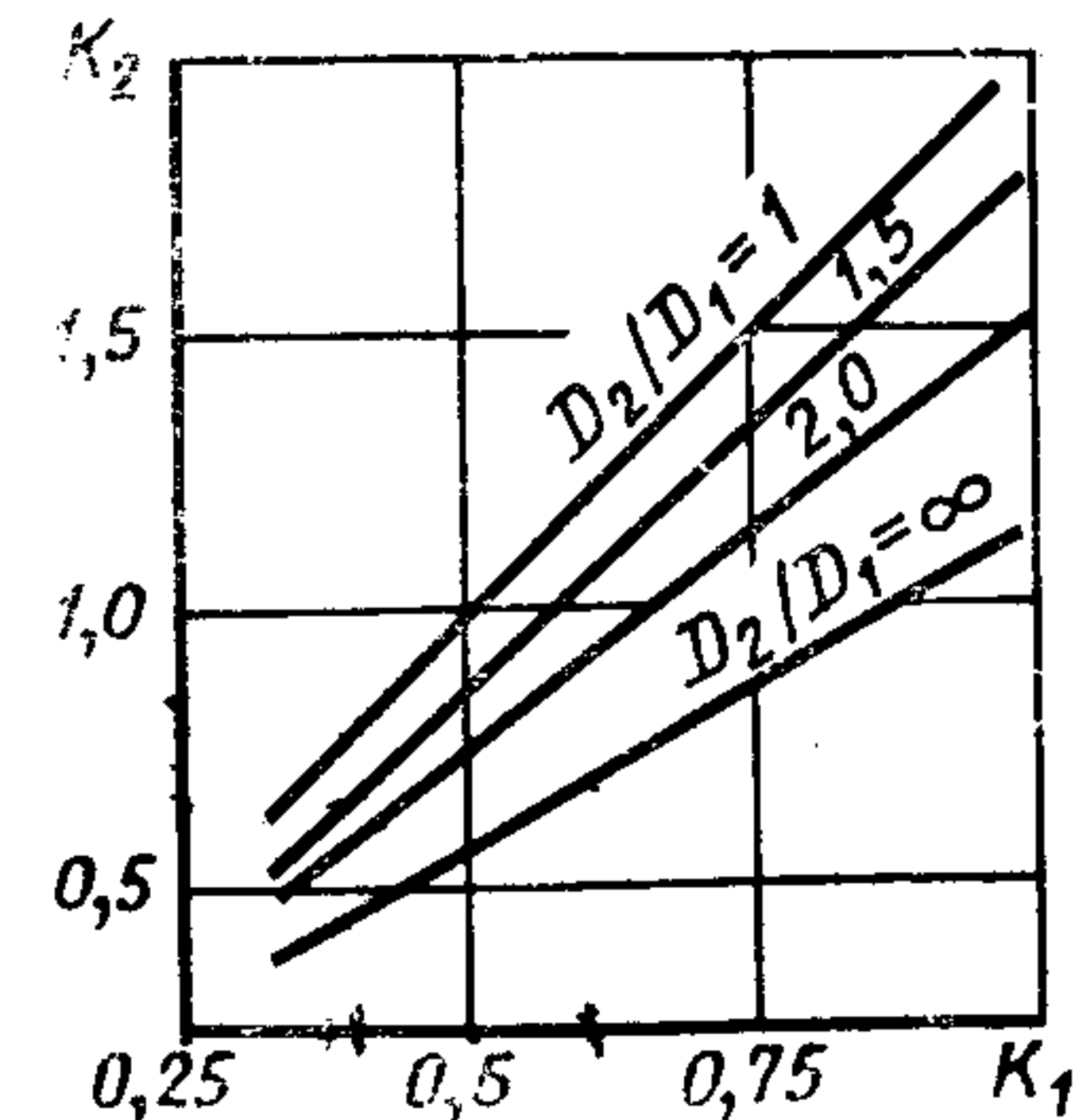


Рис. 2.6. Зависимость коэффициента  $K_2$  от коэффициента  $K_1$  при различных размерах объемной детали ( $D_2$  и  $D_1$  — максимальный и минимальный диаметры объемной детали)

Пример расчета размеров плит

Параметр	Объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup>				
	63	125	250	500	1000
Площадь литья $S \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup>	200	350	600	1000	1800
$D_{л} \cdot 10^2$ , м	16	21	27,5	35,6	48
Усилие загибания $F \cdot 10^{-4}$ , Н	60	100	180	300	500
$[\sigma]_{см} \cdot 10^{-5}$ , Па	600	600	600	600	600
$D \cdot 10^2$ , м	19,5	25,6	34,0	43,5	57,5
$c \cdot 10^2$ , м	1,5	2	2,5	2,5	3,5
$m_2 \cdot 10^2$ , м	2,5	2,5	2,5	3	3
$a_{мин} \cdot 10^2$ , м	22,5	29,6	39	48,5	64,5
$a_{max} \cdot 10^2$ , м	27,5	34,5	44	54,5	70,5
$a \cdot 10^2$ , м (принятое значение)	23,0	30,0	40,0	50,0	64,5
$h_{др} \cdot 10^2$ , м	4	5	7,5	7,5	10
$H_{пл} \cdot 10^2$ , м	35,5	44,5	59	69,5	90,5
$H_{пл} \cdot 10^2$ , м (принятое значение)	36,0	45,0	60,0	70,0	90,0
$b \cdot 10^2$ , м, не менее	16	21	28	36	48
Площадь рабочей поверхности плиты $S_p \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup>	830	1350	2400	3500	5800
Отношение площади литья к рабочей поверхности плиты, %	24,1	25,9	25	28,6	31,1
Ориентировочные размеры плиты, м	(36×38) 10 <sup>-2</sup>	(45×51) 10 <sup>-2</sup>	(60×67) 10 <sup>-2</sup>	(70×83) 10 <sup>-2</sup>	(90×109,5) 10 <sup>-2</sup>
Площадь плиты $S_{пл} \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup>	1370	2300	4000	5800	9850
Отношение рабочей поверхности плит к общей площади плит, %	60,6	58,7	60	60,3	58,8
Отношение площади литья к общей поверхности плит, %	14,6	15,2	15	17,2	18,3

для плоского изделия при  $f \leq 2,5$

$$t_T = \ln [1,27 (T_0 - T_{\phi}) / (T_{и} - T_{\phi})] h^2 f^2 / [\pi^2 \tilde{a} (1 + f^2)]; \quad (2.19б)$$

для цилиндрического изделия

$$t_T = \ln [1,6 (T_0 - T_{\phi}) / (T_{и} - T_{\phi})] r^2 / (5,76 \tilde{a}). \quad (2.19в)$$

Продолжительность цикла:

$$t_{ц} = t_{см} + t_{впр} + t_{впд} + t_{охл \ б/д} + t_{разм}, \quad (2.20)$$

где  $t_{см}$ ,  $t_{впр}$ ,  $t_{разм}$  — см. уравнение (2.3).

Продолжительность пластикации полимера:

$$t_{пл} = t_{охл \ б/д} + t_{см} + t_{разм}. \quad (2.21)$$

Обозначив  $c_1 = t_{впд} / t_T$  и  $c_2 = (t_{см} + t_{разм}) / t_T$ , а также учитывая, что  $t_{охл \ б/д} = t_T - t_{впд}$ , запишем:

$$t_{пл} = t_T - t_{впд} + t_{см} + t_{разм} = t_T - c_1 t_T + c_2 t_T = t_T (1 - c_1 + c_2); \quad (2.22)$$

$$t_{охл \ б/д} = t_T (1 - c_1). \quad (2.23)$$

Пластикационную способность машины  $q_{пл}$  (кг/ч) на основании уравнений (2.1) и (2.22) в зависимости от требуемой (подготавливаемой) массы полимера  $m$  объемом  $v$  можно рассчитать по уравнению

$$q_{пл} = 3600m / [t_T (1 - c_1 + c_2)] = 3600vp / [t_T (1 - c_1 + c_2)], \quad (2.24)$$

где  $\rho$  — плотность полимера.

Результаты расчета необходимой пластикационной способности (по полистиролу) сведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Пример расчета пластикационной способности

Параметры и коэффициенты	Объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup>						
	16	32	63	125	250	500	1000
$c_1$	0,3—0,5	0,3—0,5	0,3—0,5	0,3—0,5	0,3—0,4	0,3	0,3
$c_2$	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,11
$t_T$ , с [по формуле (2.19а)]	21	27,5	27,5	30	40	55	80
Расчетная минимально необходимая пластикационная способность $q_{пл}^*$ , кг/ч	5	7	14	25	33	43	60

\* Фактическая пластикационная способность, достигаемая на машине с тем же диаметром шнека, может превышать минимальную  $q_{пл}$  (при частоте вращения шнека примерно 60 об/мин) в 2—2,5 раза за счет повышения частоты вращения шнека (см. приложение 1).

Таблица 2.10

## Производительность литьевых машин

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

Примечание. Годовой эффективный фонд времени работы оборудования  $T = 5620 \text{ ч}$ .

Быстроходность и производительность машины. Быстроходность  $B$  машины определяется числом холостых циклов в единицу времени (за 1 ч) [уравнение (2.2)].

Число циклов машины за 1 ч  $n_{\text{час}} = 3600/t_{\text{ц}}$ . Используя выражения (2.2) и (2.17), можно записать

$$n_{\text{час}} = 3600/[t_T + (3600/B)]. \quad (2.25)$$

Число циклов машины в год при годовом эффективном фонде времени  $T$  (ч):

$$n_{\text{год}} = 3600T/[t_T + (3600/B)]. \quad (2.26)$$

Среднерасчетный объем впрыска за цикл  $v_p$  в зависимости от его номинального значения  $v$  составляет  $v_p = 0,75v$ . Тогда количество полимера, переработанного в год  $q_m$ , т. е. годовую производительность (т) можно подсчитать по уравнению

$$q_m = 2,7v_p T/[t_T + (3600/B)]. \quad (2.27)$$

В табл. 2.10 приведены расчетные значения производительности литьевых машин. Фактические значения производительности  $q_{\text{м.ф}}$  могут быть меньше расчетных  $q_{\text{м.р}}$ , так как масса изделия может составлять не только 75 % номинальной, но и меньше. Толщина деталей также может быть меньше средних значений, принятых в расчете. Производительность машины зависит от типа изделия и свойств перерабатываемого полимера. При расчете производственных мощностей следует учитывать, что

$$q_{\text{м.ф}} = kq_{\text{м.р}}, \quad (2.28)$$

где  $k = 0,4 \div 0,7$ .

Для каждого типоразмера машины фонд времени  $T$  и среднее время охлаждения отливки  $t_T$  (с усредненной толщиной) не зависят от конструктивных факторов и могут быть приняты постоянными. Тогда производительность машины определяется ее быстроходно-

стью (2.27). Увеличение быстроходности повышает производительность машины, при этом годовые эксплуатационные расходы, приходящиеся на единицу массы переработанного полимера, снижаются (см. рис. 2.7). Но начиная с определенного значения быстроходности дальнейшее ее повышение снижает эксплуатационные затраты незначительно. Это значение быстроходности и может быть выбрано в качестве параметра. Например, для литьевой машины с объемом впрыска за цикл  $63 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  при средней продолжительности технологического времени 25—35 с быстроходность можно принять равной 550 циклов/ч, что вполне оправдано, так как дальнейшее увеличение быстроходности незначительно снижает эксплуатационные затраты.

Оптимальную быстроходность машин разного типоразмера следует подбирать таким образом, чтобы динамика изменения эксплуатационных расходов была одинаковой для всех машин (т. е. дальнейшее повышение быстроходности на одно и то же значение, например на 100 циклов/ч, давало бы в среднем одинаковый процент снижения эксплуатационных расходов для всех машин). В эксплуатационные расходы каждой машины обычно входят затраты на электроэнергию для двигателей и обогревателей, на масло для гидропривода, а также расходы на амортизацию производственной площади, занимаемой машиной, расходы на текущий ремонт и амортизацию машин. Расчет указанных затрат не вызывает затруднений, поэтому здесь он не приведен.

Принимая за оптимальную быстроходность такое ее значение, при котором дальнейшее увеличение быстроходности на 100 циклов/ч приводит к снижению эксплуатационных затрат всего лишь на 2—3 %, можно скорректировать значения быстроходности существующих машин (табл. 2.11). Используя приведенные в табл. 2.10 данные и уравнение 2.27, можно определить увеличение среднегодовой производительности литьевых машин за счет увеличения их быстроходности.

При выборе быстроходности машины специального назначения нужно учитывать конкретное время охлаждения изделия (группы изделий), для изготовления которого (которых) предназначается

Таблица 2.11

## Повышение производительности литьевых машин при увеличении быстроходности

Объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6, \text{ м}^3$	Быстроходность, циклов/ч		Увеличение среднегодовой производительности, т
	существующая	оптимальная	
63	520	550	0,4
125	500	550	1
250	400	450	1,3
500	250	400	10,5
1000	200	300	11,3

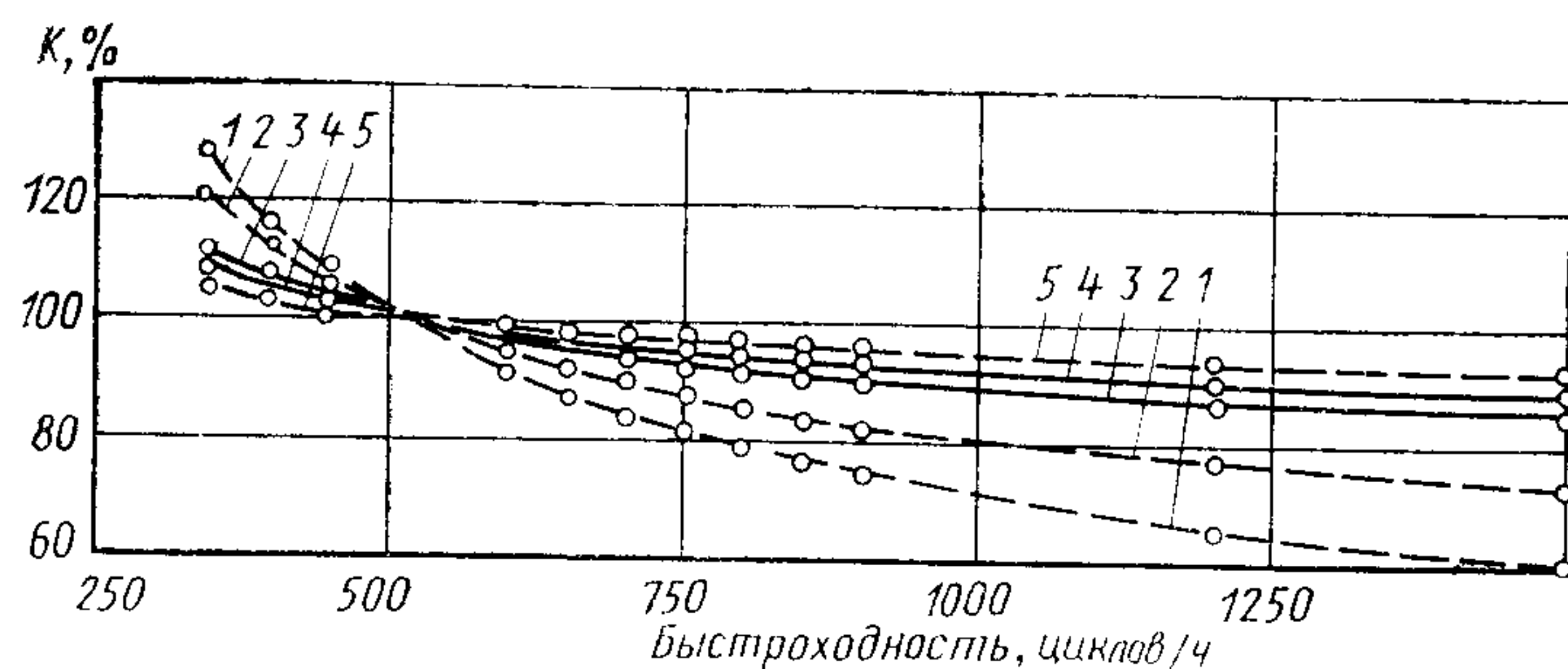


Рис. 2.7. Зависимость годовых эксплуатационных расходов  $K$  (в расчете на 1 т перерабатываемого полимера) от быстроходности литейной машины с объемом отливки  $63 \text{ см}^3$  при разном технологическом времени:

1 — 5 с, 2 — 10 с, 3 — 25 с, 4 — 25 с, 5 — 50 с. Кривые 3, 4 характеризуют эту зависимость при усредненных значениях технологического времени для данного типоразмера машины

машина. Например, если технологическое время на специальной машине с объемом впрыска за цикл  $63 \text{ см}^3$  составляет 5 с, то быстроходность машины по сравнению с ее значением, принятым для универсальной машины ( $t_T = 25 \div 35 \text{ с}$ ), целесообразно увеличить вдвое (см. рис. 2.7), так как при этом примерно в 1,5 раза уменьшаются эксплуатационные затраты.

**Систематизация параметров машин в ряду типоразмеров.** Для создания ряда литейных машин различного типоразмера с оптимальными параметрами по ряду, входные параметры  $v, S, h, H$  задаются подобными, т. е. каждый из них изменяется при переходе от одного типоразмера машины к другому с постоянными коэффициентами — критериями подобия  $\varphi, K_S, K_h, K_H$ . Входные параметры — исходные данные для расчета производных параметров литейных машин  $t_{\text{впр}}, P_{\text{л}}, F, F_p, H_x, H_{\text{пл}}, q_{\text{пл}}, B$ . Производные параметры определяются процессами, протекающими при литье. Процессы на машинах разного типоразмера протекают по одним и тем же законам и описываются одними и теми же математическими зависимостями и технико-экономическими показателями. Поэтому коэффициенты изменения производных параметров (критерии подобия) при переходе от одного типоразмера машины к другому можно усреднить и для анализа можно пользоваться средними значениями критериев подобия:  $K_t = (t_{\text{впр}})_{i+1}/(t_{\text{впр}})_i$ ;  $K_P = (P_{\text{л}})_{i+1}/(P_{\text{л}})_i$ ;  $K_F = F_{i+1}/F_i$ ;  $K_{F_p} = (F_p)_{i+1}/(F_p)_i$ ;  $K_{H_x} = (H_x)_{i+1}/(H_x)_i$ ;  $K_{H_{\text{пл}}} = (H_{\text{пл}})_{i+1}/(H_{\text{пл}})_i$ ;  $K_{H_\varphi} = (H_\varphi)_{i+1}/(H_\varphi)_i$ ;  $K_q = (q_{\text{пл}})_{i+1}/(q_{\text{пл}})_i$ ;  $K_B = B_{i+1}/B_i$ .

Средние значения критериев подобия параметров литейных машин, полученные на основе решения математической модели процессов литья, приведены в приложении 2. Критерии подобия позволяют оценить параметры всех машин в ряду, если известны параметры одной машины. Критериями подобия полезно пользоваться для сопоставительного анализа параметров различных рядов машин.

Анализ влияния входных параметров на производные параметры

машины, на показатели технико-экономического уровня машины (масса, энергоемкость и др.), а также на критерии оптимизации параметров машин всего ряда (уровень капитальных, проведенных или эксплуатационных затрат, масса совокупности всех машин и др.) удобно производить по простым эмпирическим выражениям, экстраполирующим зависимости параметров от одного исходного входного параметра, например, от объема впрыска за цикл; пример таких зависимостей для определенного ряда машин приведен в приложении 2.

**Оптимизация параметров литейных машин.** Оптимизация параметров литейных машин производится анализом параметров системы более высокого порядка. Для литейных машин системой более высокого порядка может служить совокупность литейных машин всего ряда совместно с изделиями, изготовляемыми на них. При этом должно быть равновесие между потребностью в различных изделиях и характеристиками совокупности машин для рационального изготовления изделий. Потребность продукции различного ассортимента — проявление внешней среды. Вся совокупность машин должна оптимально приспособляться к этим проявлениям внешней среды.

Критериями оптимизации параметров машин всего ряда может служить уровень капитальных затрат, необходимых для создания нужного количества машин, или эксплуатационных (приведенных) затрат на их эксплуатацию. Однако уровень эксплуатационных затрат не определяется только параметрами машин непосредственно, так как при одних и тех же параметрах трудоемкость обслуживания объекта может быть разной. Это нужно учитывать при составлении соответствующих уравнений для проведения расчетных операций при оптимизации параметров. Капитальные затраты можно связывать с единицами массы объекта, поскольку в ряде случаев правильно оценивать в группе однотипных машин единицу их массы в рублях, поэтому одним из возможных может быть вариант оптимизации по капитальным затратам.

Уровень эксплуатационных затрат зависит от энергоемкости. Энергоемкость зависит от параметров машин. Поэтому по эксплуатационным затратам также можно проводить оптимизацию в дополнение к расчету по капитальным затратам.

Оптимизацию системы проектируемых литейных машин можно проводить по критерию  $T$ , который представляет собой отношение количества переработанного полимера  $\Pi$  (т) к стоимости  $C$  (руб.) машины для его переработки, т. е.  $T = \Pi/C$ . При оптимизации находят максимум этого критерия. При этом следует учитывать, что  $\Pi$  — величина заданная и постоянная. В этих условиях задачу можно заменить нахождение минимума функции  $C$ . Учитывая, что капитальные затраты можно связывать с единицами массы объекта, вместо  $C$  можно принять массу всей совокупности машин  $m$ , допуская, что уровень автоматизации и механизации различных машин по типоразмерам одинаков.

Оптимальные значения функции  $m$  находят с учетом распределения потребности в деталях различного типоразмера. Для оптимизации пара-

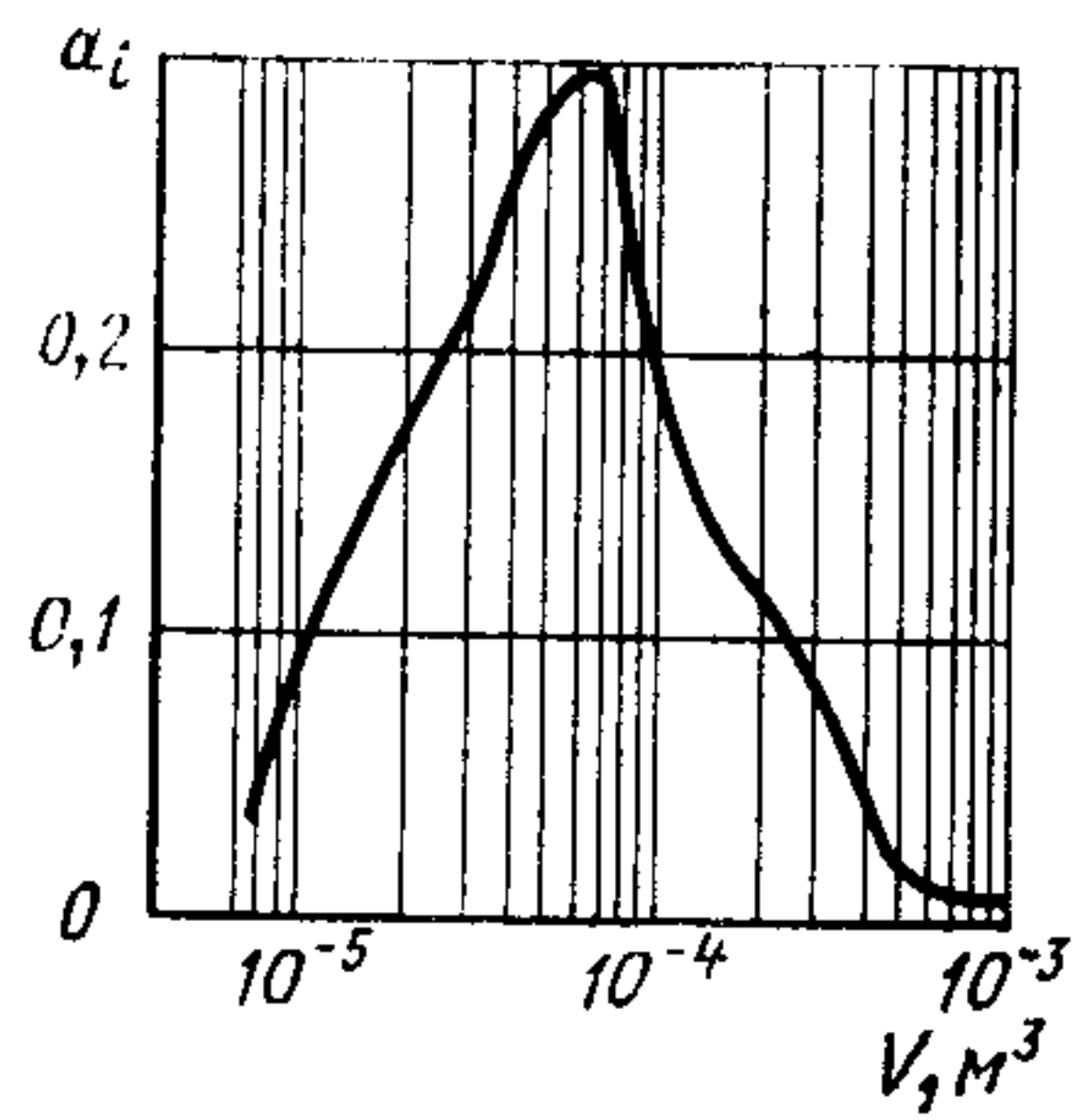


Рис. 2.8. Кривая распределения состава машин по типоразмеру

метров машин можно использовать функцию распределения состава машин по типоразмеру (рис. 2.8), которая представляет собой функцию, характеризующую отношение  $a_i$  количества машин данного типоразмера к общему количеству машин и отражает структуру ассортимента деталей (кривая распределения состава машин по типоразмеру, характеризуемому объемом впрыска за цикл  $v$ ).

Таким образом, задачу создания ряда литьевых машин с оптимальными параметрами можно свести к нахождению минимума функции массы  $m$  всей совокупности

машин ряда, т. е.  $m_{\min} = \sum_{i=1}^n y_i$ , где  $y_i$  масса  $i$ -й машины, при заданной функции распределения состава машин по типоразмеру (см. рис. 2.8).

Анализ параметров литьевых машин показывает, что объект можно описать параметрами, выраженными через соотношения исходных параметров  $x_1, x_2, x_3, \dots$ , например:  $x_1, x_2, x_3, \dots, k_1x_1, k_2x_2, \dots, k_nx_2, \dots, k_nx_3, \dots$ . В этом случае зависимость массы машины  $m_i = y_i$  может быть записана в виде

$$y_i = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4k_1x_1 + \dots + a_ik_ix_i \text{ или}$$

$$y_i = x_1(a_1 + a_4k_1 + \dots) + x_2(a_2 + a_5k_2 + \dots) + x_3(\dots) + \dots$$

Задачу оптимизации параметров литьевых машин можно упростить с привлечением зависимости массы машины от типоразмера, характеризуемого объемом впрыска за цикл (рис. 2.9). По этой графической зависимости удобно определять массу машин различного типоразмера:

$$y_1 = Ax_1;$$

$$y_2 = A'x_1\varphi;$$

$$y_n = A''x_1\varphi^{n-1}.$$

Из этих уравнений следует, что масса совокупности всех машин ряда зависит от коэффициента  $\varphi$ . При малом значении коэффициента  $\varphi$  необходимо создавать большое количество моделей, в связи с чем завышается общее число машин ряда и увеличивается масса всей совокупности машин. Если коэффициент  $\varphi$  велик, то это приводит к созданию малого количества типоразмеров машин и к нерациональной их загрузке, т. е. относительно большое число более тяжелых машин будет нерационально использоваться для изготовления легких деталей. При заданной функции распределения потребности в деталях завышается масса всей совокупности машин ряда.

Таким образом, задача оптимизации параметров литьевых машин сводится к нахождению коэффициента  $\varphi$ , оптимизирующего функцию массы всех машин  $m$  в заданной области объема впрыска за цикл (например, 1—1000 см<sup>3</sup>) при заданной функции распределения состава оборудования по типоразмеру, т. е. находится такое значение коэффициента  $\varphi$ , при котором функция  $m = \sum_{i=1}^n y_i$  имеет минимумы.

Оптимальное значение коэффициента  $\varphi$  определяют в следующей последовательности:

задают ряд значений коэффициента  $\varphi$ :  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k$ ;

для каждого заданного значения коэффициента  $\varphi$  в заданном диапазоне объема впрыска за цикл (например, 1—1000 см<sup>3</sup>) определяют входные и производные параметры, а также массу машины каждого типоразмера;

при каждом заданном значении коэффициента  $\varphi$  по функции распределения состава машин по типоразмеру (см. рис. 2.7) для каждого типоразмера машин определяют значение  $a_i$ ;

для каждого значения коэффициента  $\varphi$  определяют массу  $m$  совокупности машин всего ряда (в относительных единицах, т. е. массу, отнесенную к общему количеству машин)  $m = \sum_{i=1}^n y_ia_i$ ;

строят графическую зависимость массы совокупности всех машин ряда от коэффициента  $\varphi$  (рис. 2.10). По этой зависимости определяют область оптимального значения коэффициента  $\varphi$ .

Допустимое значение коэффициента  $\varphi$  находится в интервале 1,5—3, что позволяет дать рекомендации для создания гаммы литьевых машин. Возможность изменения коэффициента  $\varphi$  от 1,5 до 3 не выходит за пределы экономической целесообразности. По технико-экономическим показателям машин можно обосновать целесооб-

разность создания ряда прессовых узлов по верхнему пределу  $\varphi = 3$  и модификацию инжекционных узлов к ним по нижнему пределу  $\varphi = 1,5$ .

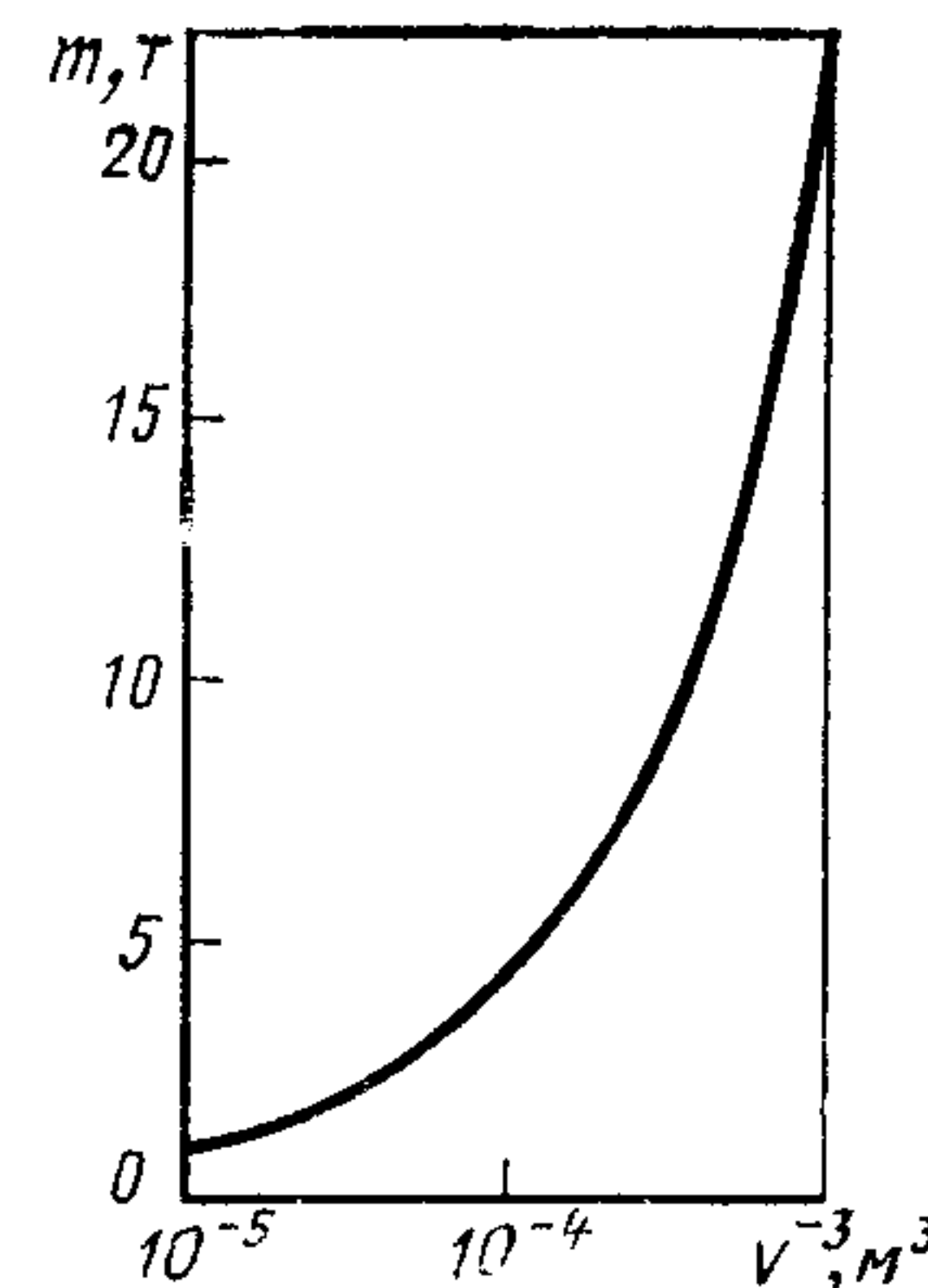


Рис. 2.9. Зависимость массы машины  $m$  от объема впрыска за цикл  $v$

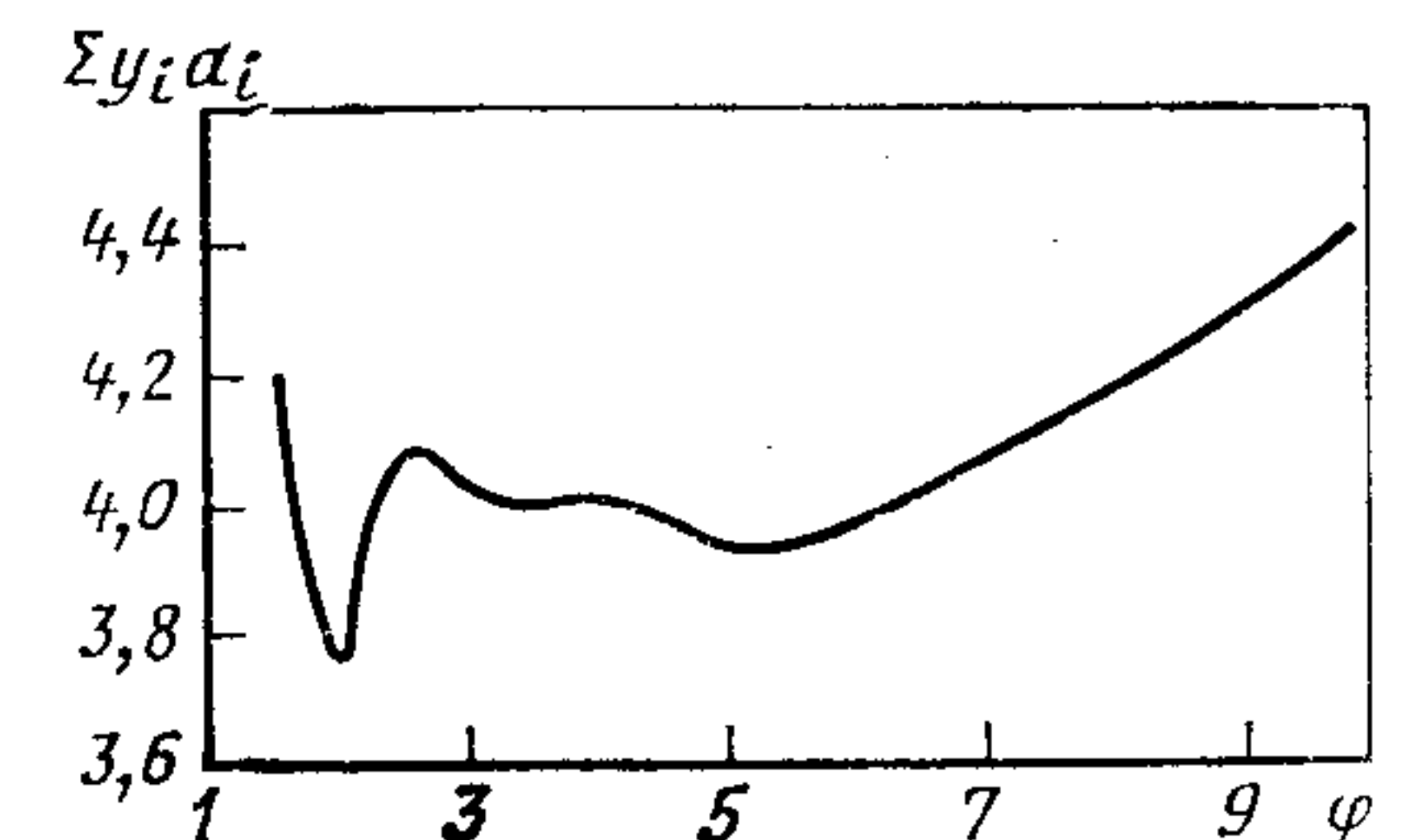


Рис. 2.10. Зависимость массы совокупности машин ряда (в относительных единицах)  $\sum y_ia_i$  от коэффициента  $\varphi$



## 2.3. ВЫБОР ТИПОРАЗМЕРА ЛИТЬЕВОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Перед изготовлением изделий выбирают типоразмер литейной машины, позволяющей рационально получать изделия заданных размеров при требуемых режимах переработки и при этом эффективно использовать технико-экономические возможности машины. Типоразмер литейной машины выбирают с учетом следующих основных параметров: объема впрыска за цикл  $v$ ; высоты изделия  $H$ ; проекции поверхности изделия на плоскость разъема формы  $S$  (площадь отливки); давления литья  $P_{л.}$ , необходимого для заполнения литниковой системы и формы; усилия, возникающего в форме в процессе формования  $F_{ф.}$ ; продолжительности охлаждения отливки до заданной температуры, при которой ее можно извлечь из формы ( $t_{т.}$  определяет пластикационную способность).

**Выбор по объему впрыска за цикл.** Объем впрыска за цикл  $v$ , требуемый для изготовления изделия (изделий в случае многогнездной формы), можно подсчитать по формуле

$$v = (v_{изд}n + v_{л. с}) K_{ут.1} K_{сж}, \quad (2.29)$$

где  $v_{изд}$  — объем изделия;  $n$  — предполагаемое число гнезд в форме;  $v_{л. с}$  — предполагаемый объем литниковой системы  $K_{ут.1}$ ,  $K_{сж}$  — см. обозначения к уравнению (2.6); можно приближенно принять  $K_{ут.1} K_{сж} = k$  (см. табл. 3.9).

Требуемый объем впрыска за цикл  $v$  для изготовления изделия (изделий) заданных размеров не должен превышать номинального объема впрыска за цикл  $v_{н.}$  выбираемого типоразмера машины (паспортная характеристика машины).

**Выбор по высоте изделия.** Высота изделия  $H$  определяет высоту формы  $H_{ф.}$ , которую нужно установить на литейной машине для изготовления изделий, и ход подвижной плиты  $H_{х.}$ , обеспечивающий съем изделий данной высоты  $H$ .

Высоту формы  $H_{ф.}$  для получения изделий заданной высоты  $H$  можно определить по формуле (2.10). Ход подвижной плиты  $H_{х.}$ , обеспечивающий съем изделий заданной высоты  $H$ , можно определить по уравнению (2.11). Требуемая высота формы  $H_{ф.}$  для получения изделий заданной высоты  $H$  не должна превышать номинальную высоту формы  $H_{ф. н.}$ , которую можно установить на выбираемом типоразмере машины (паспортная характеристика машины). Требуемый ход подвижной плиты  $H_{х.}$ , обеспечивающий съем изделий заданной высоты  $H$ , не должен превышать номинальный ход подвижной плиты  $H_{х. н.}$ , реализуемой на выбираемом типоразмере машины (паспортная характеристика машины).

**Выбор по площади литья.** Площадь литья  $S$  изделия определяет необходимую площадь литейной формы, что в свою очередь, определяет необходимую площадь плиты между колоннами (рабочую площадь), и усилие, требуемое для запирания формы (выбор по усилию запирания приведен ниже).

Поверхность соприкосновения  $S_{сопр}$  полуформ, необходимую для предотвращения их смятия при усилии запирания  $F$ , можно опре-

делить по уравнению (2.14). По площади литья  $S$  и поверхности соприкосновения  $S_{сопр}$  полуформ можно подсчитать необходимую площадь замыкания литейной формы  $S_{зам} = S + S_{сопр}$ . Исходя из площади  $S_{зам}$  и конфигурации формы, можно определить габаритный размер формы  $a_{ф.}$  по горизонтали между колоннами. Габаритный размер формы  $a_{ф.}$  позволяет определить необходимое расстояние между колоннами:

$$a_{к.} = a_{ф.} + 2c + 2m_2, \quad (2.30)$$

где  $c$  и  $m_2$  — см. обозначения к уравнению (2.15).

Расстояние между колоннами  $a_{к.}$ , необходимое для установки формы с заданной площадью литья  $S$ , не должно превышать номинальное расстояние между колоннами  $a_{к. н.}$  выбираемого типоразмера машины (паспортная характеристика машины).

**Выбор по давлению литья.** Давление литья  $P_{л.}$  (устанавливают в гидроприводе машины), необходимое для заполнения системы сопло—форма (литниковой системы и формы) в режиме постоянной объемной скорости течения (для обеспечения стабильности свойств изделий по длине и получаемых в разных циклах) при требуемых параметрах переработки (температура полимера  $T_0$  и температура формы  $T_{ф.}$ ) можно определить по уравнению (2.7).

Требуемое давление литья  $P_{л.}$  для заполнения литниковой системы и формы конкретных размеров при заданных параметрах переработки не должно превышать номинальное давление литья  $P_{л. н.}$  выбираемого типоразмера машины (паспортная характеристика машины).

**Выбор по усилию, возникающему в форме (по усилию запирания формы).** Усилие, возникающее в форме при литье  $F_{ф.}$ , можно рассчитать по уравнению

$$F_{ф.} = P_{ср} S, \quad (2.31)$$

где  $P_{ср}$  и  $S$  — см. обозначения к уравнению (2.8).

Конструкция литейной машины может обеспечивать или не обеспечивать возможность применения режима формования со сбросом давления (см. п. 4.2 и 4.4). Если конструкция литейной машины позволяет применять режим формования со сбросом давления, то усилие  $F_{ф.}$  рассчитывают (2.31) по среднему давлению в форме  $P_{ср.}$  развивающемуся в момент окончания ее заполнения. Если конструкция литейной машины не позволяет применять режим формования со сбросом давления, то усилие  $F_{ф.}$  рассчитывают [см. уравнение (2.31)] по максимальному среднему давлению в форме  $P_{ср.}$ , которое развивается при литье, т. е. по  $P_{ср.}$  в момент развития в системе максимальных усилий. Порядок расчета среднего давления в форме  $P_{ср.}$  в момент окончания ее заполнения и в момент развития в системе максимальных усилий приведен в п. 2.2 (подраздел «Усилие запирания формы»).

Усилие, возникающее в форме при литье  $F_{ф.}$  не должно превышать номинальное усилие запирания формы  $F_{н.}$  выбираемого типоразмера машины (паспортная характеристика машины) с учетом коэффици-

Данные для определения количества литьевых машин для переработки 10<sup>3</sup> т/год полимеров

Литьевые машины с объемом впрыска за цикл $v \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup>	Годовая производительность одной машины (по полистиролу) $q_i$ , т	Отношение числа машин данного типоразмера к общему количеству машин $a_i$	Условная годовая производительность машин одного типоразмера (по полистиролу) $q_i a_i$ , т	Количество машин данного типоразмера $X_i$ для переработки 10 <sup>3</sup> т/год		Выработка годовой продукции на машинах одного типоразмера (по полистиролу), т	
				полистирола, полиолефинов, поливинилхлорида	полиамида, поликарбоната, полиформальдегида	$q_i X_i$	$q_i^2 X_i$
8	5,6	0,05	0,280	2,36	3,37	13,2	73
16	8,4	0,15	1,260	7,06	10,08	59,25	500
32	10	0,22	2,200	10,36	14,8	103,6	1 036
63	19,6	0,3	5,880	14,1	20,1	276,0	5 403
125	33,7	0,15	5,055	7,06	10,08	237,25	8 050
250	45	0,1	4,500	4,7	6,7	212	9 500
500	61,8	0,02	1,236	0,94	1,34	58	3 580
1000	84,3	0,01	0,843	0,48	0,68	40,5	3 400
Итого			21,154	47		1000	31 542

ента запаса, т. е.  $F_{\phi} \leq F_n K_{\text{зап}}$  ( $K_{\text{зап}}$  принимают равным 0,9). Это исключает раскрытие формы при литье.

**Выбор по продолжительности охлаждения отливки (по пластикационной способности).** Продолжительность охлаждения отливки  $t_T$  заданной толщины  $h$  (радиуса  $r$ ) до температуры  $T_{\text{и}}$ , при которой ее можно извлечь из литьевой формы, определяют по уравнению (2.19).

Пластикационную способность  $q_{\text{пл}}$ , обеспечивающую необходимую продолжительность охлаждения отливки (технологического времени), можно подсчитать по уравнению (2.24). Требуемая пластикационная способность  $q_{\text{пл}}$  для обеспечения необходимой продолжительности охлаждения отливки  $t_T$  заданных размеров не должна превышать пластикационную способность  $(q_{\text{пл}})_n$  выбираемого типоразмера машины (паспортная характеристика машины).

## 2.4. ВЫБОР КОЛИЧЕСТВА ЛИТЬЕВЫХ МАШИН ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

Проектирование литьевых участков заданной мощности по объему выпускаемой продукции требует правильного выбора количества литьевых машин для обеспечения рациональной загрузки машин и их высокой производительности. Выработка в год (годовая производительность)  $\bar{q}_i$  (в т) совокупности литьевых машин данного типоразмера ( $i$ ) с учетом годовой производительности одной машины  $q_i$  (т) составляет:

$$\bar{q}_i = q_i a_i X, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (2.32)$$

где  $a_i$  — отношение числа литьевых машин данного типоразмера к общему количеству машин  $X$ ; функция распределения  $a_i$  в зависимости от типоразмера машин, характеризуемого объемом впрыска за цикл, приведена на рис. 2.8.

Производительность одной машины  $q_i$  характеризуется количеством выработанной продукции с учетом простоев машины (расчет приведен в п. 2.2). Производительность литьевых машин разного типоразмера по полистиролу  $q_i$  приведена в табл. 2.12. Производительность при переработке других полимеров можно определить с помощью поправочных коэффициентов  $b$  по отношению к полистиролу. Для поливинилхлорида, полиолефинов  $b = 1$ , для полиамида, поликарбоната, полиформальдегида  $b = 0,7$ , для терморезистивных материалов  $b = 0,6$ .

Суммарная годовая производительность  $q_{\Sigma}$  (т) всей совокупности машин составляет:

$$q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \bar{q}_i = X \sum_{i=1}^n q_i a_i. \quad (2.33)$$

Суммарное количество литьевых машин, которое требуется для обеспечения планируемого годового объема переработки полимеров  $Q_n$  (т), составляет:

$$X = Q_n / \sum_{i=1}^n q_i a_i. \quad (2.34)$$

Число литьевых машин каждого типоразмера с учетом отношения (см. рис. 2.7), составляет:

$$X_i = a_i X. \quad (2.35)$$

Пример расчета количества литьевых машин по типоразмеру для переработки 10<sup>3</sup> т/год полимеров приведен в табл. 2.12.

## 2.5. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СОВОКУПНОСТИ ЛИТЬЕВЫХ МАШИН

Эффективность литьевых производств часто оценивают производительностью совокупности машин, обслуживающих эти производства. При этом рассматривают среднюю производительность (среднюю по цеху, предприятию, отрасли, стране, определяемую отношением количества переработанного материала в тоннах за год к общему количеству машин. Однако производительность большой совокупности машин нельзя рассматривать без учета дифференциации машин по типоразмерам, которые отличаются по производительности. Состав машин по типоразмерам существенно влияет на среднюю производительность всей совокупности машин.

Увеличение доли машин с большими объемами впрыска за цикл, которые имеют более высокую производительность, приводит к повышению средней производительности совокупности машин при одинаковой производительности однотипных типоразмеров (табл. 2.13).

Для анализа производительности совокупности машин необходимо учитывать кривую распределения состава машин по типораз-

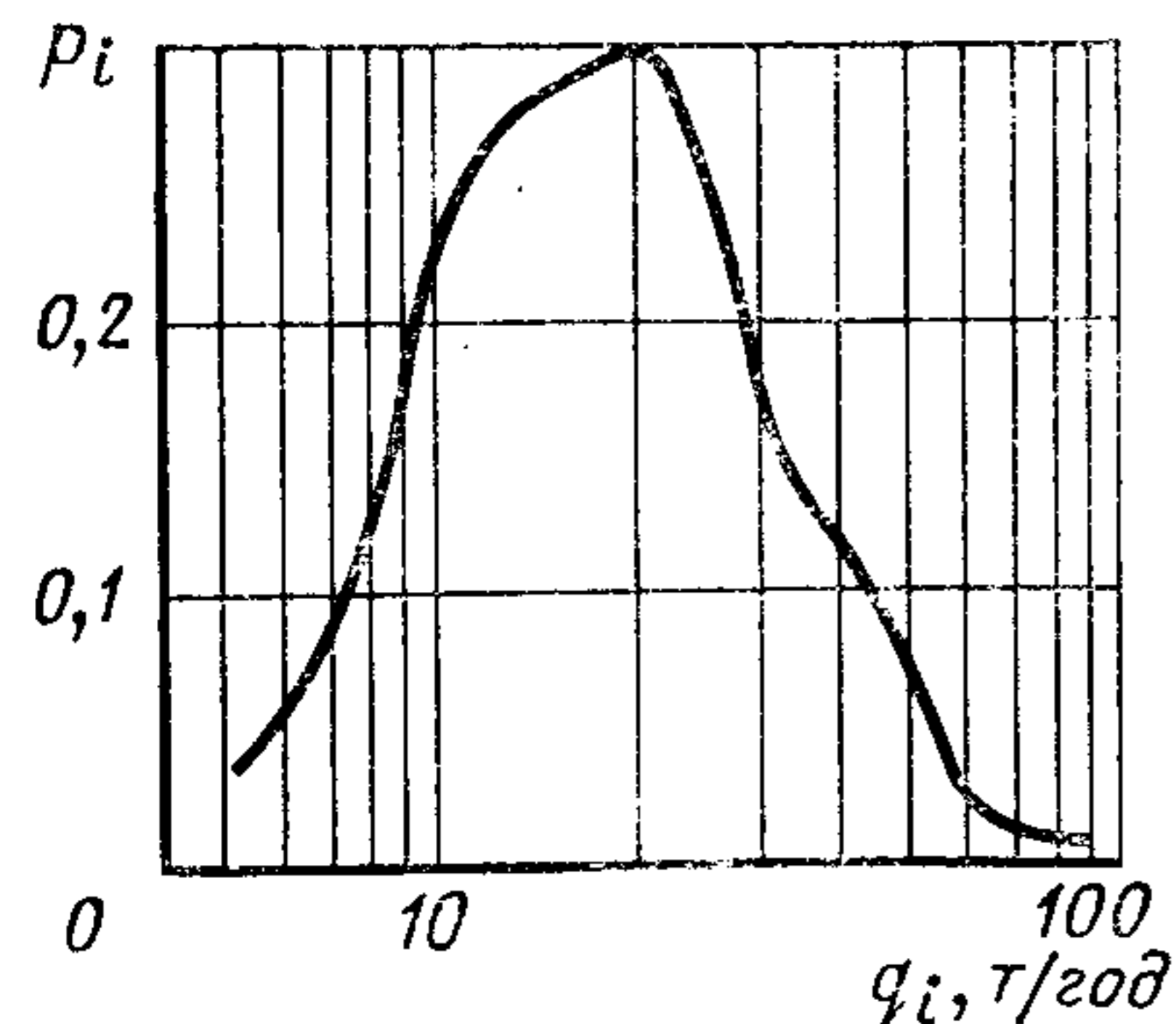
Таблица 2.13

## Расчет количества литьевых машин по типоразмерам

Литьевые машины с объемом впрыска за цикл до $\nu \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup>	Годовая производительность одной машины (по полистиролу) $q_i$ , т	Отношение количества машин по типоразмеру к общему количеству машин $a_i$		Условная годовая производительность машин одного типоразмера (по полистиролу)	
		1 *	2 **	1 *	2 **
8	5,6	0,05	—	0,28	—
16	8,4	0,15	—	1,26	—
32	10	0,20	—	2,2	—
63	19,6	0,30	—	5,88	—
70	21,1	—	0,127	—	2,26
125	33,7	0,15	—	5,05	—
200	40,5	—	0,326	—	12,4
250	45	0,10	—	4,5	—
280	47	—	0,22	—	9,4
500	61,8	0,02	0,18	1,236	10,8
800	75,3	—	0,07	—	4,95
1000	84,3	0,01	—	0,843	—
1500	100	—	0,09	—	8,9
Средняя производительность одной машины	—	—	—	21,249	48,71

\* Вариант распределения состава машин по типоразмеру, взятый для примера расчета.  
 \*\* Вариант для распределения состава машин в США.

меру, т. е. функцию, характеризующую отношение числа машин данного типоразмера (объема впрыска за цикл) к общему количеству машин  $a_i$  в зависимости от типоразмера машин (объема впрыска за цикл) (см. рис. 2.7), и вытекающую из нее кривую распределения состава машин по производительности, т. е. функцию, характеризующую отношение числа машин данной производительности к общему количеству машин  $p_i$  в зависимости от производительности (рис. 2.11)



Производительность совокупности машин характеризуется средними значениями. В зависимости от способа усреднения функции распределения состава машин по производительности различают: среднечисловую производительность  $\bar{q}_n$  и среднеобъемную производительность  $\bar{q}_v$  совокупности машин, значения которых с помощью кривой распределения состава машин по произ-

Рис. 2.11. Кривая распределения состава машин по производительности

водительности определяют по формулам

$$\bar{q}_n = \frac{\sum_{i=1}^X q_i X_i}{\sum_{i=1}^X X_i} = \sum_{i=1}^X q_i p_i; \quad (2.36)$$

$$\bar{q}_v = \frac{\sum_{i=1}^X q_i^2 X_i}{\sum_{i=1}^X q_i X_i}, \quad (2.37)$$

где  $X_i$  — количество машин с производительностью  $q_i$ ;  $X_i = p_i X$ .

По данным табл. 2.13,  $\bar{q}_v/\bar{q}_n = 1,48$  для варианта 1\* и  $\bar{q}_v/\bar{q}_n = 1,15$  для варианта 2\*\*.

Производительность машин с малыми объемами впрыска за цикл (низкой производительностью) вносит относительно большой вклад в среднечисловую производительность  $\bar{q}_n$  совокупности машин, а производительность машины с большими объемами впрыска за цикл (высокой производительностью) — в среднеобъемную производительность  $\bar{q}_v$ . Чем шире распределение состава машин по производительности, тем больше различаются  $\bar{q}_v$  и  $\bar{q}_n$ . Отношение  $\bar{q}_v/\bar{q}_n$  служит характеристикой ширины функции распределения состава машин по производительности.

Производительность машин различных производств можно сравнивать по средним значениям производительности  $\bar{q}_n$  или  $\bar{q}_v$  в том случае, если функции распределения состава машин в этих производствах близки между собой, т. е. характеризуются близкими отношениями  $\bar{q}_v/\bar{q}_n$ . В противном случае при анализе производительности совокупности машин учитывают две характеристики:  $\bar{q}_n$  (или  $\bar{q}_v$ ) и отношение  $\bar{q}_v/\bar{q}_n$ .

## 2.6. СРАВНЕНИЕ МАШИН ПО ПАРАМЕТРАМ

При выборе модели машины при ее покупке или на ранних стадиях проектирования машины следует оценить технико-экономический уровень определенной модели машины в сравнении с другими. Это можно осуществить при сравнении параметров анализируемой машины с параметрами других однотипных машин. Такое сравнение основано на том, что технико-экономические показатели машины связаны с ее входными и производными параметрами.

Для оценки технико-экономического уровня машины подбирают группу аналогичных машин по типоразмеру, назначению и др. (машины могут быть изготовлены различными заводами и фирмами).

Далее составляют таблицу параметров (табл. 2.14) выбранных моделей машин. Параметры, характеризующие возможность получения различного ассортимента изделий и обеспечивающие различные технологические режимы их изготовления, считают параметрами факториального признака. Принятую технико-экономическую характеристику машины (масса, энергоемкость, цена и т. д.) считают параметром результирующего признака.

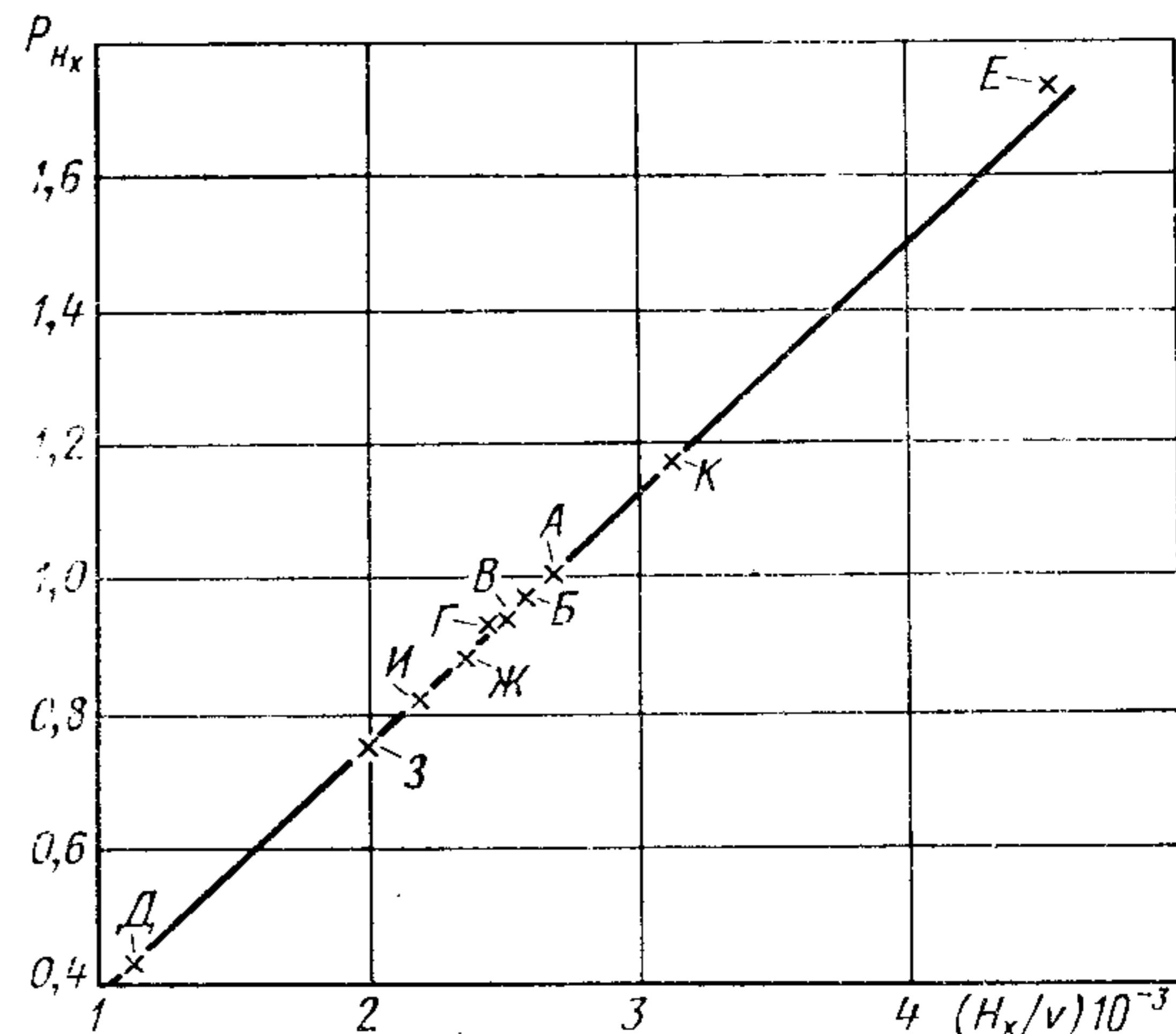
Численные значения параметров факториального и результирующего признака нормируют по исходному входному параметру, обычно по объему впрыска за цикл (см. табл. 2.14). Нормированные

Оценка технико-экономического уровня машины

Модель машины	Параметры					Характеристические коэффициенты					Параметрические коэффициенты факториального признака				Сумма параметрических коэффициентов					
	факториального признака					результурующего признака					факториального признака				результурующего признака					
	$v \cdot 10^4, \text{ м}^3$	$H^x \cdot 10^3, \text{ м}$	$H_{пл} \cdot 10^3, \text{ м}$	$S_H \cdot 10^4, \text{ м}^2$	$F, \text{ кН}$	$m, \text{ кг}$	$\varepsilon_{-01} \cdot 10^{-1}$	$\varepsilon_{-01} \cdot 10^{-2}$	$\varepsilon_{-01} \cdot 10^{-3}$	$\varepsilon_{-01} \cdot 10^{-4}$	$\varepsilon_{-01} \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_{-01} \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_{-01} \cdot 10^{-7}$	$\varepsilon_{-01} \cdot 10^{-8}$	$\varepsilon_{-01} \cdot 10^{-9}$	$\varepsilon_{-01} \cdot 10^{-10}$	$\varepsilon_{-01} \cdot 10^{-11}$	$\varepsilon_{-01} \cdot 10^{-12}$	$\varepsilon_{-01} \cdot 10^{-13}$	
А	125	330	660	900	1000	6500	2,64	5,28	7,2	8	52	2,64	5,28	7,2	8	52	1	1	1	4
Б	125	320	640	1280	1000	6000	2,56	5,12	10,2	8	48	2,56	5,12	10,2	8	48	1,416	1	1	4,356
В	126	320	600	726	900	4000	2,54	4,76	5,76	7	31,7	2,54	4,76	5,76	7	31,7	0,8	0,875	0,875	3,535
Г	130	320	680	942	1000	4400	2,46	5,23	7,24	7,7	33,85	2,46	5,23	7,24	7,7	33,85	1	0,962	0,962	3,882
Д	125	140	300	900	1000	3300	1,12	2,4	7,2	8	26,4	1,12	2,4	7,2	8	26,4	1	1	1	2,878
Е	110	500	850	875	1000	3500	4,54	7,7	7,95	9	31,8	4,54	7,7	7,95	9	31,8	1,1	1,125	1,125	5,405
Ж	138	325	650	1024	710	2800	2,35	4,7	7,4	5	20,3	2,35	4,7	7,4	5	20,3	1,03	0,625	0,625	3,435
З	119	240	640	900	600	2600	2,02	5,37	7,56	5	21,85	2,02	5,37	7,56	5	21,85	1,05	0,625	0,625	3,460
И	119	260	560	829,4	650	2200	2,18	4,7	6,97	5,46	18,5	2,18	4,7	6,97	5,46	18,5	0,89	0,968	0,968	3,364
К	115	360	510	756	300	2500	3,13	4,43	6,57	2,6	21,7	3,13	4,43	6,57	2,6	21,7	0,91	0,325	0,325	3,260

Обозначения:  $v$  — объем впрыска за цикл;  $H_x$  — ход подвижной плиты;  $H_{пл}$  — максимальное расстояние между плитами;  $S_H$  — площадь плиты между колоннами;  $F$  — усилие загибания формы;  $m$  — масса машины.

Рис. 2.12. Зависимость параметрического коэффициента хода подвижной плиты  $P_{H_x}$  от характеристического коэффициента этого параметра  $H_x/v$  для различных моделей машин (см. табл. 2.14)



значения называют характеристическими коэффициентами соответственно факториального и результирующего признака.

Характеристические коэффициенты факториального признака выбранных для сравнения машин нормируют по соответствующим (одноименным) характеристическим коэффициентам анализируемой машины А (см. табл. 2.14). Эти нормированные отношения называют параметрическими коэффициентами факториального признака. Параметрические коэффициенты анализируемой машины А равны единице. Для анализа параметров машин и накопления статистических данных полезны графические зависимости параметрических коэффициентов от соответствующих (одноименных) характеристических коэффициентов, построенные по данным для различных машин (рис. 2.12).

Параметры на технико-экономический показатель машины влияют совокупно, поэтому находят сумму параметрических коэффициентов факториального признака для каждой машины ( $\sum p$ ). Технико-экономический показатель машины зависит от ее параметров, поэтому можно построить графическую зависимость характеристического коэффициента результирующего признака ( $y = m/v$ ) от суммы параметрических коэффициентов факториального признака  $x = \sum p$  (рис. 2.13). Эту графическую зависимость можно описать выражением:  $y = Ax$ . Коэффициент А определяется по уравнению

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2},$$

где  $i$  — индекс машины;  $n$  — суммарное число выбранных машин;  $x_i$  — сумма параметрических коэффициентов факториального признака  $i$ -й машины ( $x_i = \sum p$ );  $y_i$  — характеристический коэффициент результирующего признака  $i$ -й машины;  $y_i = m_i/v_i$ .

Для оценки технико-экономического уровня анализируемой машины определяют среднюю квадратическую погрешность зависимости  $y = Ax$ :

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i)^2}{n}}.$$

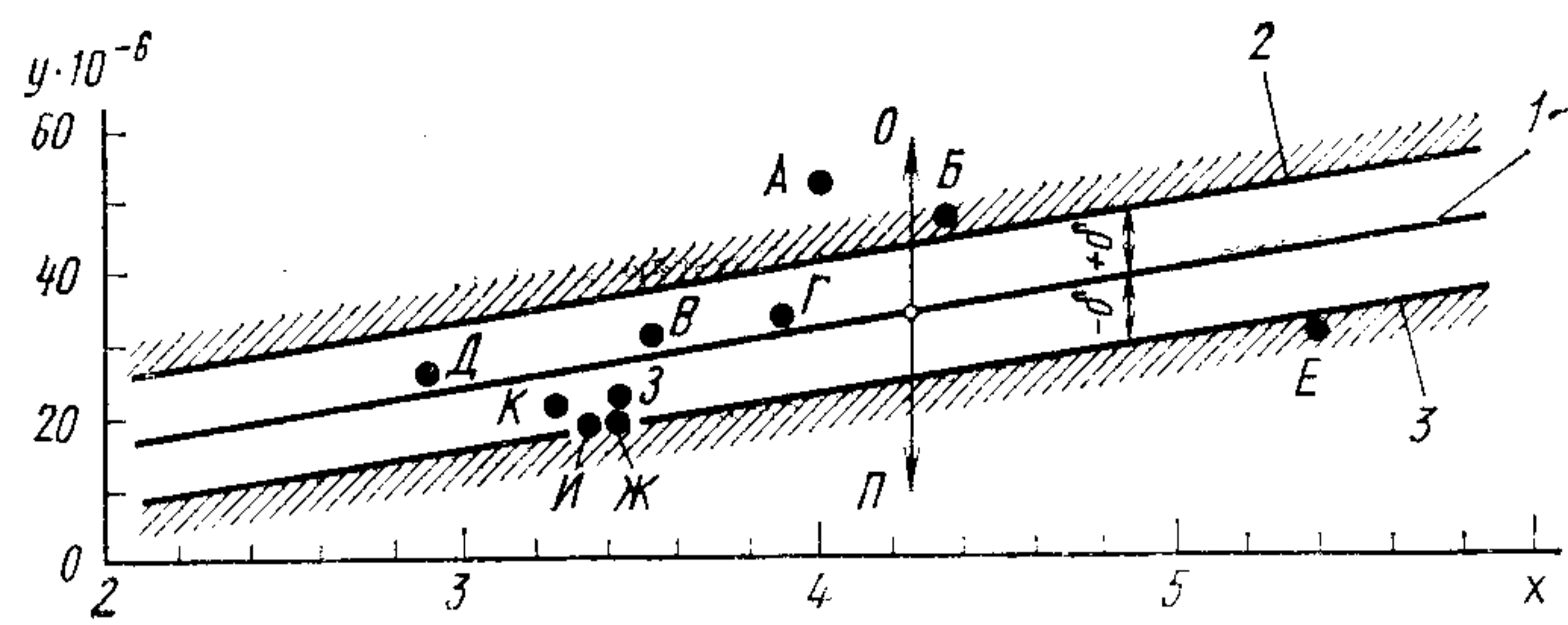


Рис. 2.13. Зависимость характеристического коэффициента результирующего признака ( $y = m/v$ ) от суммы параметрических коэффициентов факториального признака ( $x = \Sigma p$ ):

1 — усредненная зависимость по уравнению  $y = Ax$ , где  $A = 8 \cdot 10^6$ ; 2, 3 — верхняя и нижняя границы области параметров среднего уровня;  $\delta = 9,5 \cdot 10^6$  (средняя квадратическая погрешность);  $\Pi$  — направление положительного изменения зависимости;  $O$  — направление отрицательного изменения зависимости

На график (см. рис. 2.13) наносят области средней квадратической погрешности (линии 2, 3). Машины, параметры которых (факториального и результирующего признака) лежат внутри области, отсекаемой линиями 2 и 3, соответствуют среднему современному уровню (см. рис. 2.13). Машины, параметры которых лежат ниже этой области, имеют лучшие технико-экономические показатели по сравнению со средним уровнем, а машины, параметры которых лежат выше этой области, имеют более низкие технико-экономические показатели.

## 2.7. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОСНАСТКИ

**Литниковая система.** Размеры проходных каналов элементов литниковой системы определяют, во-первых, продолжительность охлаждения полимера в этих элементах и, следовательно, продолжительность подпитки — поступления новых порций расплава в форму после окончания ее заполнения, т. е. время выдержки полимера в форме под давлением, и, во-вторых, потери давления, возникающие в этих элементах, и давление, передаваемое в форму. В связи с этим размеры проходных каналов элементов литниковой системы рассчитывают с учетом термодинамических и гидродинамических факторов процесса литья.

Размеры поперечного сечения литниковых каналов. В одногнездных формах применяют простую литниковую систему, которая состоит обычно только из центрального литника (рис. 2.14, а). В многогнездных формах применяют разветвленную литниковую систему, которая обычно включает центральный литник, систему распределительных литниковых каналов для подвода полимера к гнездам формы и систему впускных литниковых каналов (рис. 2.14, б).

Центральный литниковый канал, как правило, выполняют в виде усеченного конуса с углом 2—4° для удобства извлечения литника из формы. Учитывая небольшую конусность, для упрощения расче-

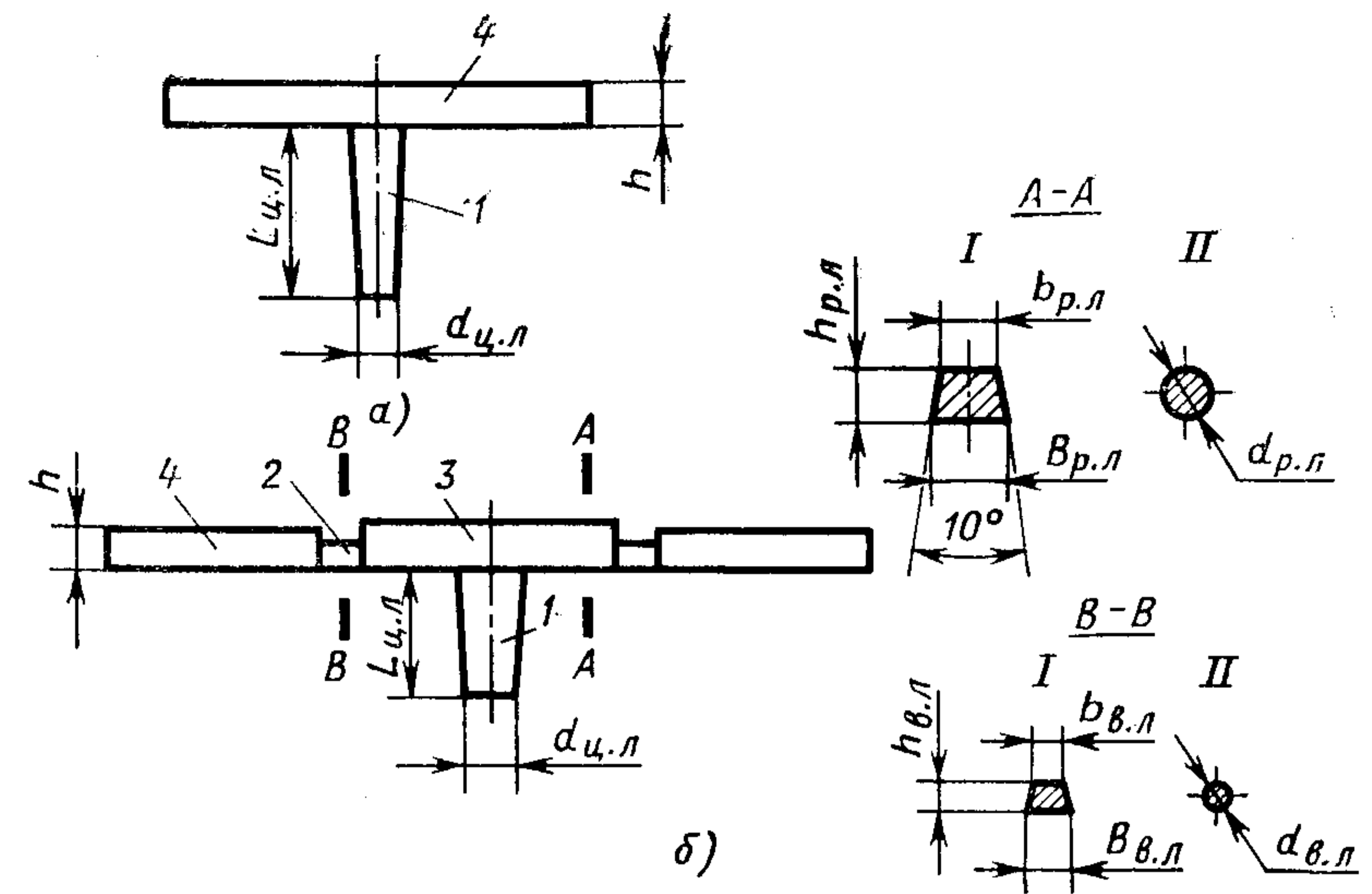


Рис. 2.14. Схемы простой (а) и разветвленной (б) литниковых систем: 1 — центральный литниковый канал; 2 — впускной литниковый канал; 3 — распределительный литниковый канал; 4 — гнездо формы

тов при определении размеров конический канал можно заменить эквивалентным цилиндрическим той же длины, диаметр которого  $d_{ц.л}$  равен половине суммы диаметров на входе и выходе канала. Распределительные и впускные литниковые каналы имеют, как правило, круглое (II) и трапециевидное (I) сечения (рис. 2.14, б). Исходя из рациональной технологии изготовления литниковых каналов, удобства извлечения литников из формы и уменьшения теплоотдачи от горячего расплава к холодной стенке трапециевидное сечение литника обычно выполняют с размерами:  $b_{р.л} \approx 1,25h_{р.л}$ , угол трапеции  $\sim 10^\circ$ . Для упрощения расчетов при определении размеров каналов трапециевидного сечения заменяют эквивалентными прямоугольными, исходя из равенства площадей поперечного сечения этих каналов. Высота прямоугольного сечения эквивалентного канала равна высоте трапециевидного сечения, а ширина — средней ширине трапеции  $\bar{b}_{р.л} = (1/2)(b_{р.л} + B_{р.л})$ .

В зависимости от диаметра центрального литника  $d_{ц.л}$  в одногнездной форме, определяют продолжительность охлаждения полимера в нем  $t_{охл.л}$  и тем самым время выдержки полимера в форме под давлением  $t_{впд}$ , в течение которого из инжекционного цилиндра в форму поступают новые порции полимера для компенсации усадки. Поэтому для обеспечения правильной технологии литья и высокого качества изделий продолжительность охлаждения полимера в центральном литнике  $t_{охл.л}$  должна быть равна требуемому времени  $t_{впд}$ . Это условие положено в основу расчета диаметра центрального литника.

Размеры поперечного сечения центрального литника и распределительных литниковых каналов в разветвленной литниковой системе

определяют возникающие в них перепады давлений при литье. Чтобы обеспечить передачу давлений в форму с минимальными потерями перепады давлений в этих элементах должны быть небольшими, поэтому центральный литник и распределительные литниковые каналы должны иметь по возможности большое поперечное сечение. Но в то же время размеры поперечного сечения центрального литника и распределительных литниковых каналов определяют продолжительность охлаждения в них полимера  $t_{\text{охл. л}}$ , которая не должна превышать продолжительность охлаждения изделия  $t_{\text{охл. и}}$ , чтобы не увеличивать цикл литья. Если  $t_{\text{охл. л}} < t_{\text{охл. и}}$ , при раскрытии формы литник может оторваться и затруднить автоматический съем изделия. Поэтому условие  $t_{\text{охл. л}} = K_{\text{охл}} t_{\text{охл. и}}$ , где коэффициент  $K_{\text{охл}}$  незначительно отличается от единицы ( $K_{\text{охл}} = 1 \div 1,15$ ), положено в основу расчета размеров поперечного сечения центрального литника и распределительных литниковых каналов в разветвленной литниковой системе. Размеры поперечного сечения впускных литниковых каналов в разветвленной литниковой системе определяют продолжительность выдержки полимера в форме под давлением  $t_{\text{впд}}$ . Поэтому условие равенства продолжительности охлаждения полимера во впускных каналах и продолжительности выдержки под давлением положено в основу расчета размеров поперечного сечения этих каналов. При отсутствии впусков продолжительность охлаждения полимера в распределительных литниковых каналах определяет продолжительность выдержки под давлением. В этом случае размеры поперечного сечения этих каналов рассчитываются из условия:  $t_{\text{охл. л}} = t_{\text{впд}}$ .

На основе математического описания процесса охлаждения полимера в оформляющих элементах (см. гл. 1) размеры поперечного сечения литниковых каналов можно рассчитать по уравнениям: для цилиндрической формы канала

$$r_{\text{л}} = \sqrt{t_{\text{охл. л}} 5,76 \tilde{a} / \ln(1,6\bar{\Theta})}; \quad (2.38a)$$

для прямоугольной двумерной формы канала при  $f = \tilde{b}/h < 2,5$

$$h_{\text{л}} = \sqrt{t_{\text{охл. л}} \pi^2 \tilde{a} (1 + f^2) / [\ln(1,6\bar{\Theta}) f^2]}; \quad (2.38б)$$

для прямоугольной одномерной формы канала при  $f = \tilde{b}/h > 2,5$

$$h_{\text{л}} = \sqrt{t_{\text{охл. л}} \pi^2 \tilde{a} / \ln(1,27\bar{\Theta})}; \quad (2.38в)$$

для аморфных полимеров

$$\bar{\Theta} = (T_0 - T_{\text{ф}}) / (T_c - T_{\text{ф}});$$

для кристаллизующихся полимеров

$$\bar{\Theta} = (T_0 - T_{\text{ф}}) / (T_{\text{пл}} - T_{\text{ф}}),$$

где  $f = \tilde{b}/h$ , при  $\tilde{b}_{\text{л}} = 1,25h_{\text{л}}$  и угле трапеции  $10^\circ$   $f = 1,37$ ;  $t_{\text{охл. л}} = t_{\text{впд}}$  — при расчете размеров центрального литника в простой литниковой системе и впускных литниковых каналов в разветвленной литниковой системе;  $t_{\text{охл. л}} = K_{\text{охл}} t_{\text{охл. и}}$  — при расчете размеров центрального литника и распределительных литниковых ка-

налов (при наличии впусков) в разветвленной литниковой системе; расчет  $t_{\text{охл. и}} = t_{\text{т}}$  (2.19);  $T_c$  и  $T_{\text{пл}}$  — температура стеклования и плавления полимеров, приведена в работе [9].

Время выдержки полимера в форме под давлением  $t_{\text{впд}}$  обычно задают, исходя из предъявляемых требований по качеству изделий и технологии формования или принимают в соответствии с техническими условиями на полимеры или по каталогам.

**Длина литниковых каналов.** Длина литниковых каналов определяется конструкцией и числом гнезд формы, конфигурацией и размерами изделий. Ее можно скорректировать с учетом гидродинамического фактора, исходя из заданных (нормированных) потерь (перепадов) давления в литниковых каналах. Допустимые потери давления в литниковых каналах задают из условия, что для получения изделий со стабильными свойствами по длине и отливаемых в разных циклах форма должна заполняться в режиме постоянной объемной скорости течения полимера. Для этого суммарные потери давления в рабочих органах машины до сопла  $\Delta P_{\text{м}}$ , в сопле  $\Delta P_{\text{с}}$ , в литниковой системе  $\Delta P_{\text{л. с}}$  и в форме  $\Delta P_{\text{ф}}$  не должны превышать максимальное давление литья  $P_{\text{л}}$ , реализуемое на машине. Задаваемые потери давления в литниковой системе  $\Delta P_{\text{л. с}}$  можно подсчитать по уравнению

$$\Delta P_{\text{л. с}} = P_{\text{л}} - (\Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{ф}}) = (P_{\text{л}}/K_{\text{п}}) - \Delta P_{\text{с}} - \Delta P_{\text{ф}}, \quad (2.39)$$

где  $K_{\text{п}}$  — см. обозначение к уравнению (2.7); порядок расчета  $\Delta P_{\text{с}}$  и  $\Delta P_{\text{ф}}$  приведен соответственно в табл. 2.6 и 2.5, при этом для расчета коэффициентов давлений  $K_{\text{л. вх}}$  и  $K_{\text{п}}$  при определении  $P_{\text{с}}$  давление на входе в сопло  $P_{\text{с}}$  задают равным  $P_{\text{л}}/K_{\text{п}}$ .

Разветвленная литниковая система представляет собой последовательное соединение центрального литника, системы распределительных литниковых каналов и системы впускных литниковых каналов. Поэтому потери давления в литниковой системе  $\Delta P_{\text{л. с}}$  суммируются из потерь давления в центральном литнике  $\Delta P_{\text{ц. л}}$ , в системе распределительных литников  $\Delta P_{\text{р. л}}$  и в системе впускных литников  $\Delta P_{\text{в. л}}$  [уравнение (1), табл. 2.15]. Метод расчета длины литниковых каналов различен для сбалансированной и несбалансированной литниковых систем.

**Сбалансированная литниковая система.** В сбалансированной литниковой системе все распределительные и впускные каналы, подводящие полимер к каждому гнезду формы, имеют одинаковую длину и размеры поперечного сечения (одноименные каналы). В ней система распределительных литниковых каналов представляет собой параллельное соединение элементов. Что также относится и к системе впускных каналов. При параллельном соединении элементов одинаковых размеров поток распределяется в них равномерно и объемная скорость течения в каждом элементе

$$Q_N = Q/N, \quad (2.40)$$

где  $Q$  — объемная скорость течения до входа в систему;  $N$  — количество элементов.

Таблица 2.15

Схема расчета перепадов давлений в разветвленной сбалансированной литниковой системе  $\Delta P_{л.с}$

Перепад давлений	Формула для расчета
В литниковой системе $\Delta P_{л.с}$	$\Delta P_{л.с} = \Delta P_{ц.л} + \Delta P_{р.л} + \Delta P_{в.л}$ (1)
В центральном литниковом канале $\Delta P_{ц.л}$	$\Delta P_{ц.л}$ — последовательность расчета та же, что и последовательность расчета перепада давлений в литниковой втулке $\Delta P_{л}$ (см. табл. 2.4)
В системе распределительных литниковых каналов $\Delta P_{р.л}$	$\Delta P_{р.л} = \Delta P_{р.лN}$ , где $\Delta P_{р.лN}$ — перепад давлений в одном распределительном литниковом канале; последовательность расчета та же, что и последовательность расчета перепада давлений в литниковой втулке $\Delta P_{л}$ (см. табл. 2.4); при этом объемная скорость течения в каждом канале: $Q_N = Q/N_{р.л}$ , где $Q$ — объемная скорость течения до входа в систему; $N_{р.л}$ — число распределительных литниковых каналов
В системе впускных литниковых каналов $\Delta P_{в.л}$	$\Delta P_{в.л} = \Delta P_{в.лN}$ , где $\Delta P_{в.лN}$ — перепад давлений в одном впускном литниковом канале; последовательность расчета приведена в табл. 2.16

Перепады давлений в каждом элементе  $\Delta P_N$  равны между собой и равны общему перепаду давлений в системе  $\Delta P$ , т. е.

$$\Delta P = \Delta P_N \quad (2.41)$$

Для сведения к минимуму потерь давления (входных и затрачиваемых на течение) и для обеспечения технологичности изготовления и удобства отделения литника длину впускных каналов принимают равной:

$$\text{для трапециевидного канала } L_{т.л} = (0,5 \div 1) h_{в.л};$$

$$\text{для цилиндрического канала } L_{в.л} = (0,5 \div 1) d_{в.л}.$$

Потери давления  $\Delta P_{в.л}$  во впускных литниковых каналах при заданной их длине  $L_{в.л}$  рассчитывают по уравнениям (1)—(3) [табл. 2.16]; при этом учитывается параллельное соединение элементов. Порядок расчета приведен в табл. 2.17.

Вычитая потери давления в системе впускных литниковых каналов  $\Delta P_{в.л}$  из потерь давления в литниковой системе  $\Delta P_{л.с}$  [см. уравнение (2.39)], получают нормированное значение суммарных потерь давления в центральном литнике и распределительных литниковых каналах:  $\Delta P_{ц.л} + \Delta P_{р.л} = \Delta P_{л.с} - \Delta P_{в.л}$ . Это значение распределяют между  $\Delta P_{ц.л}$  и  $\Delta P_{р.л}$ .

Допустимую длину центрального литника  $L_{ц.л}$ , исходя из нормированных (допустимых) потерь давления в нем  $\Delta P_{ц.л}$ , определяют по уравнениям (1)—(2) [табл. 2.18]. Порядок определения приведен в табл. 2.19.

Формулы для расчета перепадов давлений в системе впускных литниковых каналов

Перепад давлений	Формула для расчета
В системе впускных литниковых каналов $\Delta P_{в.л}$	$\Delta P_{в.л} = \Delta P_{в.лN}$ , (1) где $\Delta P_{в.лN}$ — перепад давлений в одном впускном литниковом канале
Во впускном литниковом канале $\Delta P_{в.лN}$	$\Delta P_{в.лN} = \Delta P'_{0.в.л} + \Delta P'_{L.в.л} + \Delta P_{т.в.л}$ (2)
Входные потери давления до входа во впускной литниковый канал $\Delta P'_{0.в.л}$	$\Delta P'_{0.в.л} = \{1 - \exp [2,12 (1-v')]\} \Delta P_{0.в.л}$ , (3) где $v'$ — отношение диаметра впускного канала к диаметру предшествующего распределительного канала; $\Delta P_{0.в.л}$ — полные потери давления до входа во впускной канал при большом соотношении диаметров ( $v' > 8$ ), при котором эти потери не зависят от $v'$ ; $\Delta P_{0.в.л}$ определяют по уравнениям (1а), (1б) [табл. 1.4], при этом объемная скорость течения в каждом канале $Q_N = Q/N_{в.л}$ , где $N_{в.л}$ — число впускных литниковых каналов
Релаксирующая составляющая общих потерь давления на входном участке впускного литникового канала $\Delta P'_{L.в.л}$	$\Delta P'_{L.в.л}$ — определяют по уравнениям (2а), (3а) [табл. 1.4], задавая $\Delta P_0 = \Delta P'_{0.в.л}$ , $Q_N = Q/N_{в.л}$
Потери давления, затрачиваемые на течение полимера во впускном литниковом канале $\Delta P_{т.в.л}$	$\Delta P_{т.в.л}$ — определяют по уравнениям (2а)—(2г) [табл. 1.3], при этом $Q_N = Q/N_{в.л}$

Таблица 2.17

Последовательность расчета перепадов давления в системе впускных литниковых каналов

Операция	Номер уравнения (номер таблицы) или источник
Рассчитывают эквивалентное время охлаждения полимера в литниковом канале $t_3$ , задавая $t$ равным продолжительности заполнения формы $t_3$	8б (1.3)
Рассчитывают критерий Фурье $Fo$ , подставляя $t = t_3$	10а, 10б (1.3)
Рассчитывают усредненную по длине литникового канала толщину пристенного слоя $\delta$	5а—5г (1.3)
Рассчитывают скорость сдвига $\tilde{\gamma}$ , реализуемую в литниковом канале, задавая $Q = Q_N$	4а, 4б (1.3)
Рассчитывают коэффициент давления $K_{д.вх}$ для перепада давлений $\Delta P_{0.в.л}$ ; при этом задают $\tilde{\gamma}$ , равной $\tilde{\gamma}$ ; $T = T_0$ ; $P$ , равным половине суммы давления на входе в сопло	4а (1.4)
$P_c = P_{л}/K_{п}$ , (1)	
где $K_{п}$ — см. обозначения к (2.7), и давления на входе в форму $P_{ф.вх} = \Delta P_{ф}$ (см. табл. 2.3) ( $K_{д.вх}$ рассчитывают, если давление оказывает влияние на реологические свойства полимера, в противном случае $K_{д.вх} = 1$ )	

Операция	Номер уравнения (номер таблицы) или источник
Рассчитывают вязкость $\eta_{\tilde{\gamma}(T_0, B)}$ при скорости сдвига $\tilde{\gamma}$ , температуре $T_0$ и влажности $B$ или выбирают константы $m_0, E, n$ реологического уравнения в форме степенного закона (в зависимости от исходных данных)	[9]
Рассчитывают полные входные потери давления до входа в литниковый канал $\Delta P_{0, в. л.}$ , задавая $\dot{\gamma} = \tilde{\gamma}$	1а, 1б (1.4)
Рассчитывают действительные входные потери давления до входа в литниковый канал $\Delta P'_{0, в. л.}$ в зависимости от $v'$	3 (2.16)
Рассчитывают релаксирующую составляющую общих потерь давления на входном участке литникового канала $\Delta P'_{L, в. л.}$ , задавая $\Delta P_0 = \Delta P'_{0, в. л.}$ , $Q = Q_N$ , $\dot{\gamma} = \tilde{\gamma}$ , $r = r_{в. л.} - \delta$ , $L = L_{в. л.}$ , $P$ , равным половине суммы давления на входе в сопло $P_c$ [по уравнению (1) этой таблицы] и давления на входе в форму $P_{ф. вх} = \Delta P_{ф.}$ (см. табл. 2.3)	2а, 3а (1.4)
Рассчитывают коэффициент давления $K_d$ для перепада давлений $\Delta P_{т. в. л.}$ ; при этом давление на входе в литниковый канал задают равным давлению на входе в сопло $P_c$ [по уравнению (1) этой таблицы], а на его выходе — равным давлению на входе в форму $P_{ф. вх} = \Delta P_{ф.}$ (см. табл. 2.3). $K_d$ рассчитывают, если давление оказывает влияние на вязкость полимера, в противном случае $K_d = 1$	9а (1.3)
Рассчитывают перепад давлений, затрачиваемый на течение в литниковом канале $\Delta P_{т. в. л.}$ , задавая $\tilde{T} = T_0$ , $Q = Q_N$	2а—2г (1.3)
Рассчитывают перепад давлений во впускном литниковом канале $\Delta P_{в. л.}$	2 (2.16)

Таблица 2.18

**Формулы для расчета длины центрального литникового канала  $L_{ц. л.}$  и распределительных литниковых каналов  $L_{р. л.}$  исходя из нормированных потерь давления в них  $\Delta P_{ц. л.}$ ,  $\Delta P_{р. л.}$**

Длина	Исходные данные	Форма канала	Формула для расчета
Центрального литникового канала $L_{ц. л.}$	ПТР, $\bar{M}$ , $\eta_N(T^*)$	Цилиндрическая	$L_{ц. л.} = n\pi (r_{ц. л.} - \delta)^4 \Delta P_{ц. л.} / [2(3n + 1) \eta_{\tilde{\gamma}(T_0, B)} Q K_d] \quad (1)$
	$m_0, E, n$	То же	$L_{ц. л.} = \{n\pi (r_{ц. л.} - \delta)^{(3n+1)} n^{-1} / [(3n + 1) Q]\}^n \Delta P_{ц. л.} / \{2m_0 \exp [E/(RT_0)]\} \quad (2)$

Длина	Исходные данные	Форма канала	Формула для расчета
Распределительного литникового канала $L_{р. л.}$	ПТР, $\bar{M}$ , $\eta_N(T^*)$	Цилиндрическая	$L_{р. л.} = n\pi (r_{р. л.} - \delta)^4 \Delta P_{р. л.} / [2(3n + 1) \eta_{\tilde{\gamma}(T_0, B)} Q_N K_d] \quad (3)$
		Прямоугольная	$L_{р. л.} = n\delta_{р. л.} (h_{р. л.} - 2\delta)^3 \Delta P_{р. л.} / [4(2n + 1) \eta_{\tilde{\gamma}(T_0, B)} Q_N K_d] \quad (4)$
	$m_0, E, n$	Цилиндрическая	$L_{р. л.} = \{n\pi (r_{р. л.} - \delta)^{(3n+1)} n^{-1} / [(3n + 1) Q_N]\}^n \Delta P_{р. л.} / \{2m_0 \exp [E/(RT_0)]\} \quad (5)$
		Прямоугольная	$L_{р. л.} = \{n\delta_{р. л.} (h_{р. л.} - 2\delta)^{(2n+1)} n^{-1} / [2(2n + 1) Q_N]\}^n \Delta P_{р. л.} / \{2m_0 \exp [E/(RT_0)]\} \quad (6)$ $Q_N = Q/N_{р. л.} \quad (7)$

Таблица 2.19

**Последовательность расчета длины центрального литникового канала  $L_{ц. л.}$  и распределительных литниковых каналов  $L_{р. л.}$  исходя из нормированных потерь давления в них  $\Delta P_{ц. л.}$ ,  $\Delta P_{р. л.}$**

Операция	Номер уравнения (номер таблицы) или источник
Рассчитывают эквивалентное время охлаждения полимера в литниковом канале $t_3$ , задавая $t$ , равным продолжительности заполнения формы $t_3$	8б (1.3)
Рассчитывают критерий Фурье $Fo$ , подставляя $t = t_3$	10а, 10б (1.3)
Рассчитывают усредненную по длине литникового канала толщину пристенного слоя $\delta$	5а—5г (1.3)
Рассчитывают скорость сдвига $\tilde{\gamma}$ , реализуемую в литниковом канале; при расчете $\tilde{\gamma}$ в распределительных каналах $Q$ задают равной $Q_N$	4а, 4б (1.3)
Рассчитывают коэффициент давления $K_d$ ; при этом давление на входе в литниковый канал задают равным давлению на входе в сопло $P_c$ [по уравнению (1), табл. 2.17], а на его выходе — равным давлению на входе в форму $P_{ф. вх} = \Delta P_{ф.}$ (см. табл. 2.3) ( $K_d$ рассчитывают, если давление оказывает влияние на вязкость полимера, в противном случае $K_d = 1$ )	9а (1.3)
Рассчитывают вязкость $\eta_{\tilde{\gamma}(T_0, B)}$ при скорости сдвига $\tilde{\gamma}$ , температуре $T_0$ и влажности $B$ или выбирают константы реологического уравнения в форме степенного закона $m_0, E, n$ (в зависимости от исходных данных)	[9]
Рассчитывают длину центрального литникового канала $L_{ц. л.}$ или длину распределительного литникового канала $L_{р. л.}$	1, 2 (2.18) 3—6 (2.18)



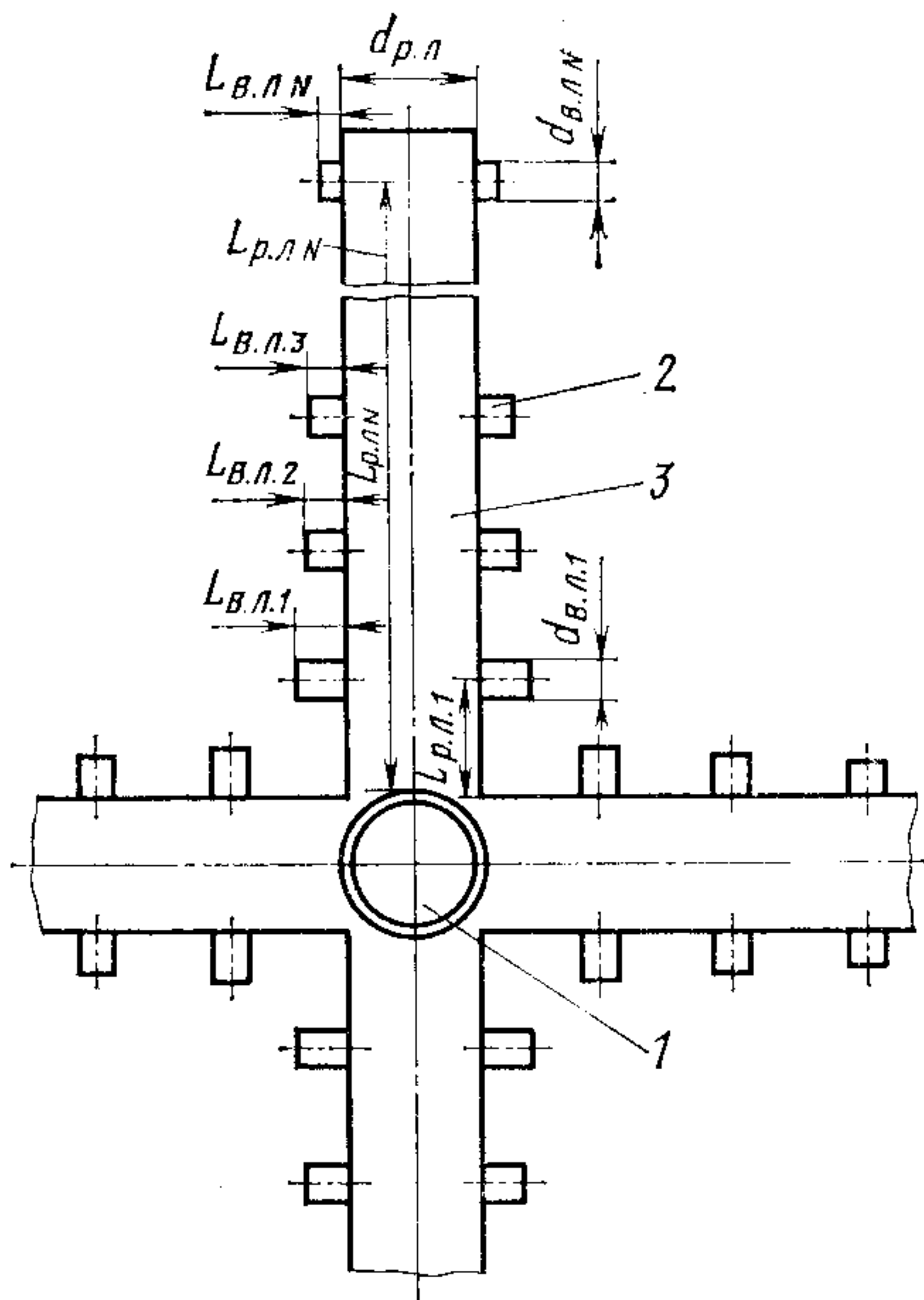


Рис. 2.15. Расчетная схема балансирования размеров разветвленной литниковой системы:

1 — центральный литниковый канал; 2 — впускной литниковый канал; 3 — распределительный литниковый канал

в каждом гнезде формы производят балансирование размеров впускных литниковых каналов.

Размеры поперечного сечения впускных каналов определяются термодинамическим фактором процесса литья, поэтому их изменение нежелательно. Балансирование литниковой системы достигается изменением длины впускных каналов. Чтобы литниковая система была сбалансированной, суммы составляющих потерь давления  $\sum \Delta P$ , возникающих при течении расплава до каждого гнезда формы, должны быть равны, т. е.  $\sum \Delta P_1 = \sum \Delta P_2 = \dots = \sum \Delta P_N$ . Сумму потерь давления, возникающих при течении расплава до первого гнезда формы ( $\sum \Delta P_1$ ) и до  $N$ -го гнезда ( $\sum \Delta P_N$ ), с учетом потерь давления в распределительных каналах ( $\Delta P_{р.л.1}, \dots, \Delta P_{р.л.N}$ ), входовых потерь давления во впускных каналах ( $\Delta P_{вх.в.л.1}, \dots, \Delta P_{вх.в.л.N}$ ) и потерь давления, затрачиваемых на течение во впускных каналах ( $\Delta P_{т.в.л.1}, \dots, \Delta P_{т.в.л.N}$ ), можно записать:

$$\sum \Delta P_1 = \Delta P_{р.л.1} + \Delta P_{вх.в.л.1} + \Delta P_{т.в.л.1}; \quad (2.42a)$$

$$\sum \Delta P_N = \Delta P_{р.л.N} + \Delta P_{вх.в.л.N} + \Delta P_{т.в.л.N}. \quad (2.42b)$$

Вычитание уравнения (2.42b) из уравнения (2.42a) с учетом того, что  $\Delta P_{вх.в.л.1} = \Delta P_{вх.в.л.N}$ , поскольку  $d_{в.л.1} = d_{в.л.N}$ , дает:

$$\Delta P_{р.л.N} - \Delta P_{р.л.1} = \Delta P_{т.в.л.1} - \Delta P_{т.в.л.N}. \quad (2.43)$$

Допустимую длину распределительных литниковых каналов  $L_{р.л.}$ , исходя из нормированных (допустимых) потерь давления в них  $\Delta P_{р.л.}$ , определяют по уравнениям (3)—(6) [табл. 2.18]. В этих уравнениях учтено параллельное соединение каналов. Порядок расчета  $L_{р.л.}$  приведен в табл. 2.19.

**Несбалансированная литниковая система.** В несбалансированной литниковой системе (рис. 2.15) длина течения расплава от центрального литникового канала до различных гнезд формы неодинакова, так как конструкция этой системы определяет различие в длинах распределительных литниковых каналов. Давление на входе в гнездо формы влияет на качество получаемых изделий, поэтому для получения изделий одинаковых по качеству давление на входе в различных гнездах формы должно быть равным. Для получения одинакового давления

Подставляя в уравнение (2.43) значения  $\Delta P$  для каждого канала [уравнение (2г), табл. 1.3], получаем:

$$\begin{aligned} & 2L_{р.л.N} m_0 \exp [E/(RT_0)] \{(3n+1)Q/[nN_{р.л}\pi (r_{р.л1} - \bar{\delta})^{(3n+1)n^{-1}}]\}^n - \\ & - 2L_{р.л1} m_0 \exp [E/(RT_0)] \{(3n+1)Q/[nN_{р.л}\pi (r_{р.лN} - \bar{\delta})^{(3n+1)n^{-1}}]\}^n = \\ & = 2L_{в.л1} m_0 \exp [E/(RT_0)] \{(3n+1)Q/[nN_{в.л}\pi (r_{в.л1} - \bar{\delta})^{(3n+1)n^{-1}}]\}^n - \\ & - 2L_{в.лN} m_0 \exp [E/(RT_0)] \{(3n+1)Q/[nN_{в.л}\pi (r_{в.лN} - \bar{\delta})^{(3n+1)n^{-1}}]\}^n, \end{aligned} \quad (2.44)$$

где  $N_{р.л.}$  и  $N_{в.л.}$  — число распределительных и впускных литниковых каналов;  $\bar{\delta}$  — определяют по уравнению (5в) [табл. 1.3].

Соответствующие преобразования уравнения (2.44) позволяют получить соотношение для расчета длины  $i$ -го цилиндрического впускного канала сбалансированной разветвленной литниковой системы:

$$L_{в.л.N} = L_{в.л1} - (N_{в.л}/N_{р.л})^n [(r_{в.л} - \bar{\delta})/(r_{р.л} - \bar{\delta})]^{(3n+1)} (L_{р.л.N} - L_{р.л1}). \quad (2.45)$$

Если распределительные или впускные каналы имеют трапециевидное поперечное сечение, в (2.45) подставляют диаметры ( $\bar{d}_{р.л.}$  или  $\bar{d}_{в.л.}$ ) эквивалентных цилиндрических каналов, которые можно определить по соотношению

$$\bar{d} = 2 \sqrt[3]{2S^2/(\pi\Pi)}, \quad (2.46)$$

где  $S$  и  $\Pi$  — площадь и периметр поперечного сечения канала сложной конфигурации.

**Перепады давлений в литниковой системе.** Схема расчета перепадов давлений  $\Delta P_{л.с.}$ , затрачиваемых на течение полимера в сбалансированной литниковой системе, приведена в табл. 2.15.

**Сопла.** Сопла литьевых машин выполняют открытого и закрытого типа (рис. 2.16). Последние применяют для предотвращения вытекания полимера из инъекционного цилиндра. Способность полимера к вытеканию определяет его ньютоновская вязкость. Сопла открытого типа применяют для переработки полимеров со сравнительно большой ньютоновской вязкостью (примерно, более  $7 \cdot 10^2$  Па·с), а закрытого типа — с более низкой.

**Сопла открытого типа. Размеры.** Диаметр выходного канала сопла  $d_{с.вых}$  (рис. 2.16, а) определяется термодинамическими условиями процесса литья, поскольку он зависит от диаметра центрального литника литниковой системы, который, в свою очередь, определяется допустимой продолжительностью охлаждения полимера в нем. Эта продолжительность определяется временем охлаждения изделия в случае разветвленной литниковой системы или временем выдержки полимера в форме под давлением в случае простой литниковой системы. Выходной диаметр сопла  $d_{с.вых}$  равен

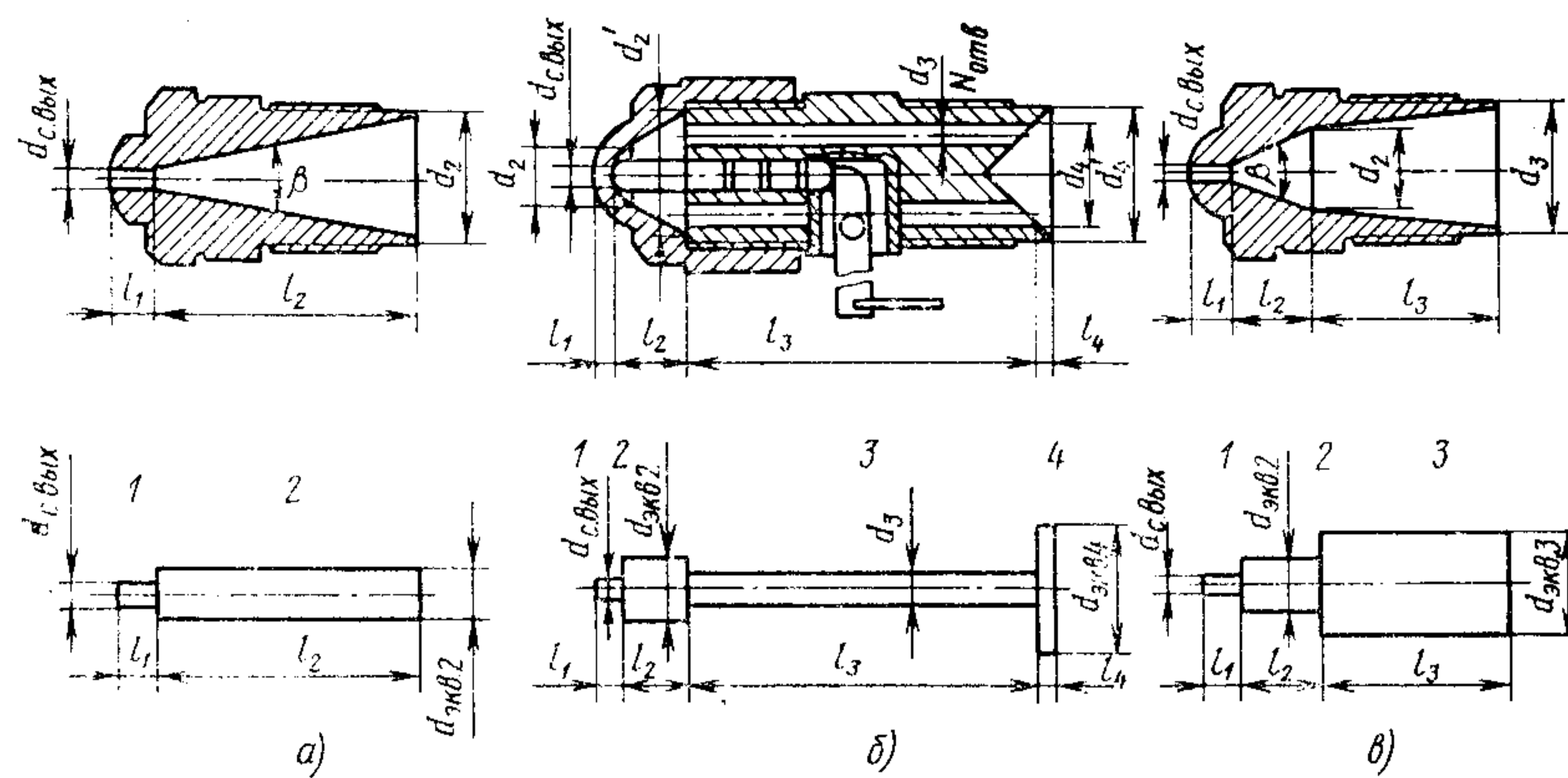


Рис. 2.16. Схемы сопел открытого (а), закрытого (б) типа и сопла, включающего два конических участка (в), и их эквивалентные схемы для расчета потерь давления

входному диаметру центрального литника  $d_{ц.л}$  с учетом несоосности  $b$  формы и инжекционного цилиндра:

$$d_{с.вых} = d_{ц.л} - b, \quad (2.47)$$

где  $b$  зависит от типоразмера машины и составляет  $(0,05 \div 0,1) 10^{-2}$  м.

Входной диаметр  $d_2$  конической части сопла обычно задают равным диаметру шнека (см. п. 3.4). Длина конической части сопла (см. рис. 2.16, а) связана с углом заходного конуса  $\beta$ :  $l_2 = (d_2 - d_{с.вых}) / [2 \operatorname{tg}(\beta/2)]$ . Длину  $l_2$  и угол  $\beta$  задают, исходя из конструктивных соображений, технологичности изготовления конструкции, а также с учетом гидродинамических факторов. Уменьшение угла  $\beta$  менее  $35^\circ$  приводит к росту сопротивления течению, а следовательно, к увеличению потерь давления в сопле и ухудшению передачи давления в форму. Увеличение угла более  $60^\circ$  может привести к образованию в сопле застойных зон, в которых полимер находится в течение длительного времени и разрушается. Обычно угол заходного конуса задают равным  $35-60^\circ$ . Если, исходя из конструктивных соображений, это условие выполнить нельзя, то коническую часть сопла делают состоящей из двух частей (см. рис. 2.16, в) при этом угол первой конической части задают равным  $35-60^\circ$ .

**Перепад давлений.** Схема расчета перепада давлений  $\Delta P_c$ , затрачиваемого на течение полимера в сопле, с учетом перепада давлений в выходной части сопла  $\Delta P'_c$  и конической части  $\Delta P''_c$  приведена в табл. 2.20.

Проходной канал сопла состоит из цилиндрического и конического каналов. При расчете проходной канал заменяют эквивалентной системой двух последовательно соединенных цилиндрических каналов (см. рис. 2.16). Диаметр цилиндрического канала эквивалентного коническому определяют по соотношениям (3) [табл. 2.20]. Длина эквивалентного цилиндрического канала равна длине конического. Входные потери давления  $\Delta P_{вх}$  в выходной (первой) части

Схема расчета перепада давлений в сопле (см. рис. 2.16, а)

Перепад давлений	Последовательность расчета
В сопле $\Delta P_c$	$\Delta P_c = \Delta P'_c + \Delta P''_c \quad (1)$
В выходном (первом) участке сопла $\Delta P'_c$	$\Delta P'_c = \Delta P_{0.c} + \Delta P_{Lc} + \Delta P'_{т.c} \quad (2)$ Последовательность расчета входных потерь давления до входа на первый участок сопла $\Delta P_{0.c}$ , релаксирующей составляющей общих входных потерь давления на первом участке сопла $\Delta P_{Lc}$ и потерь давления, затрачиваемых на течение на первом участке сопла $\Delta P'_{т.c}$ приведена в табл. 2.4
В коническом (втором) участке сопла $\Delta P''_c$	$\Delta P''_c$ — последовательность расчета та же, что и последовательность расчета перепада давлений $\Delta P'_{т.c}$ (см. табл. 2.4); при этом диаметр задают равным диаметру эквивалентного цилиндрического канала $d_{эКВ2}$ : $d_{эКВ2} = (d_{с.вых} + d_2)/2 \text{ при } d_2/d_{с.вых} \leq 1,5; \quad (3a)$ $d_{эКВ2} = [3n (d_2 - d_{с.вых}) d_{с.вых}^{3n} / (d_2^{3n} - d_{с.вых}^{3n})]^{(3n+1)^{-1}} \text{ при } d_2/d_{с.вых} > 1,5 \quad (36)$

сопла практически не зависят от угла внутренней конической поверхности его второго канала в диапазоне изменения угла от  $40$  до  $120^\circ$ . Заходную часть обычно выполняют с углами в этом интервале.

**Сопла закрытого типа.** Диаметр выходного канала сопла закрытого (запирающегося) типа рассчитывают из тех же условий, что и диаметр сопла открытого типа, т. е. по уравнению (2.47).

Геометрические размеры подводящих каналов определяются конструкцией сопла и необходимостью обеспечения передачи давления в них с минимально возможными потерями. Последнее достигается увеличением диаметра подводящих каналов, сокращением длины подводящих каналов, увеличением числа подводящих каналов. Первый способ наиболее эффективен, так как позволяет сократить входные потери давления и потери давления, затрачиваемые на течение полимера в каналах. Уменьшение длины подводящих каналов вызывает изменение габаритных размеров сопла, поэтому этот способ рекомендуется при разработке новых конструкций. Увеличение числа подводящих каналов менее эффективно, поэтому его используют в том случае, когда невозможно применить первые два способа.

# РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ИНЖЕКЦИОННЫХ И ПРЕССОВЫХ УЗЛОВ ЛИТЬЕВЫХ МАШИН

Конструкция и параметры инжекционных узлов литевых машин определяют процессы пластикации и формования полимеров, возможность реализации различных технологических режимов изготовления изделий, качество изделий, параметры и производительность литевых машин, а также их технико-экономические показатели.

## 3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ УЗЛОВ

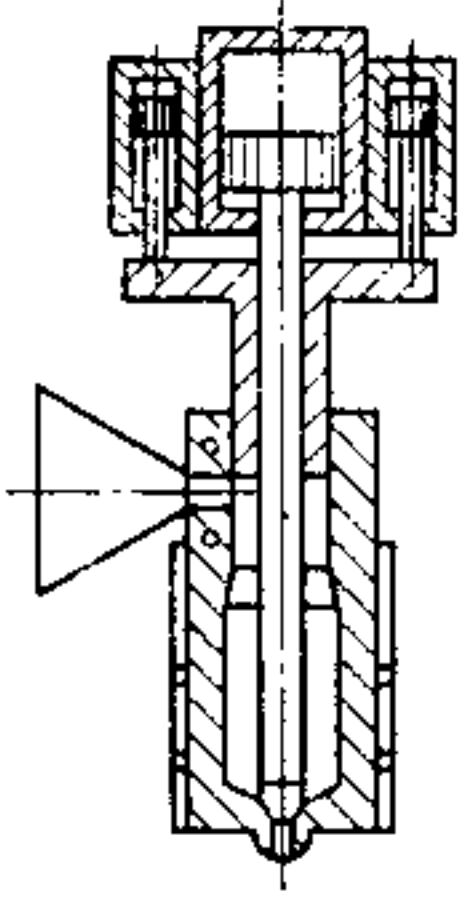
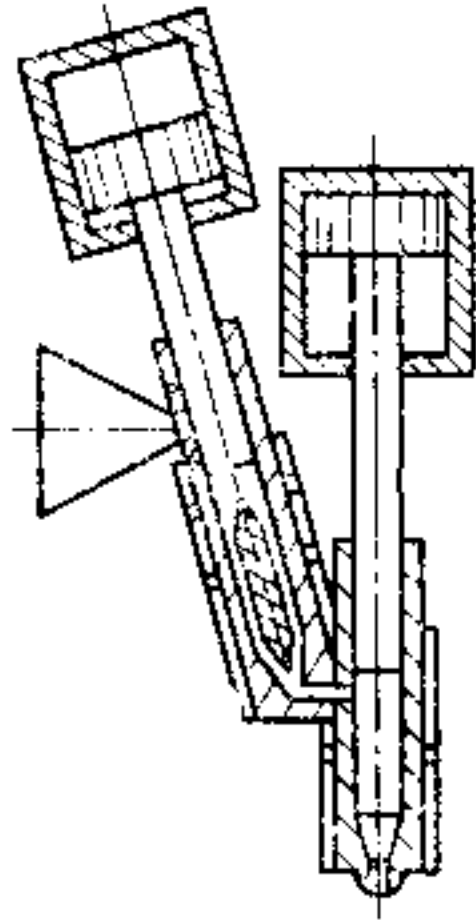
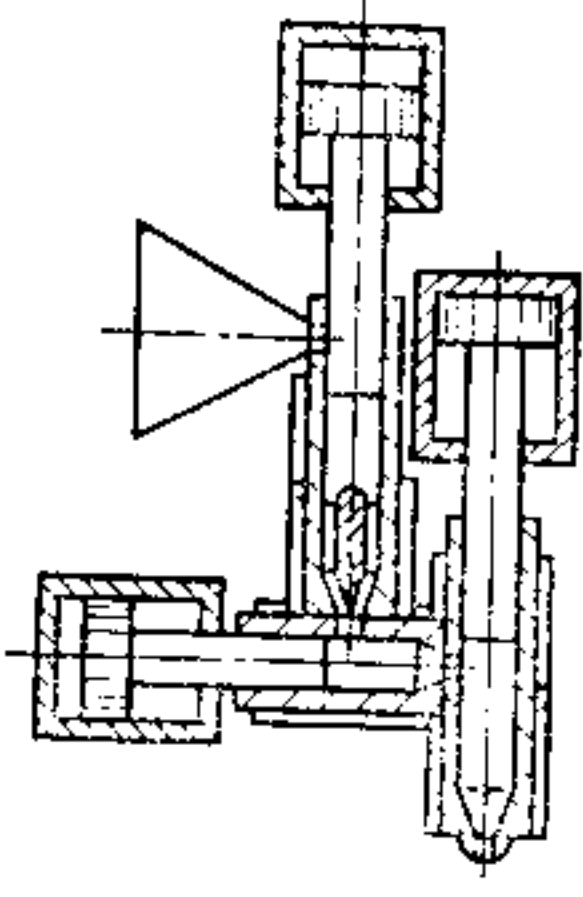
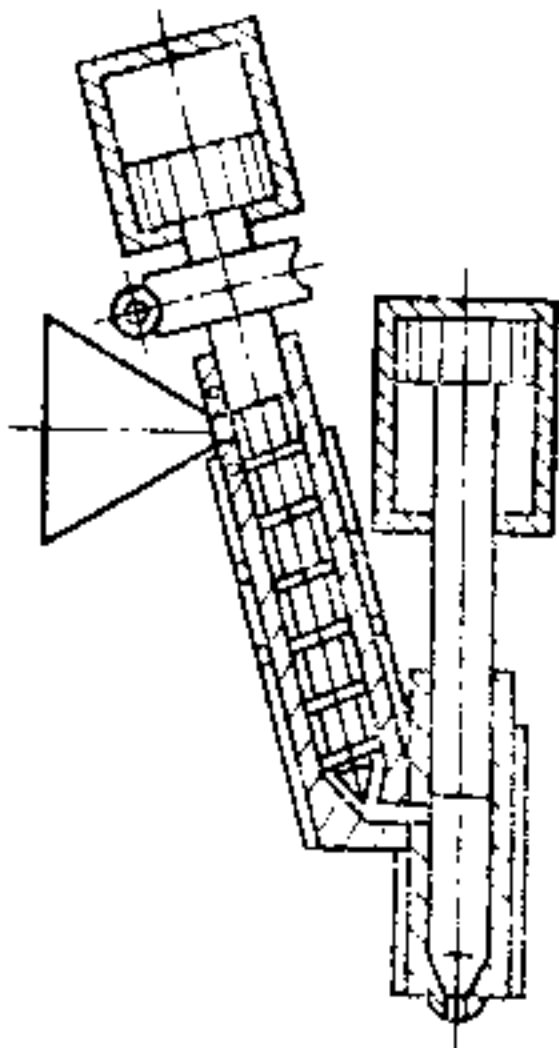
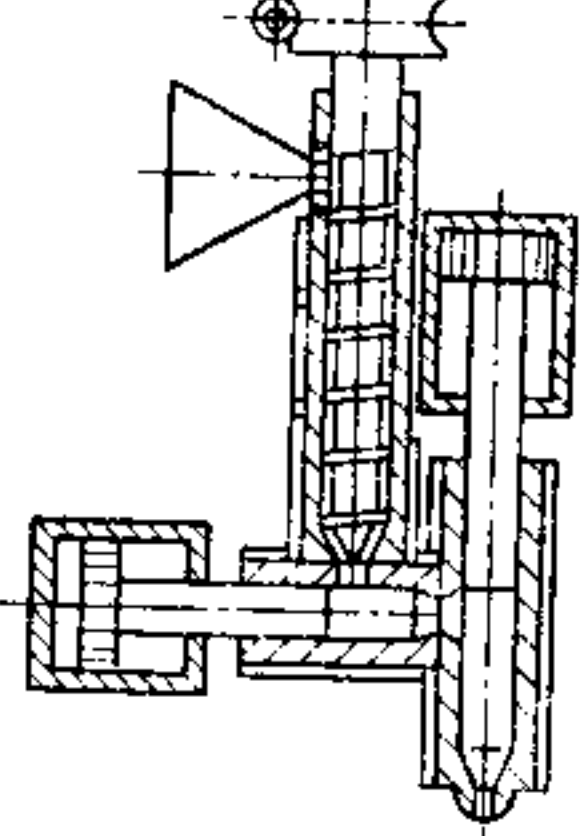
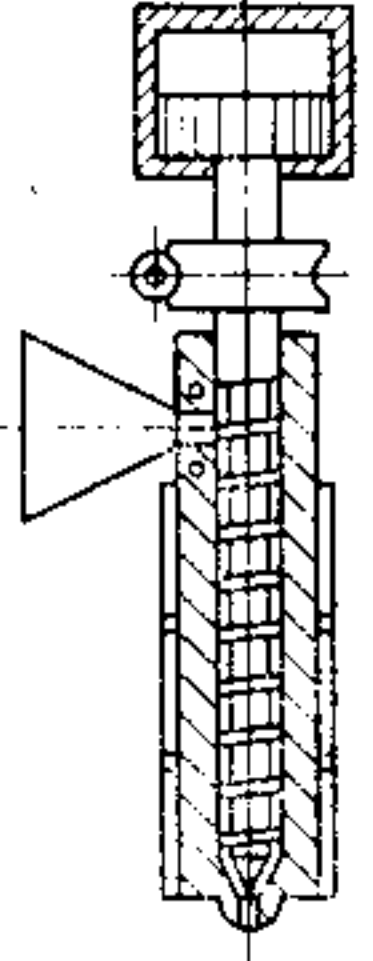
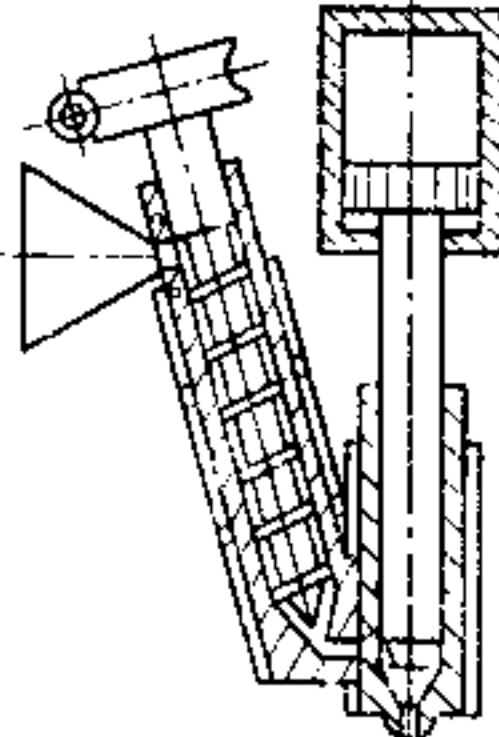
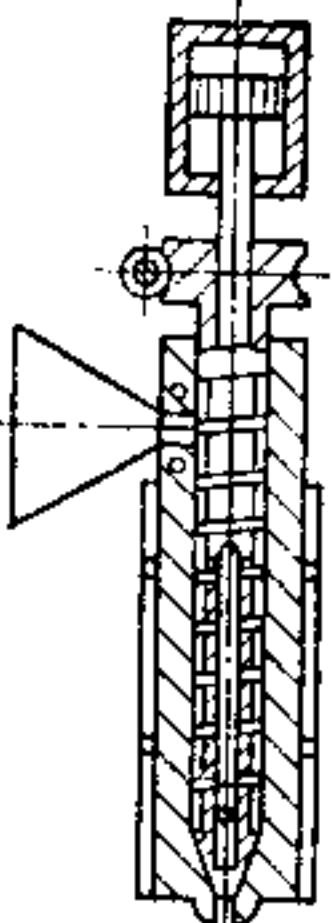
Инжекционные узлы литевых машин можно классифицировать по следующим признакам (табл. 3.1): по конструктивно-технологическому (машины без предварительной пластикации и с предварительной пластикацией); по методу пластикации (поршневые и шнековые); по конструктивному оформлению (одно-двух и трехцилиндровые); по числу шнеков (одно- и двухшнековые) [4]. В машинах без предварительной пластикации стадия пластикации совмещена по времени со стадией инъекции (впрыска). В машинах с предварительной пластикацией полимер пластицируется, после чего впрыскивается в форму при перемещении поршня (шнека), т. е. стадии пластикации и впрыска разделены. В поршневых конструкциях полимер пластицируется главным образом за счет тепла от внешних нагревателей при продвижении от бункера к соплу. В шнековых конструкциях полимер дополнительно пластицируется за счет выделяющейся внутренней теплоты трения при вращении шнека.

Одноцилиндровые конструкции поршневого типа (А—1, табл. 3.1) применяют главным образом для литья небольших по массе изделий (не более 8—10 г), а также для литья композиций на основе полимеров с хрупкими анизотропными наполнителями. Двухцилиндровая конструкция (цилиндры имеют общую головку) поршневого типа (А—2) позволяет получать двухцветные или другие специальные изделия. Одноцилиндровую конструкцию одношнекового типа (Б—1) можно применять для изготовления толстостенных изделий. Такие конструкции обычно используют на многопозиционных машинах. Двухцилиндровые конструкции одношнекового типа (Б—2) позволяют получать двухцветные толстостенные изделия. Эти конструкции также применяют при необходимости увеличения производи-

Таблица 3.1

Классификация инжекционных узлов литевых машин

Конструктивно-технологические признаки	Конструкция рабочего узла		
	Одноцилиндровая (1)	Двухцилиндровая (2)	Трехцилиндровая (3)
Поршневая конструкция (А)			—
Одношnekовая конструкция (Б)			—
Двухшнековая конструкция (В)		—	—
Пластикация и инъекция совмещены			

Конструктивно-технологические признаки	Конструкция рабочего узла		
	Одноцилиндровая (1)	Двухцилиндровая (2)	Трехцилиндровая (3)
Поршневая конструкция (Г)			
	С осевым перемещением шнека (Д)		
Пластикация и инъекция разделены			
	Без осевого перемещения шнека (Е)	Одношнековая конструкция	

тельности машины. Одноцилиндровые конструкции двухшнекового типа используют (В—1) для переработки порошкообразных полимеров.

Литьевые машины поршневого типа характеризуются большими потерями давления (усилия) в инъекционном цилиндре при впрыске полимера (п. 1.3.2), трудностью регулирования технологических параметров формования и сложностью подбора технологического режима переработки (п. 1.2.3). Увеличение массы литьевых изделий и требование реализации различных технологических режимов формования привели к созданию инъекционных узлов литьевых машин с предварительной пластикацией.

Наиболее компактными, технологичными и обеспечивающими возможность регулирования основных параметров литья в широких интервалах являются одноцилиндровые конструкции шнекового типа (Д—1). В таких конструкциях при пластикации шнек вращается, а при инъекции совершает поступательное движение. Для модернизации поршневого инъекционного узла применяют двухцилиндровые конструкции с пластикационным цилиндром шнекового типа (Д—2). В этих конструкциях шнек в пластикационном цилиндре вращается, обеспечивая пластикацию полимера, по окончании которой он движется вперед, перемещая спластифицированный полимер в инъекционный цилиндр.

Одноцилиндровая конструкция инъекционного узла со шнековой пластикацией включает инъекционный цилиндр со шнеком (шнековый пластикатор). Полимер из бункера поступает через горловину в цилиндр, захватывается вращающимся шнеком и транспортируется вдоль цилиндра в его переднюю часть (см. рис. 1.1). При вращении шнек отходит назад. Далее поступательным движением шнека вперед полимер через сопло впрыскивается в форму. При впрыске полимера в форму перед шнеком развивается большое давление. В результате часть полимера течет по шнеку в направлении к бункеру. Для уменьшения обратного потока на конце шнека устанавливают специальный клапан. Однако и при этом некоторая часть полимера утекает в зазор между клапаном и внутренней стенкой цилиндра. Обычно объем камеры перед шнеком превышает объем отливки на 20—30 % для компенсации утечек вдоль шнека, сжатия расплава в инъекционном цилиндре и усадки полимера в форме.

Шнек приводится во вращение от электродвигателя или гидродвигателя. Электродвигатель обеспечивает ступенчатое регулирование частоты вращения шнека. Для получения плавного регулирования применяют вариаторы. Наиболее распространены гидравлические приводы (гидродвигатели), осуществляющие плавное регулирование частоты вращения шнека, что очень важно для подбора режима пластикации при литье различных полимеров, отличающихся по технологическим свойствам. Частоту вращения гидродвигателей изменяют с помощью дросселей или насосов с регулируемой подачей. Для повышения крутящего момента шнек может приводиться во вращение от гидродвигателя через редуктор со сменными шестернями или через коробку скоростей с переключением скорости.

### 3.2. РАСЧЕТ ИНЖЕКЦИОННЫХ УЗЛОВ

Расчет параметров привода вращательного движения шнека. Процессы, протекающие при пластикации полимера в литьевой машине, во многом аналогичны процессам, протекающим в экструдерах. Поэтому при расчете параметров пластикаторов литьевых машин в качестве справочных сведений могут быть использованы теоретические рекомендации и практические результаты, накопленные при экструзии различных полимеров.

По известным для экструзии приближенным формулам рассчитывают мощность привода вращательного движения шнека (диаметром  $D$ )  $N_{вр}$  (Вт), необходимую для пластикации полимера. Для приближенных расчетов можно использовать соотношения:  $N_{вр} = K(D \cdot 10^3)^{K_1} \cdot 10^3$ ;  $N_{вр} = Cq_{пл} \cdot 10^3$ , где  $K = 3,41 \cdot 10^{-4}$ ;  $K_1 = 2,5$ ;  $C = 0,16 \div 0,2$ . Полученные с помощью приближенных расчетов значения мощности привода вращательного движения шнека нужно проверять по формулам, рекомендуемым для расчета мощности экструдеров.

Крутящий момент  $M_{кр}$  (Н·м) шнека при частоте его вращения  $n_{ср}$  (об/мин) можно определить по формуле:  $M_{кр} = 9,55N_{вр}/n_{ср}$ . По крутящему моменту шнека  $M_{кр}$  рассчитывающий момент на валу гидродвигателя  $M_{гд}$ :  $M_{гд} = M_{кр}/i\chi_{п}$ , где  $i$  — передаточное отношение;  $i = 15 \div 25$ ;  $\chi_{п}$  — КПД механической передачи;  $\chi_{п} = 0,95$ .

По крутящему моменту на валу гидродвигателя  $M_{гд}$  и средней частоте вращения шнека  $n_{ср}$  выбирают модель гидродвигателя. В табл. 3.2 приведены технические характеристики аксиально-поршневых гидродвигателей, применяемых в качестве привода вращательного движения шнеков литьевых машин.

Таблица 3.2

Технические характеристики гидродвигателей

Параметр	Номинальный крутящий момент $M_{гд} \cdot 10^{-1}$ , Н·м				
	0,6	1,25	2,5	5	10
Подача рабочей жидкости за один оборот вала $\bar{q}_{гд} \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /об	8	18	35	70	140
Номинальное давление, МПа	5	5	5	5	5
Давление на сливе $P_{сл}$ , МПа	0,08	0,08	0,08	0,1	0,15
Частота вращения, об/мин:					
максимальная	2400	2100	1800	1500	1300
минимальная	40	30	20	20	20
КПД (при номинальном давлении 5 МПа и частоте вращения 1000 об/мин):					
эффективный	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
объемный	0,95	0,97	0,98	0,98	0,98

Производительность гидродвигателя  $q_{гд}$  можно определить по формуле

$$q_{гд} = \bar{q}_{гд} n_{гд} / 60,$$

где  $\bar{q}_{гд}$  — подача рабочей жидкости за один оборот вала гидродвигателя, м<sup>3</sup>/об (см. табл. 3.2);  $n_{гд}$  — частота вращения вала гидродвигателя:  $n_{\min} < n_{гд} \leq n_{\max}$ ;  $n_{\max}$  и  $n_{\min}$  — максимальная и минимальная частота вращения вала гидродвигателя (см. табл. 3.2).

Подачу насоса  $q_{н}$ , питающего гидродвигатель, можно определить по формуле

$$q_{н} = q_{гд} / \chi_{об. гд},$$

где  $\chi_{об. гд}$  — объемный КПД гидродвигателя (см. табл. 3.2).

Мощность  $N_{н}$  насоса, питающего гидродвигатель, под нагрузкой определяют по формуле

$$N_{н} = P_{гд} q_{н} / \chi,$$

где  $P_{гд}$  — номинальное давление (см. табл. 3.2);  $\chi$  — полный КПД системы,

$$\chi = \chi_{эф. гд} \chi_{эф. н}; \quad (3.1)$$

здесь  $\chi_{эф. гд}$  — эффективный КПД гидродвигателя (см. табл. 3.2);  $\chi_{эф. н}$  — эффективный КПД насоса (для лопастных насосов одинарного или двойного действия  $\chi_{эф. н} \approx 0,82$ ; для радиально-поршневых насосов  $\chi_{эф. н} \approx 0,85$ ).

Если между насосом и гидродвигателем имеется гидроаппаратура управления или регулирования, то в выражение (3.1) вводят КПД  $\chi_{эф. т}$ , учитывающий гидравлические потери в трубопроводах и гидроаппаратуре.

В случае питания гидродвигателя от общей гидросистемы необходимо проверить действительный крутящий момент на валу гидродвигателя и возможный диапазон изменения частоты вращения. Действительный крутящий момент  $M_{гд}$  на валу гидродвигателя

$$M_{гд} = M_{гд. н} \Delta P_{д} / \Delta P_{н},$$

где  $M_{гд. н}$  — номинальный крутящий момент на валу гидродвигателя;  $M_{гд. н} = \Delta P_{н} \bar{q}_{гд} \chi_{м. гд} / (2\pi)$ ;  $\Delta P_{д}$  — действительный перепад давлений в гидросистеме  $\Delta P_{д} = P_{д} - P_{сл}$ ;  $\Delta P_{н}$  — номинальный перепад давлений в гидросистеме;  $\Delta P_{н} = P_{гд} - P_{сл}$ ;  $\chi_{м. гд}$  — механический КПД гидродвигателя;  $P_{сл}$  — давление на сливе (см. табл. 3.2);  $P_{гд}$  — номинальное давление в гидродвигателе (см. табл. 3.2).

Частота вращения  $n_{гд}$  вала гидродвигателя:

$$n_{\min} < n_{гд} = q_{н} \chi_{об} 60 / \bar{q}_{гд} \leq n_{\max},$$

где  $\chi_{об}$  — объемный КПД системы насос — гидродвигатель

$$\chi_{об} = \chi_{об. н} \chi_{об. гд},$$

здесь  $\chi_{об. н}$  — объемный КПД насоса (для лопастных насосов одинарного или двойного действия  $\chi_{об. н} = 0,62 \div 0,93$ , для радиально-поршневых насосов  $\chi_{об. н} = 0,75 \div 0,93$ ).

При увеличении нагрузки на гидродвигатель частота вращения вала уменьшается. Уменьшение частоты вращения зависит от жесткости  $C$  его механической характеристики:

$$C = (n_{гд. о} - n_{гд. ф}) / n_{гд. о}, \quad (3.2)$$

где  $n_{гд. о}$  — частота вращения вала гидродвигателя без нагрузки, рассчитываемая по формуле  $n_{гд. о} = n_{ср} i$ ;  $n_{гд. ф}$  — частота вращения вала гидродвигателя под нагрузкой.

Расчетные данные параметров привода вращательного движения шнека

Наименование параметра	Значение параметра						
	16	32	63	125	250	500	1000
Объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6, \text{ м}^3$	16	32	63	125	250	500	1000
Мощность вращательного движения шнека, кВт: расчетная	0,8—1,08	1,12—1,5	2,24—3,4	4—6,2	5,3—9,5	6,8—17,9	9,6—34,1
принятая	1	1,7	3,4	7	10	18	34
Принятая для расчетов частота вращения шнека, об/мин	110	90	80	80	70	60	50
Крутящий момент шнека $M_{кр} \cdot 10^{-1}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	8,7	18	40,6	83,6	136	287	649
Крутящий момент на валу гидродвигателя ( $i = 15 \div 25, \chi = 0,95$ ) $M_{гд} \cdot 10^{-1}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	0,7	1,3	2,9	4,5	7,4	15,4	34,7
Мощность, передаваемая приводом вращательного движения шнека, кВт	1	3,3	6	7,8	13,5	24,5	36

С помощью (3.2) определяют фактическую частоту вращения вала гидродвигателя под нагрузкой:  $n_{гд.ф} = n_{гд.о} (1 - C)$ . Для расчета гидродвигателей  $C \leq 0,05$ .

Мощность  $N_{гд}$ , передаваемая гидродвигателем шнеку,  $N_{гд} = M_{гд} n_{гд.ф} / 9,55$ .

**Пример.** Рассчитать привод вращательного движения шнека для машины с объемом впрыска за цикл  $63 \text{ см}^3$ . Исходные данные: диаметр шнека  $D = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ,  $n_{ср} = 80 \text{ об/мин}$ .

$$1. N_{вр} = K (D \cdot 10^3)^{K_1} 10^3 = 3,41 \cdot 10^{-4} (4 \cdot 10^{-2} \cdot 10^3)^{2,5} 10^3 = 3,4 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

$$2. M_{кр} = 9,55 N_{вр} / n_{ср} = 9,55 \cdot 3,4 \cdot 10^3 / 80 = 406 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

3.  $M_{гд} = M_{кр} / (i \chi_{и}) = 406 / (15 \cdot 0,95) = 28,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . По  $M_{гд} = 28,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$  выбираем модель гидродвигателя, номинальный крутящий момент гидродвигателя  $M_{гд} = 50 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ,  $n_{мах} = 1500 \text{ об/мин}$ .

$$4. q_{н} = \bar{q}_{гд} n_{гд} / (60 \chi_{об.гд}) = 70 \cdot 10^{-6} \cdot 1200 / (60 \cdot 0,98) = 1,43 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}, \text{ где } n_{гд.о} = n_{ср} i = 80 \cdot 15 = 1200 \text{ об/мин.}$$

$$5. N_{н} = P_{гд} q_{н} / (\chi_{эф.гд} \chi_{эф.н}) = 5 \cdot 10^6 \cdot 1,43 \cdot 10^{-3} / (0,8 \cdot 0,7) = 1,28 \cdot 10^4 \text{ Вт.}$$

$$6. n_{гд.ф} = n_{гд.о} (1 - C) = 1200 (1 - 0,05) = 1140 \text{ об/мин.}$$

$$7. N_{гд} = M_{гд} n_{гд.ф} / 9,55 = 50 \cdot 1140 / 9,55 = 5,97 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

8. По давлению  $P = 5 \text{ МПа}$  и производительности  $q_{н} = 1,43 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  выбираем лопастной насос типа 8Г12-25А. Его характеристики:  $q_{н}$  до  $1,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $P = 6,5 \text{ МПа}$ .

$$9. \text{Мощность электродвигателя выбранного насоса: } N_{н} = P q_{н} / (\chi_{эф.гд} \chi_{эф.н}) = 6,5 \cdot 10^6 \cdot 1,67 \cdot 10^{-3} / (0,8 \cdot 0,7) = 1,94 \cdot 10^4 \text{ Вт.}$$

10. Максимально возможная частота вращения гидродвигателя при выбранном насосе:

$$n_{гд.д} = q_{н} \chi_{об.гд} 60 / \bar{q}_{гд} = 1,67 \cdot 10^{-3} \cdot 0,98 \cdot 60 / (70 \cdot 10^{-6}) = 1400 \text{ об/мин.}$$

В табл. 3.3 приведены расчетные данные параметров привода вращательного движения шнека для ряда литьевых машин.

**Расчет параметров привода поступательного движения шнека.** Мощность привода поступательного движения шнека рассчитывают из условия обеспечения необходимого для заполнения формы давления литья и заданного времени впрыска (скорости поступательного движения шнека вперед):

$$N_{впр} = P_{н} q_{н} / \chi_{в}, \quad (3.3)$$

где  $P_{н}$  — давление, создаваемое насосом;  $q_{н}$  — подача насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\chi_{в}$  — КПД насоса и гидросистемы впрыска, принимают равным  $0,85 \div 0,9$ .

Насос должен развивать давление  $P_{н}$ , которое обеспечивает давление литья  $P_{л}$ , необходимое для заполнения системы сопло—форма и преодоления потерь давления в инжекционном узле литьевой машины. Давление, затрачиваемое для затекания полимера в форму, при заполнении изменяется от минимума до максимума, поэтому давление, создаваемое насосом  $P_{н}$ , рассчитывают с учетом коэффициента кратковременной перегрузки  $K_{пер}$  электродвигателя:

$$P_{н} = K_{пер} P_{л} S_{ш} / S_{п}, \quad (3.4)$$

где  $K_{пер}$  — коэффициент перегрузки в зависимости от типа электродвигателя, давления и характера его изменения принимают равным  $0,65 \div 0,9$  (см. табл. 3.4);  $P_{л}$  — давление литья [(см. уравнение (2.7)];  $S_{ш}$  и  $S_{п}$  — площадь шнека и поршня гидроцилиндра впрыска.

Подачу насоса  $q_{н}$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), обеспечивающую необходимую объемную скорость течения полимера в системе сопло—форма  $Q$  или заданное время впрыска (заполнения)  $t$  при номинальном объеме впрыска за цикл  $v_{н}$  ( $\text{м}^3$ ), можно определить соответственно по формуле:

$$q_{н} = K_{ут_1} K_{ут_2} K_{сж} Q S_{п} / S_{ш} = K_{ут_2} Q_{впр} S_{п} / S_{ш}, \text{ если известна } Q \quad (3.5a)$$

$$\text{или } q_{н} = K_{ут_1} K_{ут_2} K_{сж} (v_{н} / t) S_{п} / S_{ш}, \text{ если известно } t, \quad (3.5b)$$

где  $K_{ут_1}$  и  $K_{сж}$  — см. обозначения к уравнению (2.6); произведение  $K_{ут_1}$  и  $K_{сж}$  принимают равным  $k$  (см. табл. 3.9);  $K_{ут_2}$  — коэффициент утечек гидрожидкости, принимают равным 1,05.

Подставляя (3.4) и (3.5) в уравнение (3.3), получаем расчетное соотношение для мощности привода поступательного движения шнека:

$$N_{впр} = K_{пер} K_{ут_1} K_{ут_2} K_{сж} P_{л} Q / \chi = K_{пер} K_{ут_2} P_{л} Q_{впр} / \chi;$$

$$N_{впр} = K_{пер} K_{ут_1} K_{ут_2} K_{сж} P_{л} v_{н} / (t \chi).$$

**Пример.** Рассчитать привод поступательного движения шнека для машины с объемом впрыска за цикл  $63 \text{ см}^3$ . Исходные данные: номинальное давление литья  $P_{л.н} = 100 \text{ МПа}$ ,  $t = 1,2 \text{ с}$ .

$$1. \text{Объемная скорость впрыска (2.6) } Q_{впр} = K_{ут_1} K_{сж} Q = K_{ут_1} K_{сж} v_{н} / t = 1,25 \cdot 63 \cdot 10^{-6} / 1,2 = 65,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с.}$$

$$2. \text{Мощность поступательного движения шнека } N_{впр} = K_{пер} K_{ут_2} P_{л} Q_{впр} / \chi = 0,75 \cdot 1,05 \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot 65,6 \cdot 10^{-6} / 0,9 = 5,74 \text{ кВт.}$$

Таблица 3.4

## Расчет мощности привода поступательного движения шнека

Наименование параметров	Значение параметров						
	16	32	63	125	250	500	1000
Номинальный объем впрыска за цикл, $v_n \cdot 10^6, \text{ м}^3$	16	32	63	125	250	500	1000
Время впрыска, с	0,8	1,0	1,2	1,6	2	2,5	3,2
Коэффициент перегрузки:							
	минимальный			0,65			
	номинальный			0,75			
максимальный			0,9				
Расчетная мощность привода поступательного движения шнека, кВт:							
	минимальная						
	1,75	2,4	4,4	7,4	11,5	19,1	37
	номинальная						
2,1	3,5	5,7	8,9	17,1	28,4	44,3	
максимальная							
2,8	4,4	8,9	12	21,3	32,7	59,9	
Необходимая установочная мощность, кВт							
	3	4,5	9	12	21,5	33	60

В табл. 3.4 представлены расчетные данные мощности привода поступательного движения шнека для различных моделей машин.

Работу инъекционных узлов литьевых машин при поступательном движении шнека можно характеризовать кривыми 1—5 изменения объемной скорости течения полимера в сопле от устанавливаемого в гидроприводе давления  $P$  (рис. 3.1). Характер этих кривых зависит от типа насоса, применяемого в приводе, качества изготовления и степени износа гидроаппаратуры, степени износа шнека и его клапана. Линия 1 показывает теоретическую зависимость объемной скорости течения (расхода) от давления, когда подача насоса не зависит от давления и нет утечек жидкости в гидросистеме и противотока расплава по виткам шнека.

При достижении максимального давления  $P_{\max}$  клапан открывается и насос переключается на слив. В действительности клапан начинает пропускать жидкость при достижении давления  $P_A$ , которое меньше  $P_{\max}$  (точка  $A$ ). Начиная с этого давления подача насоса уменьшается и поэтому снижается расход полимера (кривая 2). Уменьшение подачи и расхода зависит от характеристики клапана. В реальных гидросистемах имеются утечки в гидроаппаратуре, насосе, и поэтому действительная зависимость объемной скорости течения полимера от давления описывается кривыми 3, 4. Если насос имеет характеристику подачи, которая зависит от давления (подача уменьшается с повышением давления), и имеются утечки в гидросистеме и противоток в шнеке, зависимость расхода полимера от давления описывается кривой 5 [14].

В зависимости от сопротивления передней части инъекционного цилиндра и сопла давление, затрачиваемое на течение полимера через сопло, при заданном расходе описывается кривыми I, II, III (сопротивление III > сопротивление I > сопротивление II). Ха-

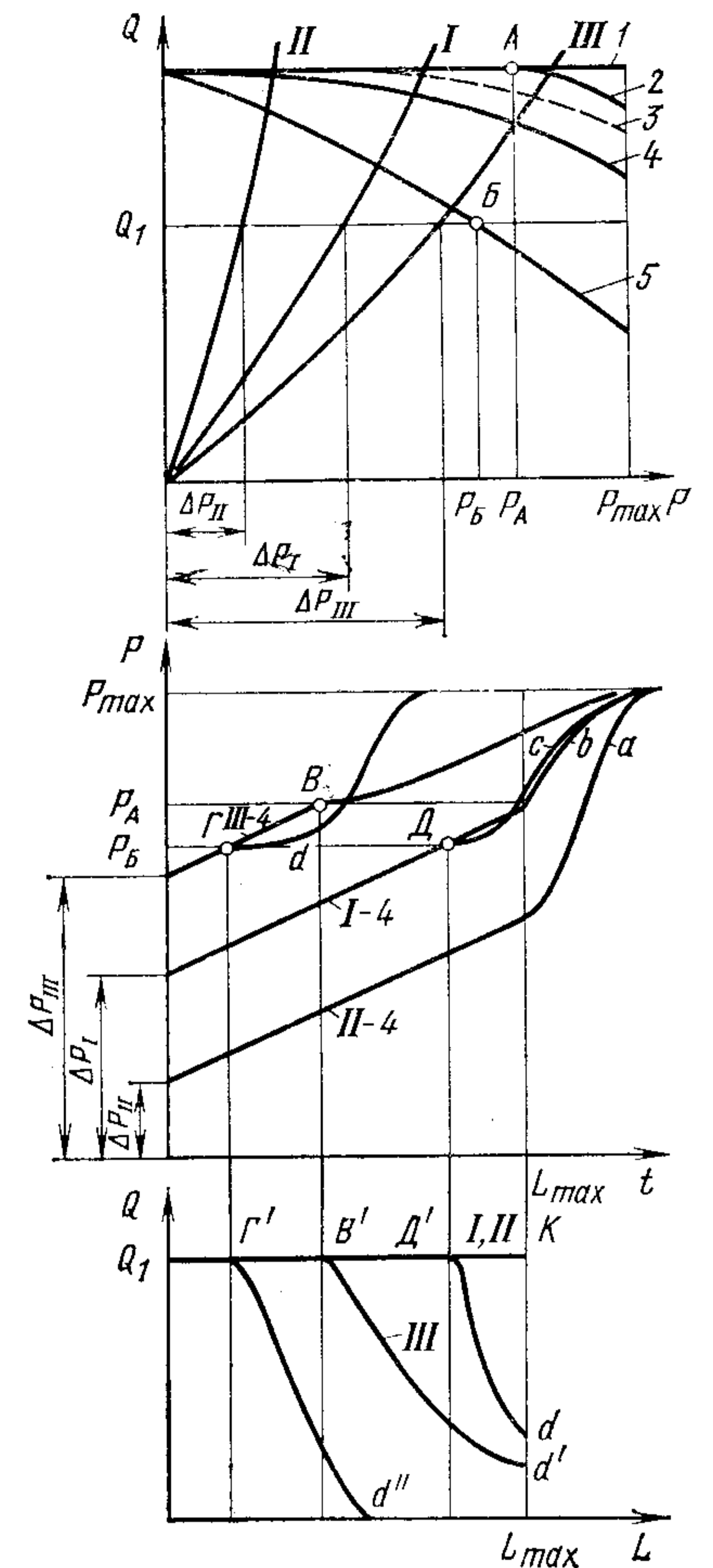
Рис. 3.1. Характеристика работы инъекционного узла литьевой машины

рактеристика привода инъекционного узла и сопротивление цилиндра и сопла влияют на течение полимера в форме и характер изменения в ней давления.

При сравнительно малом сопротивлении цилиндра и сопла (кривая II) потери давления  $\Delta P_{II}$ , затрачиваемые на течение в них полимера при заданном расходе  $Q_1$ , небольшие. Если привод инъекционного узла характеризуется кривой 4 (наиболее типичная для современных машин), давление в форме при ее заполнении развивается по линии II—4, а после ее заполнения (когда достигается  $L_{\max}$ ), давление нарастает по кривой  $a$ . Форма заполняется с постоянной объемной скоростью течения — линия I, II ( $\Gamma'$ ,  $B'$ ,  $D'$ ,  $K$ ). Если привод характеризуется кривой 5, то при этом же сравнительно малом сопротивлении цилиндра и сопла (кривая II), режим течения полимера в форме практически не изменяется.

При большем сопротивлении цилиндра и сопла (кривая I) потери давления  $\Delta P_I$ , затрачиваемые на течение в них полимера при заданном расходе  $Q_1$ , больше:  $\Delta P_I > \Delta P_{II}$ . Если привод инъекционного узла характеризуется кривой 4, давление в форме при заполнении изменяется по линии I—4, а после ее заполнения — по кривой  $b$ . Объемная скорость течения полимера в форме при ее заполнении постоянна — линия I, II ( $\Gamma'$ ,  $B'$ ,  $D'$ ,  $K$ ). Если привод характеризуется кривой 5, то при том же сопротивлении I скорость роста давления при заполнении в точке  $D$  изменяется — сначала скорость уменьшается в связи с уменьшением скорости нарастания сопротивления, а затем увеличивается вследствие охлаждения полимера (давление изменяется по кривой  $c$ ). При этом скорость заполнения в точке  $D'$  начинает уменьшаться (кривая  $D'd$ ).

При очень большом сопротивлении цилиндра и сопла (кривая III) потери давления  $\Delta P_{III}$ , затрачиваемые на течение в них полимера высокие:  $\Delta P_{III} > \Delta P_I > \Delta P_{II}$ . Если привод инъекционного узла характеризуется кривой 4, давление в форме при ее заполнении уве-



личивается по линии  $III—A$  до точки  $B$ , далее темп увеличения давления замедляется, так как уменьшается расход полимера при достижении давления  $P_A$ . Скорость течения полимера в форме снижается по кривой  $B'd'$ . Если привод характеризуется кривой  $5$ , то изменение темпа увеличения давления в форме начинается еще раньше — в точке  $\Gamma$ , а снижение скорости течения полимера в форме в точке  $\Gamma'$ . Давление в форме изменяется по кривой  $d$ , а скорость течения в ней полимера по кривой  $\Gamma'd''$ . В этом случае форма полностью не заполняется.

При заполнении формы в режиме убывающей скорости течения формируется структура изделий, неоднородная по длине, что вызывает различие свойств по длине изделий. Отливаемые изделия по свойствам изменяются от цикла к циклу. Для обеспечения заполнения формы с постоянной объемной скоростью течения необходимо поддерживать инжекционные узлы литьевых машин в исправном состоянии и периодически их проверять. Для проверки состояния клапана шнека после заполнения формы и нарастания в ней максимального давления дают команду на дополнительный впрыск полимера в форму. Если в течение определенного промежутка времени шнек не перемещается вперед, то это свидетельствует об исправном состоянии клапана и инжекционного цилиндра. Перемещение шнека указывает на износ клапана или цилиндра. Работу гидропривода оценивают по кривой зависимости объемной скорости течения полимера в сопле от устанавливаемого в гидроприводе давления при удовлетворительном состоянии клапана шнека. Объемную скорость течения определяют по скорости перемещения шнека.

Наиболее технологичны машины, у которых характеристика инжекционного узла прямая, т. е. объемная скорость течения полимера в сопле не уменьшается при повышении устанавливаемого в гидроприводе давления.

### 3.3. КОНСТРУИРОВАНИЕ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЦИЛИНДРОВ, СОПЕЛ И ШНЕКОВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Технологические свойства полимеров, оказывающие влияние на конструкцию инжекционных узлов. Процессы пластикации определяются технологическими свойствами полимеров, поэтому для обеспечения высокого качества и эффективности пластикации конструкция инжекционных узлов должна учитывать специфику свойств перерабатываемых полимеров. Преобладающими технологическими свойствами, определяющими процессы пластикации, являются температурный диапазон переработки полимера, температурная область перехода в вязкотекучее состояние и особенности этого перехода, вязкость расплава в области температур переработки, термостабильность полимера при температурах переработки, теплофизические свойства.

Температурный диапазон переработки полимера при литье определяет возможную температуру переработки в зависимости от кон-

струкции изделия и характеристик машины. Эта область температур, где полимер имеет реологические свойства, при которых он легко перерабатывается в изделия, не подвергаясь термодеструкции. Этот полимер в изделиях обладает хорошими физико-механическими свойствами и высоким качеством. Температурные диапазоны переработки различных полимеров приведены в работе [9]. Полимер характеризуется хорошей перерабатываемостью по температурному диапазону переработки  $\Delta T_{\text{пер}}$ , если этот диапазон  $\Delta T_{\text{пер}} > 50^\circ\text{C}$ , и низкой перерабатываемостью, если  $\Delta T_{\text{пер}} < 30^\circ\text{C}$ .

Важным технологическим свойством является область температур перехода в вязкотекучее состояние и характер этого перехода по температурному изменению вязкости. Плавным переходом в вязкотекучее состояние характеризуются полистирол и его сополимеры, поликарбонат, полиметилметакрилат, полисульфон, полиэтилен и др. Резким переходом в вязкотекучее состояние характеризуются полиамиды, сополимеры формальдегида, полипропилен и др.

Напряжение сдвига, возникающее при пластикации полимера, определяется его вязкостью при скоростях сдвига, реализуемых при деформировании полимера в процессе пластикации ( $20—700\text{ с}^{-1}$ ). Ньютоновская вязкость полимера (при низкой скорости сдвига) определяет его способность к самопроизвольному вытеканию из сопла литьевой машины. Значения ньютоновской и эффективной вязкости различных полимеров разных марок приведены в работе [9]. Полимер характеризуется высокой ньютоновской вязкостью  $\eta_n$ , если ее значения  $\eta_n > 10^3\text{ Па}\cdot\text{с}$ , средней вязкостью, если  $\eta_n = 4\cdot 10^2 \div 10^3\text{ Па}\cdot\text{с}$ , и низкой вязкостью, если  $\eta_n < 4\cdot 10^2\text{ Па}\cdot\text{с}$  (расплав легко вытекает из сопла).

Термостабильность полимера указывает на возможную продолжительность пребывания полимера при повышенной температуре без изменения его свойств. Данные о термостабильности полимеров разных марок при температурах переработки приведены в работе [9]. Полимер характеризуется хорошей термостабильностью, если ее продолжительность  $t_{\text{тер}} > 30\text{ мин}$ , удовлетворительной, если  $t_{\text{тер}} = 15 \div 30\text{ мин}$ , и низкой, если  $t_{\text{тер}} < 15\text{ мин}$ .

Технологические свойства полимеров определяют требования к конструкции шнекового пластикатора. От температуры переработки полимера и температурного диапазона вязкотекучего состояния зависит мощность обогрева по зонам цилиндра. Полимеры с узким температурным диапазоном переработки требуют большой точности поддержания температуры цилиндра. Особенности перехода полимера в вязкотекучее состояние выдвигают требования к конструкции шнека в зонах, где происходят нагрев и пластикация полимера (к степени сжатия, глубине канала, длине зон загрузки и пластикации).

Вязкость расплавленного полимера при скоростях сдвига, реализуемых на выходе из шнека, предъявляет требования к конструкции шнека в зоне дозирования (к длине, глубине канала), а ньютоновская вязкость определяет особенности конструктивного оформления передней части инжекционного цилиндра, сопла и наконечника



шнека. Термостабильность полимера определяет требования к конструкции шнека (межвитковый объем, число зон, степень сжатия), сопла, наконечника шнека и передней части цилиндра. Термостабильность полимеров требует создания на машине специальных режимов работы, обеспечивающих уменьшение продолжительности пребывания в цилиндре при температуре переработки.

**Конструирование инжекционных цилиндров и сопел.** Инжекционный цилиндр имеет не менее 2—3 (до 5) зон обогрева в зависимости от типоразмера машины и самостоятельный обогрев сопла с отдельным показывающим прибором. Сопла закрепляют на резьбе (рис. 3.2, а) в корпусе цилиндра или через переходник на фланцевом (рис. 3.2, б) или резьбовом соединении. Конструкция закрепления сопла обеспечивает удобство и легкость его демонтажа.

При конструировании инжекционного цилиндра и сопла обеспечивают тщательное уплотнение соединительных узлов. Внутреннюю полость передней части цилиндра выполняют обтекаемой формы, без резких линий перехода, чтобы не образовались «мертвые» зоны, в которых полимер может застаиваться и разрушаться, что ухудшает качество отливаемых изделий.

Инжекционные цилиндры, сопла, шнеки выполняют из высоколегированных сталей, обрабатывают достаточно точно и полируют. При переработке полимеров, выделяющих газообразные продукты, которые могут вступать в соединение с металлом инжекционных узлов, внутренние поверхности цилиндра, сопла и шнека хромируют.

Сопла предназначены для передачи полимера из инжекционного цилиндра в форму. Для учета специфики технологических свойств различных полимеров с целью обеспечения эффективности их переработки применяют сопла открытого типа (рис. 3, 3а) и закрытого типа (для предотвращения вытекания расплава): самозапирающиеся сопла со скользящим штоком (рис. 3, 3, б) и самозапирающиеся сопла

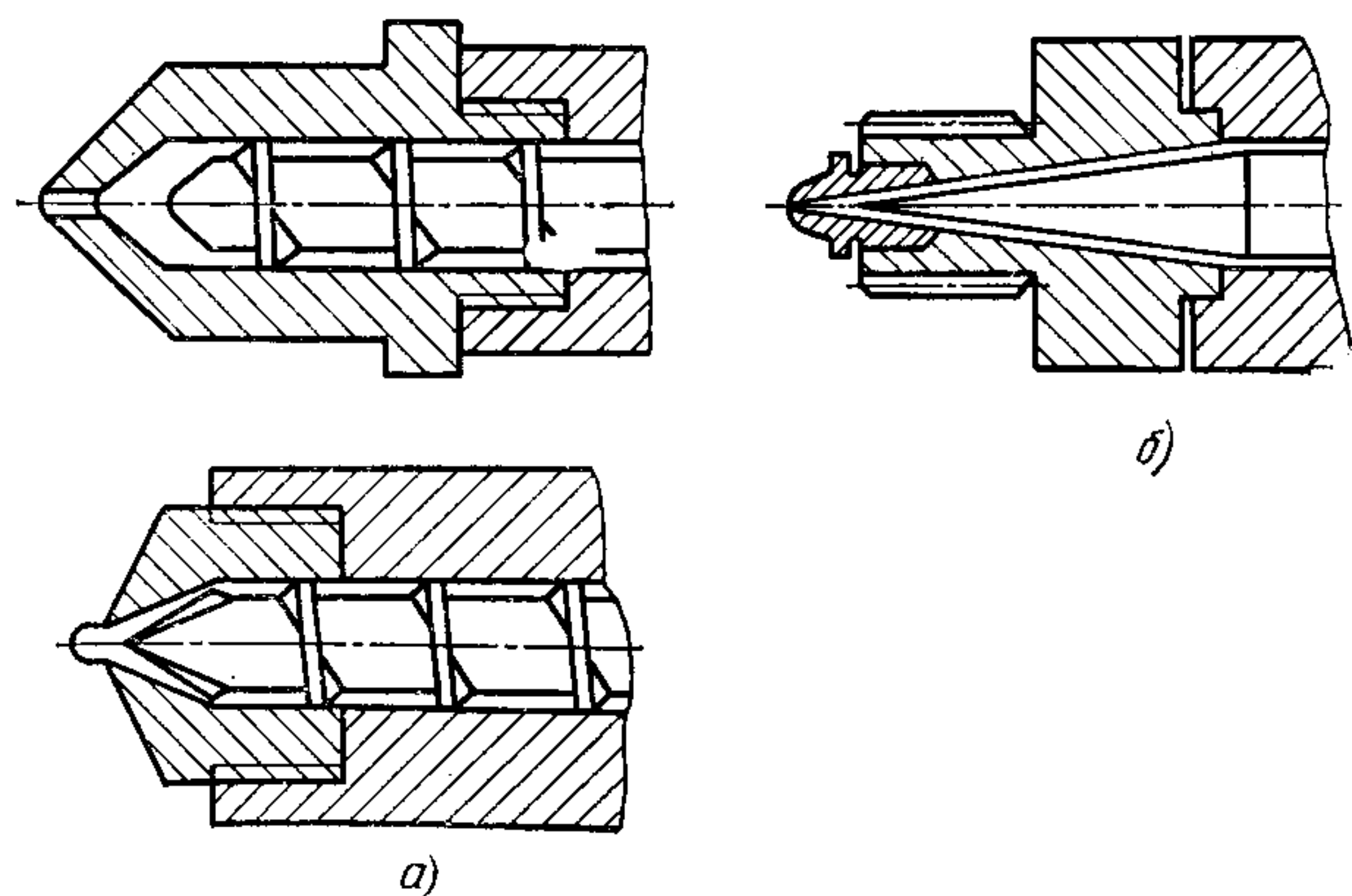
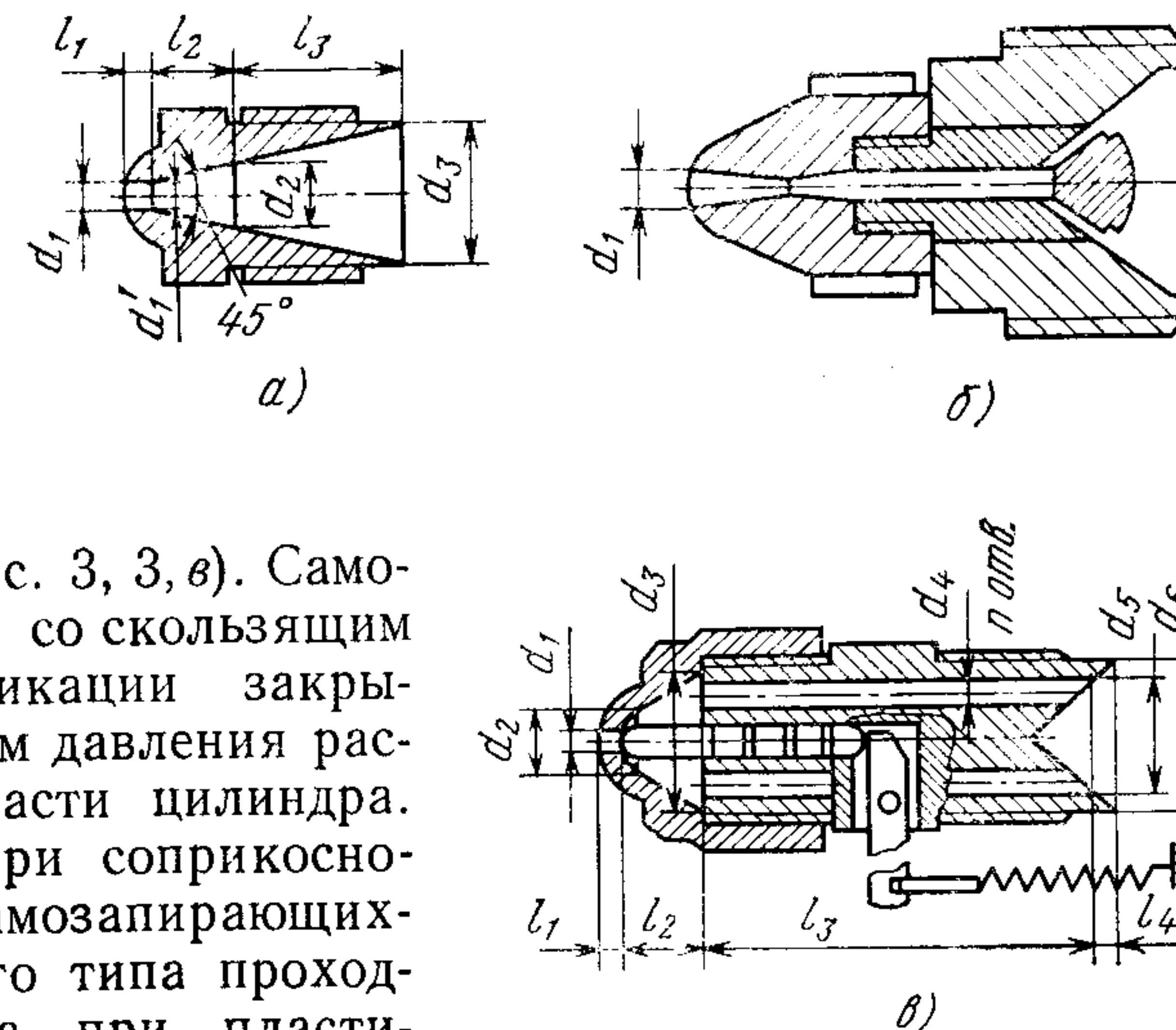


Рис. 3.2. Схема закрепления сопла в инжекционном цилиндре

Рис. 3.3. Схемы сопел



игольча того типа (рис. 3, 3, в). Самозапирающиеся сопла со скользящим штоком при пластикации закрываются под действием давления расплава в передней части цилиндра. Они открываются при соприкосновении с формой. В самозапирающихся соплах игольчатого типа проходное отверстие сопла при пластикации закрывается игольчатым клапаном под действием наружной пружины. При впрыске такое сопло открывается при создании определенного давления расплавом перед шнеком. Тип сопла выбирают в зависимости от технологических свойств перерабатываемого полимера (ньютоновской вязкости, термостабильности), размеров отливаемого изделия и технологических параметров переработки.

При переработке полимеров со сравнительно высокой ньютоновской вязкостью ( $>10^3$  Па·с) применяют сопла открытого типа. Такие сопла создают хорошие условия для очистки полимера. Кроме того, они оказывают минимальное сопротивление при впрыске и обеспечивают хорошую передачу давления в форму. При переработке полимеров со средней ньютоновской вязкостью ( $4 \cdot 10^2$ — $10^3$  Па·с) можно применять самозапирающиеся сопла со скользящим штоком преимущественно для литья крупных толстостенных изделий и самозапирающиеся сопла игольчатого типа для литья мелких тонкостенных изделий. В самозапирающихся соплах сопротивление выше, чем в открытых. Это ведет к увеличению усилия впрыска и вызывает дополнительный разогрев полимера. Поэтому при литье сложных и ответственных деталей, когда опасен перегрев полимера, следует применять открытые сопла.

При переработке полимеров с низкой ньютоновской вязкостью ( $<4 \cdot 10^2$  Па·с) используют самозапирающиеся сопла игольчатого типа. При переработке полимеров, склонных к термодеструкции при повышении температуры, — сопла открытого типа. Такие сопла создают хорошие условия для очистки полимера по сравнению с соплами самозапирающейся конструкции и в них полимер меньше разогревается при впрыске. Вытекание полимера из сопла при пластикации (при отведенном от формы сопле) может быть сведено к минимуму за счет правильного подбора температурного режима литья и раз-

Размеры ( $d \cdot 10^3$  и  $l \cdot 10^3$ , м) внутренних проходных каналов самозапирающихся сопел игольчатого типа (см. рис. 3.3, в)

Размер	Объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup>						
	16	32	63	125	250	500	1000
$d_1$	2,8 (2)	3,2 (2,2)	3,6 (2,5)	4 (2,8)	4,5 (3,2)	5 (3,6)	5,5 (4,0)
$d_2$	10	12	14	16	18,5	22	25
$d_3$	25	25	25	30	30	30	35
$d_4$	5	6	7	8	8	8	8
$d_5$	20	25	25	30	30	30	35
$d_6$	22	30	36	31	31	31	36
$l_1$	2	2	3	3	3	4	4
$l_2$	20	20	20	20	20	20	20
$l_3$	90	90	90	110	110	110	110
$l_4$	5	5	5	5	5	5	5
$n$	4	4	4	4	4	4	5

мера сечения выходного канала, а также при применении режима создания давления при пластикации.

Полимеры с хорошей термостабильностью не выдвигают специальных требований к конструкции сопла. При переработке полимеров с удовлетворительной и низкой термостабильностью сопла не должны иметь резкие переходы и зоны застоя в проходных каналах. Выходной диаметр сопла равен входному диаметру центрального литника литниковой системы с учетом несоосности  $b$  формы и инжекционного цилиндра (2.47).

Расчет диаметра центрального литника  $d_{л.вх}$  одногнездной и многогнездной форм приведен в п. 2.7. Диаметр  $d_{л.вх}$  зависит от толщины изделия  $h$  и от гнездности формы (одногнездная или многогнездная). Приблизительно диаметр выходного канала сопла  $d_1$  с учетом наибольшей толщины изделия  $h$  и гнездности формы можно определить по соотношениям:

для многогнездной формы

$$d_1 = (1,4 \div 1,6) h - b;$$

для одногнездной формы с обычным центральным литником

$$d_1 = (1,0 \div 1,2) h - b;$$

для одногнездной формы с точечным центральным литником:

$d_1 = (0,5 \div 0,7) h - b$  для литья полимеров с высокой ньютоновской вязкостью;

$d_1 = (0,4 \div 0,5) h - b$  для литья полимеров с низкой ньютоновской вязкостью.

Размеры внутренних проходных каналов открытых сопел (см. рис. 3.3, а) для разных типоразмеров машины приведены в табл. 3.5. Размеры даны, исходя из усредненного для каждого типоразмера машины ассортимента изделий. В зависимости от гнездности формы могут применяться варианты сопел, отличающиеся диаметром выходного канала  $d_1$ . Один вариант используется для многогнездных форм, второй (его размеры в табл. 3.5 приведены в скобках) — для одногнездных.

Таблица 3.5

Размеры ( $d \cdot 10^3$  и  $l \cdot 10^3$ , м) внутренних проходных каналов открытых сопел (см. рис. 3.3, а)

Размер	Объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup>						
	16	32	63	125	250	500	1000
$d_1$	2,8 (2)	3,2 (2,2)	3,6 (2,5)	4 (2,8)	4,5 (3,2)	5 (3,6)	5,5 (4,0)
$d_2$	10	12	14	16	18,5	22	25
$d_3$	22	30	36	45	60	80	100
$l_1$	2	2	2	3	3	4	4
$l_2$	8,7 (9,7)	10,6 (11,9)	12,6 (13,9)	14,5 (16)	17 (18,5)	20,5 (22,3)	23,5 (25)
$l_3$	40—70	50—85	55—100	65—110	75—125	90—155	100—175

Для предотвращения возможного вытекания полимера из сопла между циклами при переработке полимеров с небольшой ньютоновской вязкостью выходной канал сопла должен иметь обратный конус (см. рис. 3, 3, а). Соотношение между диаметрами конического канала составляет  $d'_1 = (0,75 \div 0,8) d_1$ .

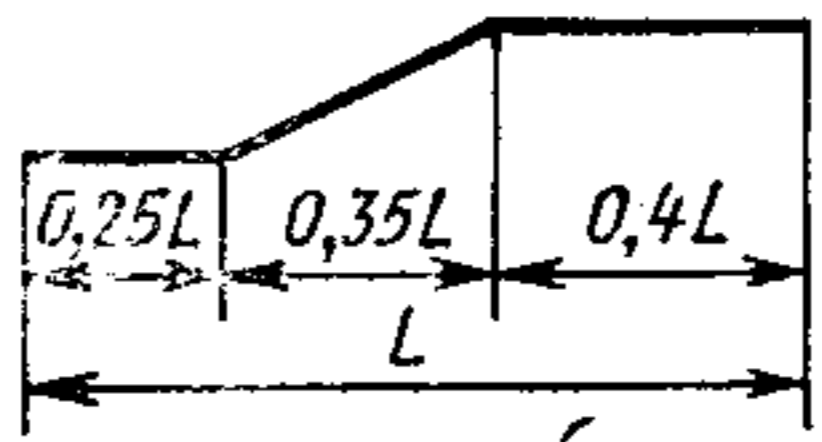
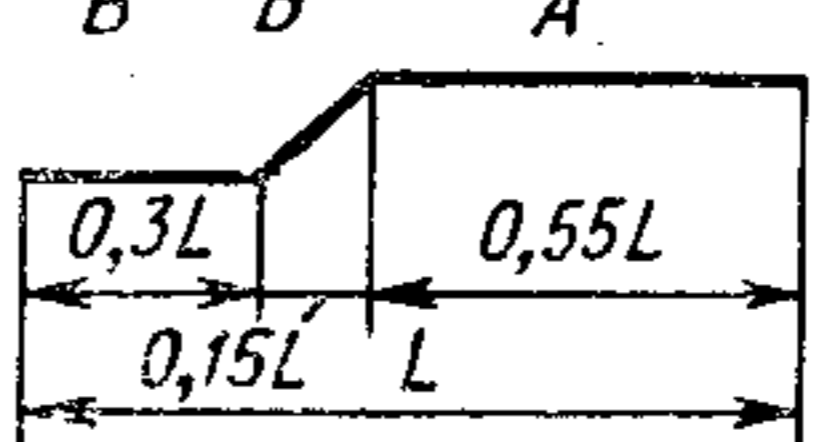
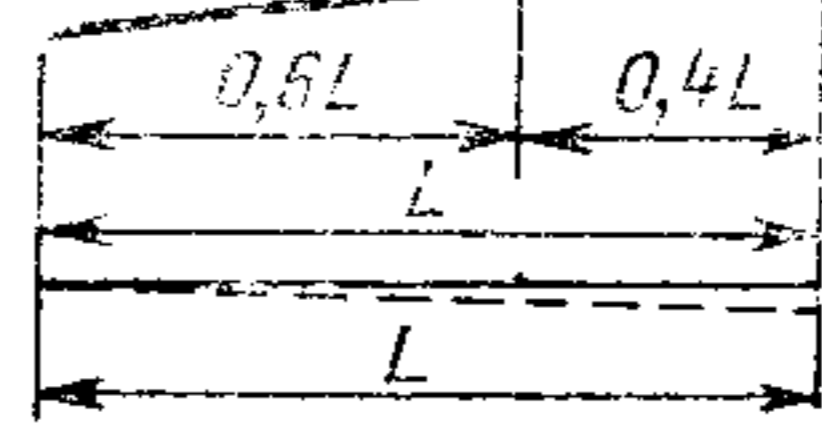
Размеры проходных каналов самозапирающихся сопел игольчатого типа (рис. 3.3, в) для разных типоразмеров машин приведены в табл. 3.6. Эти размеры также определены для усредненного ассортимента изделий для многогнездных и одногнездных форм (значения  $d_1$  указаны в скобках).

Размер выходного диаметра канала сопла со скользящим штоком (см. рис. 3.3, б) принимается такой же, как и для сопел открытого или закрытого типа (см. табл. 3.5, 3.6), а остальные размеры определяются исходя из конструкции сопла и типоразмера машины. При этом для сокращения потерь давления в сопле при впрыске полимера в форму диаметры каналов должны выполняться возможно большего размера, а длины — минимального.

**Конструирование шнеков.** Шнек — один из основных рабочих узлов литьевой машины. Он обеспечивает пластикацию полимера и подачу его в форму. Геометрия шнека (профиль) характеризуется соотношением размеров (длин) отдельных зон, отношением длины шнека к его диаметру, шагом нарезки шнека, глубиной канала шнека в различных его зонах, степенью сжатия. Специализация шнеков по типам перерабатываемых полимеров целесообразна, когда каждая машина использована для переработки определенного полимера. В этом случае достигаются наилучшие условия пластикации и максимальная производительность машины.

Преобладающими свойствами полимеров, определяющими профиль шнека, являются характер перехода в вязкотекучее состоя-

Параметры шнеков

Группа полимеров	Шнек			Наконечник шнека
	Общая длина и соотношение длин зон	Отношение общей длины к диаметру $L/D$	Степень сжатия $i$	
Первая		11—15 (до 18)	2,5—3	С клапаном и без клапана (торпедной конструкции)
Вторая		13—18 (до 25)	2—2,5	С клапаном
Третья		15—18 (для термопластов)	1,5—2 (для термопластов)	Конический с углом 20—30°
		12—16 (для реактопластов)	0,8—1 (для реактопластов)	Конический с углом 40—60°

Полимеры первой группы, не предъявляющие специальных требований к конструкции инжекционного узла и имеющие лучшие технологические свойства, могут перерабатываться с помощью шнеков, предназначенных для полимеров второй группы, поэтому профиль шнека для второй группы полимеров более универсален. Переработка полимеров третьей группы на шнеках с таким профилем затруднительна, поскольку для этих полимеров преобладающее свойство — термостабильность.

В тех случаях, когда на машине установлен шнек для переработки полимеров первой группы, а требуется перерабатывать полимеры второй группы, необходимо установить шнек, соответствующий по профилю второй группе полимеров. Если на машине установлен шнек, соответствующий по профилю полимерам второй группы, а требуется перерабатывать полимер первой группы, замена шнеков не обязательна. При пластике необходимо подобрать технологический режим применительно к свойствам перерабатываемого полимера с учетом профиля установленного шнека. Переработка полимеров первой группы также возможна на шнеках для третьей группы полимеров. При этом, естественно, требуется подобрать соответствующий режим пластике.

ние (определяет соотношение длин зон загрузки и пластикеции), термостабильность и ее чувствительность к сдвиговым напряжениям (определяют межвитковый объем и степень сжатия). По этим признакам полимеры можно разделить на три группы. Для каждой из групп применяют специальный шнек.

Полимеры первой группы легко перерабатываются. Это обусловлено тем, что они имеют плавный переход в вязкотекучее состояние, плавное температурное изменение вязкости в широком температурном интервале и хорошую термостабильность при температурах переработки. К ним относят полистирол и его сополимеры, поликарбонат, полиметилметакрилат, полисульфон, полиэтилен и другие полимеры. Полимеры первой группы не предъявляют особых требований к конструкции инжекционных узлов, выходящие за пределы общих рекомендаций: обработка деталей по 11-му качеству, отсутствие резких переходов и застойных зон и др.

Основной признак полимеров второй группы — резкий переход в вязкотекучее состояние (полиамиды, полипропилен и др.). Это обуславливает специфические конструктивные особенности профиля шнека — сравнительно длинная зона загрузки, чтобы полимер в твердом состоянии не попадал в зону пластикеции, и сравнительно короткая зона пластикеции (уплотнения).

К третьей группе относят полимеры с низкой термостабильностью и полимеры, термостабильность которых чувствительна к сдвиговым напряжениям (полиформальдегид, поливинилхлорид непластифицированный и др.). К этой группе относят также термоактивные материалы. Поскольку преобладающее свойство полимеров этой группы — низкая термостабильность, шнеки для их переработки должны иметь малый межвитковый объем и малую степень сжатия, чтобы материал в этих шнеках подвергался меньшим суммарным сдвигам.

В табл. 3.7 даны схемы шнеков (изменение глубины нарезки по его длине) для каждой группы полимеров. Шнеки для полимеров первой и второй групп имеют три зоны: зону загрузки  $A$ , пластикеции (уплотнения)  $B$  и дозирования  $B$ . Шнеки для полимеров третьей группы выполняются с одной или двумя зонами: с зонами загрузки и пластикеции или только с зоной пластикеции. В табл. 3.7 для каждой группы шнеков даны отношение длины каждой зоны шнека (загрузки, пластикеции и дозирования) к его общей длине, относительная длина шнека (отношение длины шнека к его диаметру) и степень сжатия в зоне пластикеции.

Шнеки для полимеров третьей группы имеют каналы во внутренней полости для подвода охлаждающего агента (вода или воздух). Охлаждение шнека позволяет быстро снижать температуру полимера в случае нарушения температурного режима переработки, вызывающего перегрев и разложение полимера. В некоторых случаях во внутреннюю полость шнека можно подводить жидкий агент с заданной температурой для создания лучших условий прогревания полимера в цилиндре.

Модификации шнеков для литьевых машин

Параметр	Модель машины (условная)							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6, \text{ м}^3$	16	32	63	125	250	500	1000	2000
Диаметр шнека $D \cdot 10^3, \text{ м}$ :								
$D_{\min}$	20	25	30	40	50	60	80	100
$D_{\text{н}}$	25	30	40	50	60	80	100	120
$D_{\max}$	30	40	50	60	80	100	120	—
Давление литья $P_{\text{л}}, \text{ МПа}$ :								
$P_{\text{л. max}}$	156	144	178	156	173	159,5	187,2	—
$P_{\text{л. н}}$	100	100	100	100	120	120	120	120
$P_{\text{л. min}}$	69,5	56,2	64	69,5	67,5	67,5	83,5	—
Объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6, \text{ м}^3$ :								
$v_{\min}$	7,85	13,6	33,8	62	124	232	498	990
$v_{\text{н}}$	16	32	63	125	250	500	1000	2000
$v_{\max}$	22,1	55,8	100	180	445	780	1420	—

Полимеры третьей группы также могут быть переработаны на шнеках для полимеров второй и первой групп. Однако переработка на таких шнеках полимеров, отличающихся низкой термостабильностью, требует более сложного подбора технологического режима пластикации, который может быть не устойчив и требует постоянного и точного контроля. Специальные шнеки для третьей группы полимеров созданы именно с той целью, чтобы упростить операцию пластикации полимера.

Создание единого универсального шнека для различных полимеров подразумевает использование шнеков для второй или третьей группы полимеров как для переработки полимеров этих групп, так и для переработки полимеров первой группы. Конструкция универсального шнека для полимеров различных групп следующая. Шнек имеет длинную загрузочную зону (55 % общей длины), короткую зону сжатия (15 % общей длины, или 1,5—3 витка), зону дозирования длиной не более 30 % (2,5—4 витка) и степень сжатия 2—2,2 (сжатие достигается за счет изменения глубины канала). Загрузочная зона должна иметь небольшую глубину витка с тем, чтобы не увеличивать межвитковый объем шнека.

**Модификация шнеков по диаметрам.** Такая модификация обеспечивает получение на одних и тех же машинах изделий различных размеров и переработку полимеров с разными технологическими свойствами. При переработке полимеров, имеющих разную вязкость, необходимо обеспечивать на машине различные давления литья, что достигается установкой шнеков разных диаметров. Давление впрыска при переработке полимеров зависит не только от свойств перерабатываемого полимера, но и от конфигурации и размеров изделий (тонкостенные, толстостенные), от отношения длины пути расплава к толщине стенки, конструкции и размеров литника, температурного режима литья и т. д. Так, при изготовлении деталей сложной конфигурации или тонкостенных деталей больших размеров из полимеров со сравнительно высокой вязкостью требуется большое давление литья. И наоборот, при изготовлении толстостенных изделий из полимеров низкой вязкости используют небольшое давление литья. В табл. 3.8 дана модификация шнеков по диаметрам применительно к различным типоразмерам литьевых машин (расчет приведен в п. 3.4).

**Конструирование наконечников шнека.** Наконечники шнеков конструируют применительно к различным полимерам в зависимости от их технологических свойств (вязкости, термостабильности). Наконечники шнеков выполняют без клапана и с обратным клапаном для предотвращения при впрыске утечки полимера в зазоре между витками шнека и внутренней стенкой цилиндра, а также по каналу шнека. Наконечники шнеков без клапана (рис. 3.4, а) выполняют торпедной конструкции (гладкие, цилиндрические с коническим хвостом), которая обеспечивает хорошую обтекаемость и малое сопротивление при течении расплава.

Обратный клапан может быть выполнен в виде подвижной кольцевой втулки (рис. 3.4, б) с рядом сквозных отверстий (или коль-

цевым каналом) или в виде шарика. Втулку 2 устанавливают на конце шнека. Осевое перемещение втулки в одном направлении ограничено наконечником шнека 1, а в другом — самим шнеком 3. При вращении шнека полимер продвигается и прижимает втулку к наконечнику. При этом проходные каналы во втулке (отверстия или кольцевой канал) открыты, полимер через них проходит и попадает в переднюю часть цилиндра (I). При поступательном движении шнека вперед при впрыске втулка под давлением полимера перемещается назад и закрывает проходные каналы (II). При этом передняя часть цилиндра изолируется от шнековой полости. Торцовые поверхности клапана и уплотнительные (конические) поверхности конца шнека притирают, что обеспечивает их уплотнение. Для надежного уплотнения эти поверхности очень чисто обраба-

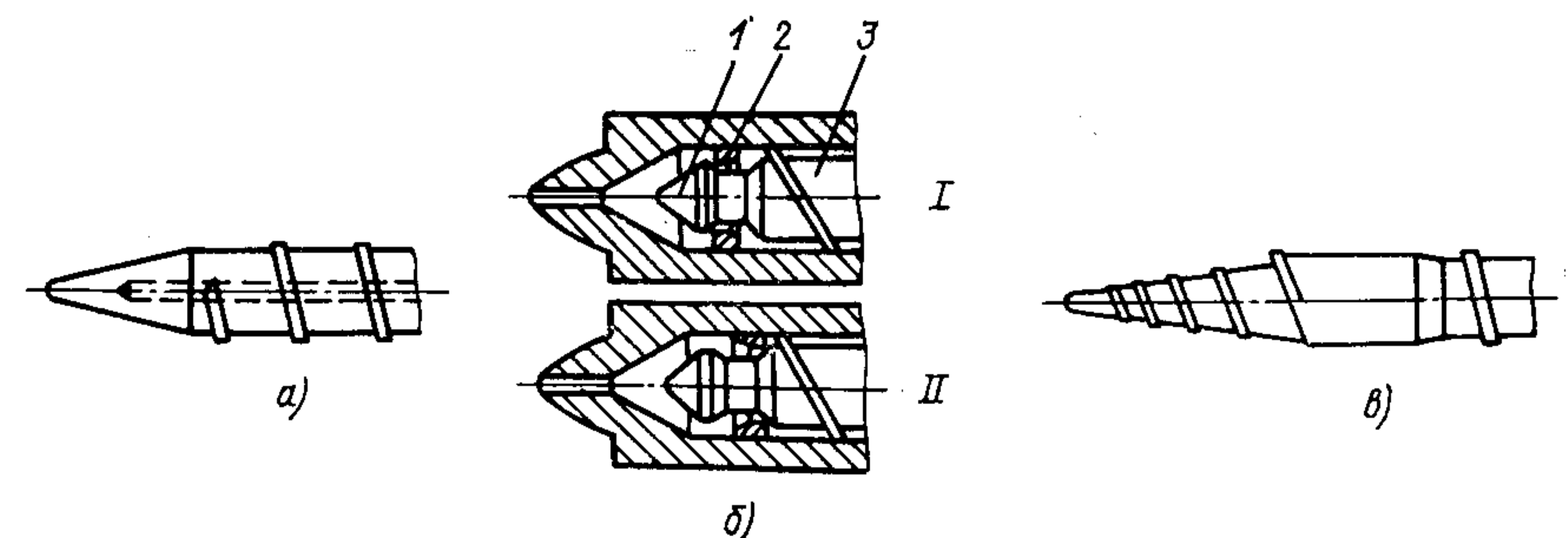


Рис. 3.4. Схемы наконечников шнеков:

а — без клапана; б — с обратным клапаном в виде кольцевой втулки (I — клапан открыт, II — клапан закрыт); в — со спиральной нарезкой

тывают. Внешний диаметр втулки равен диаметру цилиндра с допуском по скользящей посадке.

Поскольку конструкции наконечников шнеков с клапанами обеспечивают более стабильную порцию полимера, их применяют чаще, чем без клапанов. Среди конструкций с клапанами наиболее часто используют клапан в виде кольцевой втулки, в котором заставление полимера в каналах сводится к минимуму.

Для переработки высоковязких полимеров применяют шнеки с наконечниками без клапана. Для переработки полимеров со средней вязкостью — наконечники шнеков с клапанами и без клапана. При переработке полимеров с низкой вязкостью шнек обязательно снабжают наконечником с клапаном.

При переработке нетермостабильных полимеров третьей группы с высокой вязкостью используют наконечник шнека без клапана. Для уменьшения застойных зон применяют наконечники шнеков простой геометрической формы, чаще всего гладкий конический наконечник (см. рис. 3.4, а). Такая конструкция обеспечивает оптимальные условия переработки и предотвращает скопление полимера от предшествующего цикла. Угол конической части наконечника шнека для термопластов не превышает  $20\text{—}30^\circ$ , для реактопластов достигает  $40\text{—}60^\circ$ .

В некоторых случаях (при работе машины в интрузионных режимах) наконечник шнека выполняют коническим со спиральной нарезкой (рис. 3.4, в), обеспечивающей дополнительный разогрев полимера на наконечнике непосредственно перед поступлением его в форму.

### 3.4. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И РАЗМЕРОВ ШНЕКОВ

Параметры шнеков литьевых машин рассчитывают с учетом требований пластикации и впрыска. В экструдерах размеры шнека рассчитывают только по пластикационной способности. В литьевых машинах к условиям обеспечения необходимой пластикационной способности добавляются требования обеспечения выдавливания определенной порции полимера за один ход шнека. Требования к шнеку, вытекающие из условия обеспечения необходимых параметров процесса литья, отражаются на его конструктивных особенностях и параметрах.

Получение заданного объема отливки за один заданный ход шнека обеспечивается определенным его диаметром. Усилие впрыска при выбранном давлении в гидросистеме впрыска обеспечивается соблюдением определенного размерного соотношения между диаметром поршня гидроцилиндра впрыска и диаметром шнека. Температура полимера зависит от режима пластикации (температуры цилиндра по зонам, частоты вращения шнека, давления пластикации) и геометрии (профиля) шнека. Поэтому требуемая температура полимера предопределяет конструкцию шнека и привода вращательного и поступательного движения шнека. Скорость впрыска

задает конструкцию и характеристики привода поступательного движения шнека (давление в гидросистеме, подачу насоса). Время пластикации определяется производительностью шнека и зависит от диаметра шнека и его геометрии (длины шнека, глубины канала, шага и т. д.), а также технологическими параметрами процесса литья (температурой полимера, частотой вращения шнека, давлением пластикации), которые, в свою очередь, связаны с геометрией шнека. По значению и диапазону регулируемого давления пластикации определяют конструкцию и параметры гидропривода шнека. При расчете конструктивных параметров шнека литьевых машин (диаметра, геометрии шнека, хода) следует учитывать все факторы, влияющие на его работу и обеспечивающие получение необходимых технологических параметров процесса литья.

Основной размер шнека, определяющий объем впрыска за цикл, давление литья и пластикационную способность, — диаметр. Геометрию шнека (длину, глубину канала, степень сжатия) рассчитывают, исходя из особенностей условий пластикации (подготовки) заданной порции полимера с учетом его физико-технологических свойств. Геометрические параметры шнека также связаны с его диаметром, поэтому диаметр шнека должен рассчитываться дополнительно из условий получения определенной геометрии шнека. Таким образом, диаметр шнека литьевых машин рассчитывают из условий обеспечения объема впрыска за цикл, пластикационной способности давления, литья и определенной геометрии шнека. Кроме того, при расчете диаметров шнеков для ряда литьевых машин, а также при разработке модификаций шнеков для машин, входящих в гамму, добавляется еще одно условие — размерное соотношение между диаметрами шнеков различных по типоразмерам машин.

Расчет диаметра шнека из условий обеспечения заданных параметров литья. Диаметр шнека рассчитывают из условий обеспечения заданных объема впрыска за цикл  $v_n$  (номинального), пластикационной способности  $q_{пл}$  и номинального давления литья  $P_d$ . Расчет диаметра шнека из условия обеспечения необходимого объема впрыска за цикл  $v_n$  производится в следующей последовательности. Рассчитывают объем полимера  $v_p$ , подготовленного в шнековом пластикаторе к впрыску:

$$v_p = v_n k, \quad (3.6)$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий утечки и сжатие полимера при впрыске (табл. 3.9).

Расчетный объем полимера  $v_p$  равен объему цилиндрической камеры, находящейся перед шнеком диаметром  $D_1$  при ходе шнека  $H_{ш}$ :

$$v_p = \pi D_1^2 H_{ш} / 4 = \pi D_1^2 D_1 k_1 / 4 = \pi D_1^3 k_1 / 4, \quad (3.7)$$

где  $k_1$  — отношение хода шнека к диаметру  $H_{ш}/D_1$  (см. табл. 3.9).

Из формул (3.6) и (3.7) получается соотношение для расчета диаметра шнека  $D_1$ , обеспечивающего требуемый объем впрыска за цикл  $v_n$ :

$$D_1 = [v_n k / (0,785 k_1)]^{1/3}.$$

Таблица 3.9

## Расчетные коэффициенты для определения геометрии шнека

Расчетный коэффициент	Объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6, \text{ м}^3$						
	16	32	63	125	250	500	1000
$k^*$	1,2	1,25	1,25	1,3	1,3	1,35	1,35
$k_1$	1,5—1,6	1,7—2	1,7—2	2—2,5	2—2,5	2,5—3	2,5—3
$k_2$	0,13—0,18	0,13—0,18	0,13—0,16	0,125—0,15	0,125—0,14	0,12—0,13	0,11—0,125
$k_3$	0,8 ÷ 1,0 (большие значения для больших значений $L/D$ )						
$k_4$	0,08 ÷ 0,13 (большие значения для меньших значений $D$ )						

\* Значения приняты с учетом изменения размеров полости формы при формовании изделий.

Диаметр шнека из условия обеспечения пластикационной способности можно рассчитывать по формулам, рекомендуемым для расчета производительности экструдеров. Однако в связи с тем, что эти формулы содержат ряд параметров, которые являются предметом настоящего расчета, по ним затруднен расчет диаметра шнека. Для этой цели могут быть полезны приближенные эмпирические или практические соотношения. В качестве примера подобных приближенных соотношений приведем формулу:

$$q_{пл} = (0,7 \div 1,4) (D_2 \cdot 10^2)^{2,5},$$

где  $D_2$  — диаметр шнека, определяемый из условий обеспечения заданной пластикационной способности.

Использование эмпирических формул для расчета диаметра шнека  $D_2$  из условия обеспечения заданной пластикационной способности не исключает целесообразность определения фактической пластикационной способности по уточненным соотношениям после расчета всех параметров шнека.

Для расчета диаметра шнека  $D_3$  из условия обеспечения заданного давления литья  $P_л$  предварительно определяют диаметр поршня гидроцилиндра впрыска. По заданному давлению литья  $P_л$ , давлению  $P_{гд}$  в гидросистеме и диаметру шнека  $D_1$  или  $D_2$  определяется диаметр поршня гидроцилиндра:

$$D_{п} = (P_л D_1^2 / P_{гд})^{1/2}.$$

Диаметр  $D_{п}$  корректируют по стандартному ряду диаметров. По найденному значению  $D_{п1}$  определяют диаметр шнека  $D_3$ :

$$D_3 = (P_{гд} D_{п1}^2 / P_л)^{1/2}.$$

По полученным значениям  $D_1, D_2, D_3$  устанавливают номинальный диаметр шнека  $D_н$  — наибольшее из трех значений диаметров, скорректированное по стандартному ряду.

Определяют фактическое давление литья при номинальном диаметре шнека  $D_н$  и диаметре поршня  $D_{п1}$ :

$$P_{ф} = P_{гд} D_{п1}^2 / D_н^2.$$

Ход шнека  $H_{ш}$  при расчетном диаметре шнека  $D_н$  уточняют по выражению [см. уравнение (3.7)]:

$$H_{ш} = 4v_p / (\pi D_н^2).$$

**Пример 1.** Определить диаметр и ход шнека для литейной машины с объемом впрыска за цикл  $63 \text{ см}^3$ . Исходные данные и расчетные коэффициенты:  $v_н = 63 \times 10^{-6} \text{ м}^3$ ;  $q_{пл} = 14 \text{ кг/ч}$ ;  $P_л = 100 \text{ МПа} = 100 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ;  $P_{гд} = 5 \text{ МПа} = 5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ;  $k = 1,25$ ;  $k_1 = 1,7$ .

$$1. D_1 = [v_н k / (0,785 k_1)]^{1/3} = [63 \cdot 10^{-6} \cdot 1,25 / (0,785 \cdot 1,7)]^{1/3} = 3,88 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

$$2. D_2 = (q_{пл} / 0,7)^{1/2,5} 10^{-2} = (14 / 0,7)^{1/2,5} 10^{-2} = 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

$$3. D_{п} = (P_л D_1^2 / P_{гд})^{1/2} = [100 \cdot 10^6 (3,88 \cdot 10^{-2})^2 / (5 \cdot 10^6)]^{1/2} = 0,173 \text{ м}.$$
 По стандартному ряду диаметров принимаем  $D_{п1} = 0,175 \text{ м}$ .

$$4. D_3 = (P_{гд} D_{п1}^2 / P_л)^{1/2} = [5 \cdot 10^6 \cdot 0,175^2 / (100 \cdot 10^6)]^{1/2} = 3,91 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

По найденным значениям диаметра  $D_1, D_2$  и  $D_3$  принимаем номинальный диаметр шнека  $D_н = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .

$$5. H_{ш} = 4v_p / (\pi D_н^2) = 78 \cdot 10^{-6} / [0,785 (4 \cdot 10^{-2})^2] = 6,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

$$6. P_{ф} = P_{гд} D_{п1}^2 / D_н^2 = 5 \cdot 10^6 \cdot 0,175^2 / (4 \cdot 10^{-2})^2 = 95,8 \cdot 10^6 \text{ Па} = 95,8 \text{ МПа}.$$

**Расчет профиля шнека.** Геометрия (профиль) шнека определяет объем полимера, находящийся в его межвитковом пространстве. Объем полимера, который может находиться в шнеке, зависит от его термостабильности (возможной продолжительности пребывания при температуре переработки). При впрыске в форму подается только часть полимера, которая находится перед шнеком. Остальной материал, который находится в межвитковом пространстве шнека, остается в цилиндре и подвергается воздействию высокой температуры в течение двух-трех циклов, что может вызвать термодеструкцию нетермостабильных полимеров. Поэтому объем полимера, находящийся в межвитковом пространстве шнека, должен быть ограничен.

Объем полимера в межвитковом пространстве шнека определяется геометрическими параметрами шнека (диаметром, шагом, шириной витка, глубиной канала, длиной каждой зоны, числом витков). Общий объем межвиткового пространства шнека  $v_{ш}$  равен сумме объемов межвиткового пространства каждой зоны шнека:

$$v_{ш} = v_з + v_{п} + v_{д} = v'_з z_з + v'_{п} z_{п} + v'_{д} z_{д},$$

где  $v_з, v_{п}$  и  $v_{д}$  — объем межвиткового пространства шнека в зонах загрузки, пластикации и дозирования;  $v'_з, v'_{п}$  и  $v'_{д}$  — объем одного витка в зонах загрузки, пластикации (условный) и дозирования;  $z_з, z_{п}$  и  $z_{д}$  — число витков в каждой зоне.

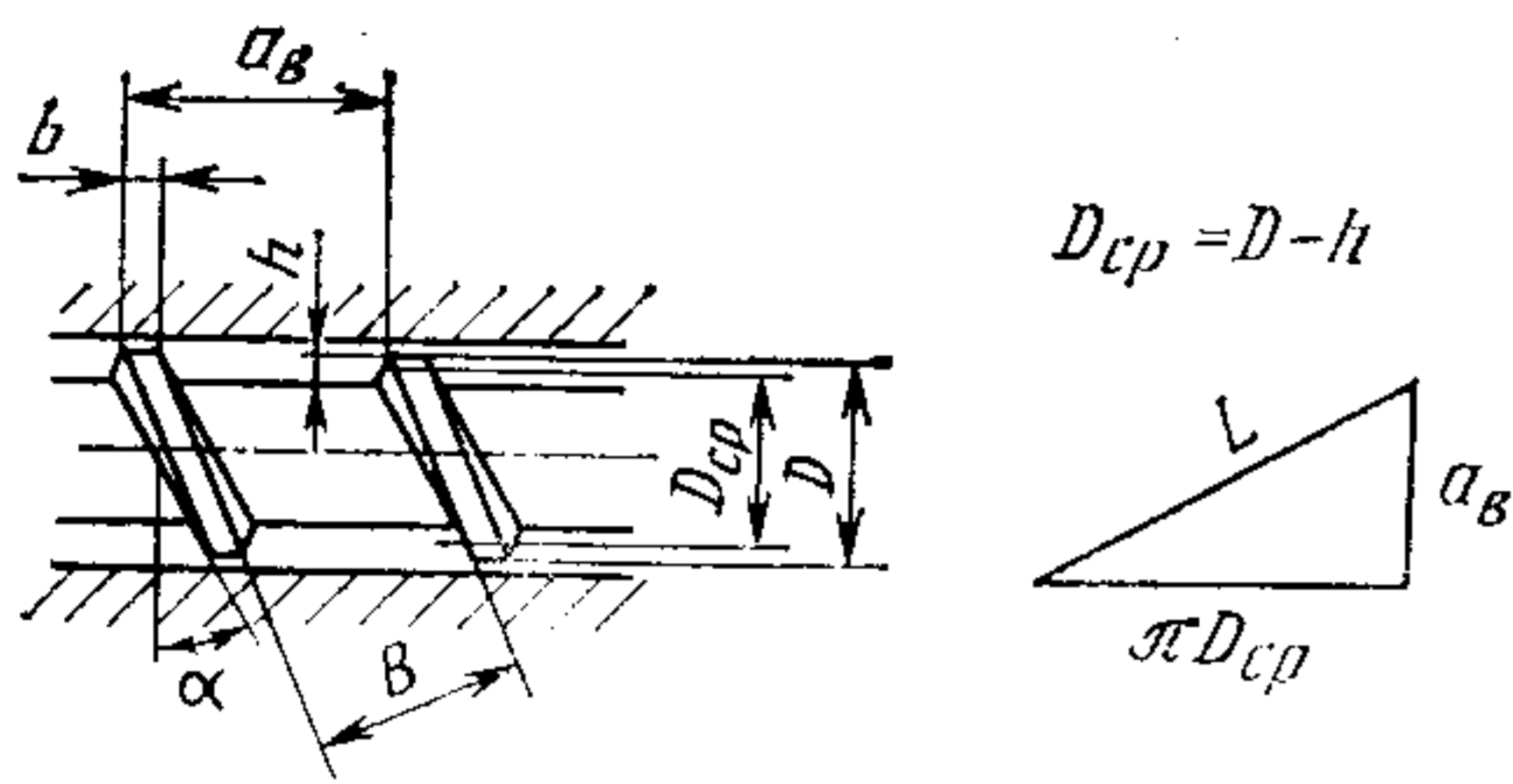


Рис. 3.5. Схема канала шнека

Объем одного витка можно рассчитать по следующим параметрам шнека: диаметру  $D$ , шагу  $a_B$ , глубине  $h$  и ширине канала  $b$ , углу наклона винтовой линии  $\alpha$  (рис. 3.5). Объем витка шнека  $v'$  равен объему развернутой пластины длиной  $L = [a_B^2 + (\pi D_{cp})^2]^{1/2}$  и шириной  $B = (a_B - b) \cos \alpha$  и высотой  $H = h$ :

$$v' = LBH = [a_B^2 + \pi^2 (D - h)^2]^{1/2} (a_B - b) \cos \alpha h = [a_B^2 + \pi^2 (D - h)^2]^{1/2} (a_B - b) h / (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)^{1/2}. \quad (3.8)$$

Основные геометрические параметры шнека можно выразить через коэффициенты  $k_2$ ,  $k_3$  и  $k_4$ :  $k_2$  — отношение глубины канала шнека в зоне загрузки к диаметру ( $h/D$ );  $k_3$  — отношение шага шнека к диаметру ( $a_B/D$ );  $k_4$  — отношение ширины витка канала шнека к диаметру ( $b/D$ ). Значения коэффициентов для различных объемов впрыска за цикл приведены в табл. 3.9.

Заменяя отношения геометрических параметров шнека в формуле (3.8) коэффициентами, получаем объем одного витка шнека в зоне загрузки:

$$v'_3 = \pi D^3 k_2 (k_3 - k_4) [(1 - k_2)^2 + (k_3/\pi)^2]^{1/2} / [1 + (k_3/\pi)^2]^{1/2}, \quad (3.9)$$

где  $k_3/\pi = \operatorname{tg} \alpha = a_B/(\pi D)$ .

Аналогично определяют объем полимера в зоне дозирования. Глубина канала в этой зоне принимается равной  $h/k_5$ , где  $k_5$  — отношение глубины канала в зоне загрузки к глубине его в зоне дозирования,  $k_5$  приближенно определяется степенью сжатия шнека, которую выбирают по табл. 3.7 для соответствующих полимеров. Объем одного витка в зоне дозирования составляет:

$$v'_d = \pi D^3 (k_2/k_5) (k_3 - k_4) [(1 - k_2/k_5)^2 + (k_3/\pi)^2]^{1/2} / [1 + (k_3/\pi)^2]^{1/2}. \quad (3.10)$$

При расчете объема одного витка шнека в зоне пластикации принимают высоту канала, равную полусумме высот каналов в зоне загрузки и дозирования. Тогда объем одного витка шнека в зоне пластикации составит:

$$v'_n = \pi D^3 k_2 (k_3 - k_4) [1 + (1/k_5)] \{ [1 - 0,5k_2(1 + k_5^{-1})]^2 + (k_3/\pi)^2 \}^{1/2} \times [1 + (k_3/\pi)^2]^{-1/2}. \quad (3.11)$$

Для упрощения формул (3.9) и (3.11) вводят расчетные коэффициенты  $k_a$ ,  $k_b$ ,  $k_B$ ,  $k_r$  и  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ :

$$k_a = [1 + (k_3/\pi)^2]^{-1/2};$$

$$k_b = \pi [(1 - k_2)^2 + (k_3/\pi)^2]^{1/2};$$

$$k_B = 0,5\pi \{ [1 - 0,5k_2(1 + k_5^{-1})]^2 + (k_3/\pi)^2 \}^{1/2};$$

$$k_r = \pi [(1 + k_2/k_5)^2 + (k_3/\pi)^2]^{1/2};$$

$$c_1 = k_2 (k_3 - k_4) k_a k_b;$$

$$c_2 = k_2 (k_3 - k_4) (1 + k_5^{-1}) k_a k_B;$$

$$c_3 = k_2 (k_3 - k_4) k_a k_r / k_5.$$

Тогда формулы (3.9) — (3.11) можно записать в виде

$$v'_3 = D^3 c_1; \quad v'_n = D^3 c_2; \quad v'_d = D^3 c_3.$$

На рис. 3.6 приведены графические зависимости между коэффициентами, определяющими геометрические параметры шнека ( $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_5$ ), и коэффициентами  $k_a$ ,  $k_b$ ,  $k_B$ ,  $k_r$ . Этими графиками можно пользоваться для расчета объема межвиткового пространства шнека. Для графического расчета объема одного витка шнека удобно пользоваться величиной  $(v')^2/D^6$ . Формула (3.8) после преобразования и введения величин  $A = (\pi^2 + k_3^2)/\pi^2$ ;  $B = (\pi^2 + k_3^2)^{0,5} / [\pi^3 (k_3 - k_4)^2]$ , принимает вид:

$$(v')^2/D^6 = (k_2^4 - 2k_2^3 + Ak_2^2)/B. \quad (3.12)$$

Коэффициент  $k_2 = h/D$  является функцией отношения  $(v')^2/D^6$ , которая может быть выражена графически. На рис. 3.7 эта зависимость представлена для различных значений коэффициентов  $k_3$  и  $k_4$ .

Для расчета профиля шнека исходными величинами являются следующие параметры и коэффициенты: номинальный объем впрыска

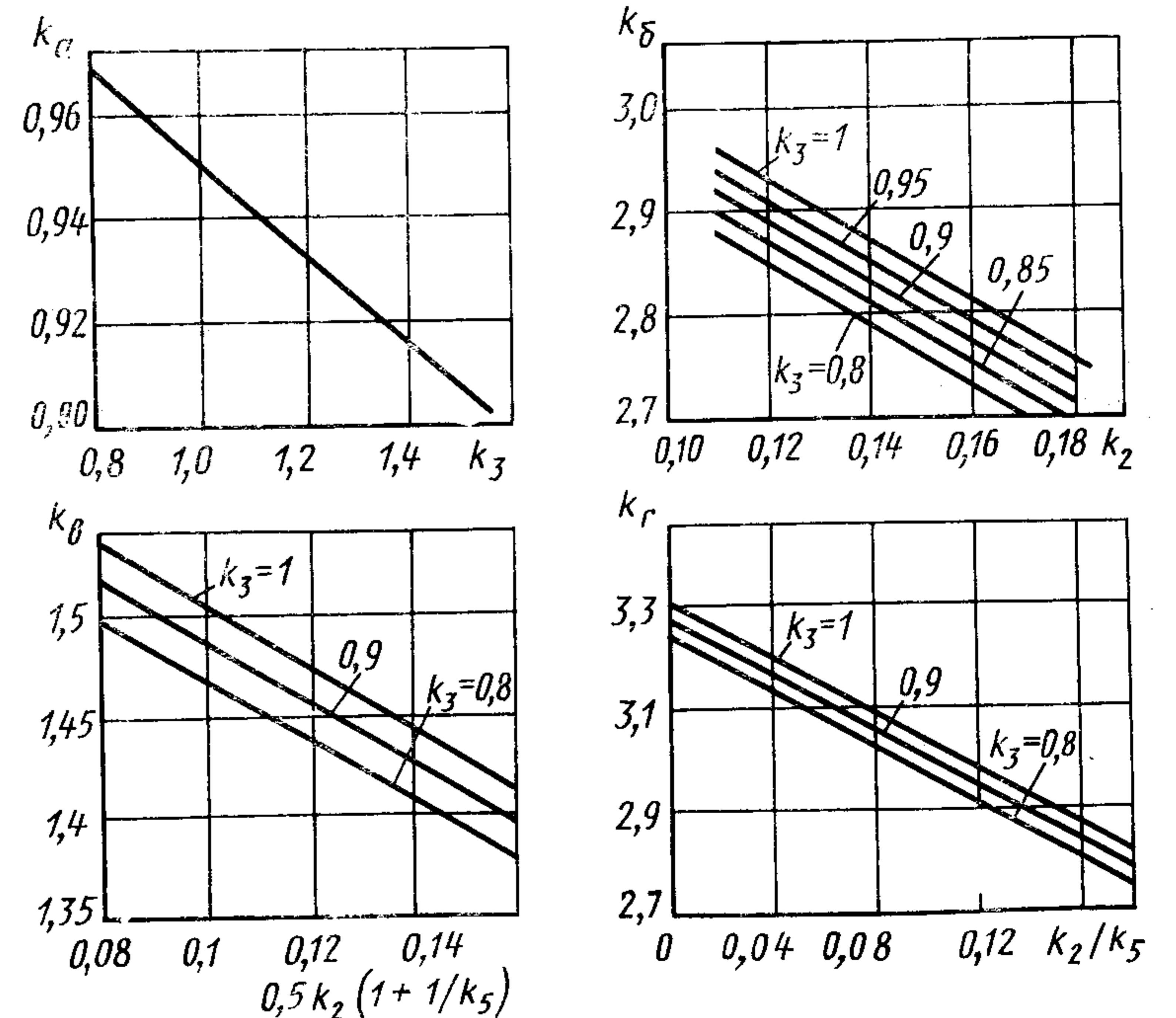


Рис. 3.6. Зависимости между коэффициентами, определяющими геометрические параметры шнека

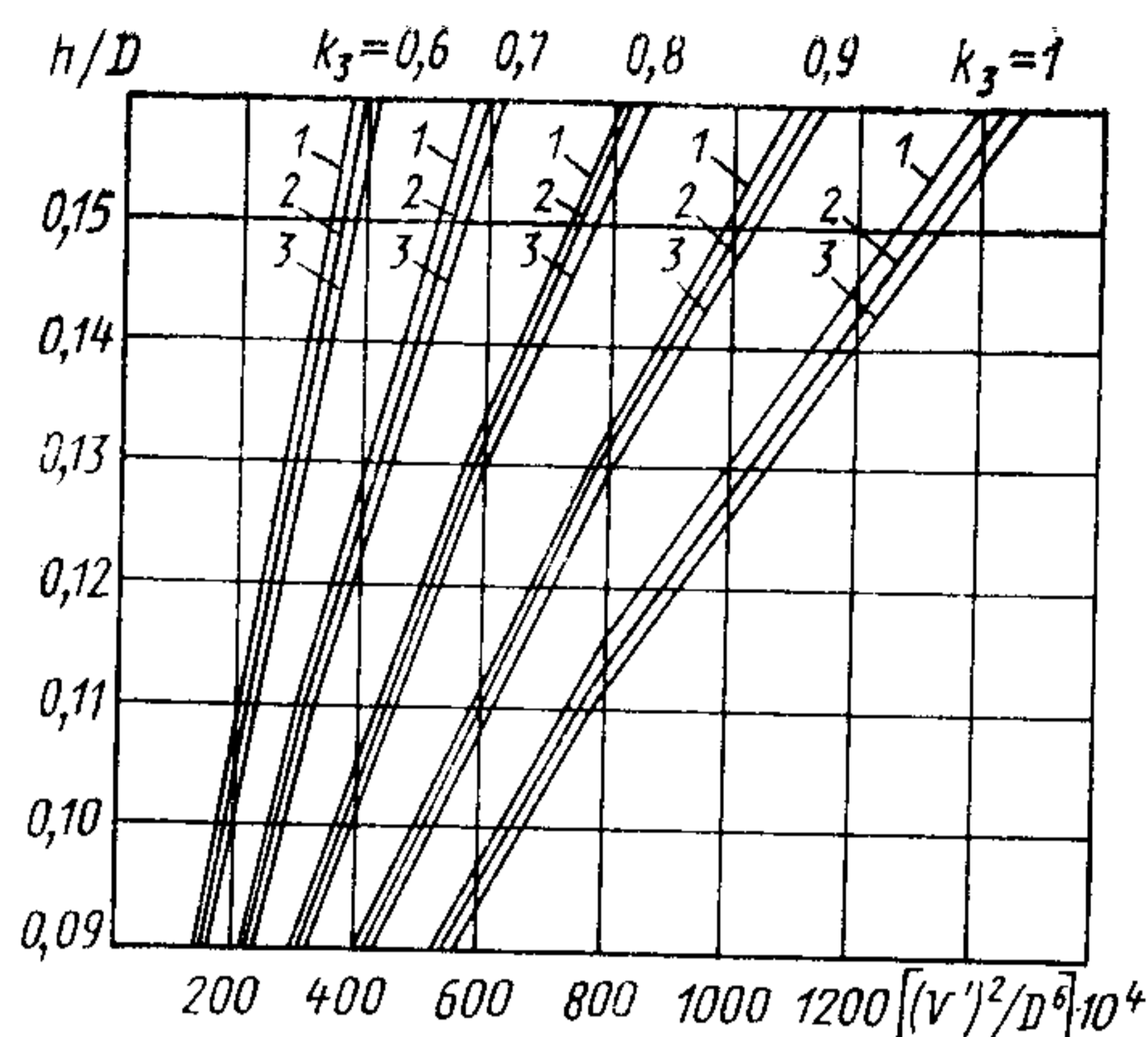


Рис. 3.7. Зависимость между диаметром шнека  $D$ , глубиной канала  $h$  и объемом одного витка  $v'$ :  
 $1 - k_4 = 0,14$ ;  $2 - k_4 = 0,13$ ;  $3 - k_4 = 0,12$

за цикл  $v_H$ ; диаметр шнека  $D$  (расчет см. выше); длина шнека  $L$  (выбирают по табл. 3.7); степень сжатия  $i$  (выбирают по табл. 3.7); количество полимера (по объему) по всей длине шнека  $L$ , характеризующееся коэффициентом  $k_6$  — отношением общего количества полимера в шнеке к расчетному объему отливки; количество полимера по (объему) в каждой зоне шнека, характеризующееся коэффициентами  $k_7, k_8, k_9$  — отношениями объемов полимера в зонах загрузки, пластикации и дозирования к расчетному объему отливки; коэффициенты заполнения полимером межвиткового пространства шнека в каждой зоне  $\gamma_3, \gamma_H, \gamma_D$ .

Значения коэффициентов  $k_6, k_7, k_8, k_9$  и  $\gamma_3, \gamma_H, \gamma_D$  для шнеков различной геометрии в соответствии с тремя группами полимеров (см. табл. 3.7) приведены в табл. 3.10.

По этим данным определяют основные геометрические параметры шнека: длину отдельных зон и глубину каналов шнека в зонах загрузки и дозирования. Длина шнека, выбранная по табл. 3.7, является общей  $L_{общ}$ . Эффективная длина шнека  $L_{эф}$  меньше его общей длины на величину хода шнека  $H_{ш}$ :

$$L_{эф} = L_{общ} - H_{ш} = L_{общ} - k_1 D. \quad (3.13)$$

Значения коэффициентов в табл. 3.10 даны для эффективной длины шнека.

Таблица 3.10

Коэффициенты для расчета профиля шнека

Коэффициент	Группа полимеров (см. табл. 3.7)		
	Первая	Вторая	Третья
$k_6$	3—5	2—3	1,5—2,5
$k_7$	1,2—2	1—1,5	
$k_8$	0,8—1,5	0,3—0,5	0,5
$k_9$	1—1,5	0,5—1	
$\gamma_3$	0,6	0,5	0,5
$\gamma_H$	0,8	0,8	
$\gamma_D$	1	1	0,7—0,8
Среднее $\gamma$		0,7—0,8	

Для проведения дальнейших расчетов удобнее пользоваться числом витков в шнеке, тогда формула (3.13) примет вид

$$L_{эф} = (z_{общ} - z_{ход}) a_B = z_{эф} a_B.$$

Общий объем полимера в межвитковом пространстве по всей длине шнека  $v_{шм}$  и объем полимера в зонах загрузки  $v_{зм}$ , пластикации  $v_{пм}$  и дозирования  $v_{дм}$  составляют:

$$v_{шм} = v_p k_6 = v_H k k_6; \quad v_{зм} = v_H k k_7; \quad v_{пм} = v_H k k_8; \quad v_{дм} = v_H k k_9,$$

где  $k_6 = k_7 + k_8 + k_9$ .

Объем полимера в каждой зоне шнека ( $v_{зм}, v_{пм}, v_{дм}$ ) можно выразить через объем одного витка шнека ( $v'_3, v'_H, v'_D$ ), число витков ( $z_3, z_H, z_D$ ) и коэффициент загрузки полимером зоны шнека ( $\gamma_3, \gamma_H, \gamma_D$ ):

$$v_{зм} = v_H k k_7 = v'_3 (z_3 - z_{ход}) \gamma_3; \quad (3.14)$$

$$v_{пм} = v_H k k_8 = v'_H z_H \gamma_H; \quad (3.15)$$

$$v_{дм} = v_H k k_9 = v'_D z_D \gamma_D. \quad (3.16)$$

Объем полимера в зоне загрузки в соотношении (3.14) рассчитывается для случая, когда шнек находится в отведенном на величину хода положении.

Из формул (3.14)—(3.16) следует:

$$z_3 - z_{ход} = v_H k k_7 / (v'_3 \gamma_3); \quad z_3 = [v_H k k_7 / (v'_3 \gamma_3)] + z_{ход}; \quad (3.17)$$

$$z_H = v_H k k_8 / (v'_H \gamma_H); \quad (3.18)$$

$$z_D = v_H k k_9 / (v'_D \gamma_D). \quad (3.19)$$

Общее число витков шнека составляет:  $z_{общ} = z_3 + z_H + z_D = z_{эф} + z_{ход}$ , откуда

$$z_{эф} = z_3 - z_{ход} + z_H + z_D = v_H k k_7 / (v'_3 \gamma_3) + v_H k k_8 / (v'_H \gamma_H) + v_H k k_9 / (v'_D \gamma_D),$$

$$z_{эф} = v_H k [k_7 / (v'_3 \gamma_3) + k_8 / (v'_H \gamma_H) + k_9 / (v'_D \gamma_D)]. \quad (3.20)$$

Объемы одного витка в различных зонах с учетом степени сжатия  $i$  связаны между собой зависимостями:

$$v'_D = v'_3 / i; \quad (3.21)$$

$$v'_H \approx 0,5 (v'_3 + v'_D) \approx 0,5 (1 + i^{-1}) v'_3. \quad (3.22)$$

Выразим число витков для каждой зоны шнека через объем одного витка в зоне загрузки и степень сжатия, тогда формулы (3.17) — (3.19) приобретут вид:

$$z_3 = [v_H k k_7 / (v'_3 \gamma_3)] + z_{ход}; \quad (3.23)$$

$$z_H = v_H k k_8 / [0,5 v'_3 \gamma_H (1 + i^{-1})]; \quad (3.24)$$

$$z_D = v_H k k_9 i / (v'_3 \gamma_D). \quad (3.25)$$

Подставляя значения  $v'_H$  и  $v'_D$  по формулам (3.21) и (3.22) в формулу (3.20), получим:

$$z_{эф} = v_H k \{ k_7 / \gamma_3 + k_8 / [\gamma_H 0,5 (1 + i^{-1})] + k_9 i / \gamma_D \} / v'_3. \quad (3.26)$$



Решая это уравнение относительно  $v'_3$ , определяем объем одного витка шнека в зоне загрузки:

$$v'_3 = v_n k \{k_7/\gamma_3 + k_8/[\gamma_n 0,5(1+i^{-1})] + k_9 i/\gamma_d\} / z_{эф}$$

В правую часть этого выражения входят все известные величины, по которым можно определить  $v'_3$ . По найденному значению  $v'_3$  определяют число витков в каждой зоне по формулам (3.23) — (3.25). При определении витков в зоне загрузки в случае, когда  $a_B = D$ ,  $z_{ход} = k_1$ .

Глубину канала шнека в зоне загрузки  $h_1$  определяют по формуле (3.12) или по рис. 3.7, используя зависимость между  $(v'_3)^2/D^6$  и  $h_1/D$ . Зная объем одного витка шнека в зоне загрузки и степень сжатия  $i$ , находят объем одного витка шнека в зоне дозирования:  $v'_d = v'_3/i$ . По отношению  $(v'_d)^2/D^6$  определяют  $h_2/D$ , а затем  $h_2$  — глубину канала в зоне дозирования.

По объему межвиткового пространства шнека  $v_{ш}$  определяют продолжительность пребывания полимера в цилиндре при температуре переработки. Эту продолжительность  $t_{пр}$  с учетом продолжительности цикла литья  $t_{ц}$  можно приближенно оценить числом отливок (по номинальному объему впрыска за цикл), находящихся в цилиндре:

$$t_{пр} = v_{ш} t_{ц} / (v_n k) = v_{ш} \gamma t_{ц} / (v_n k)$$

Максимально возможная продолжительность пребывания полимера  $t_{пр. макс}$  при повышенной температуре не должна превышать периода его термостабильности [9]:  $t_{пр. макс} \leq t_{ст}$ . Пользуясь этим соотношением, можно определить межвитковый объем шнека для различных полимеров:  $v_{ш} = v_n k t_{ст} / (\gamma t_{ц})$ .

**Пример 2.** Определить геометрические параметры шнека для переработки полиамидов на литьевой машине с объемом впрыска за цикл  $63 \text{ см}^3$ . Исходные данные и расчетные коэффициенты:  $v_n = 63 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ;  $D = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  (см. пример 1);  $L_{общ} = 15D$ ;  $k = 1,25$ ;  $k_1 = 1,7$ ;  $k_3 = 1$ ;  $k_4 = 0,13$ ;  $k_6 = 2$ ;  $k_7 = 1$ ;  $k_8 = 0,5$ ;  $k_9 = 0,5$ ;  $\gamma_3 = 0,5$ ;  $\gamma_n = 0,8$ ;  $\gamma_d = 1$ ;  $i = 2,2$ ;  $L_{общ}$ ,  $i$  (табл. 3.7);  $k - k_4$  (см. табл. 3.9);  $k_6 - k_9$ ,  $\gamma_3$ ,  $\gamma_n$ ,  $\gamma_d$  (см. табл. 3.10).

Требуется определить глубину витка по зонам, длину отдельных зон. Пользуясь исходными данными и расчетными коэффициентами примера 1, получаем:  $a_B = D = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;  $H_{ш} = 1,7D$ ;  $z_{ход} = H_{ш}/D = 1,7$ ;  $L_{эф} = L_{общ} - H_{ш} = 15D - 1,7D = 13,3D$ ;  $z_{эф} = L_{эф}/D = 13,3$ .

1.  $v'_3 = v_n k \{k_7/\gamma_3 + k_8/[\gamma_n 0,5(1+i^{-1})] + k_9 i/\gamma_d\} / z_{эф} = 63 \cdot 10^{-6} \cdot 1,25 \{1/0,5 + 0,5/[0,8 \cdot 0,5(1+2,2^{-1})] + 0,5 \cdot 2,2\} / 13,3 = 23,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ . Отношение  $(v'_3)^2/D^6$  составляет:  $(23,4 \cdot 10^{-6})^2 / (4 \cdot 10^{-2})^6 = 1320 \cdot 10^{-4}$ .

2. По рис. 3.7 при  $k_3 = 1$ ,  $k_4 = 0,13$  находим  $k_2 = h_1/D = 0,15$ . Отсюда  $h_1 = 0,15 \cdot 4 \cdot 10^{-2} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

3.  $v'_d = v'_3/i = 23,4 \cdot 10^{-6} / 2,2 = 10,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ . Отношение  $(v'_d)^2/D^6$  составляет  $(10,6 \cdot 10^{-6})^2 / (4 \cdot 10^{-2})^6 = 274 \cdot 10^{-4}$ .

4. По рис. 3.7 при  $k_3 = 1$ ,  $k_4 = 0,13$  находим  $h_2/D = 0,063$ . Отсюда  $h_2 = 0,063 \cdot 4 \cdot 10^{-2} = 2,52 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

5.  $z_3 = [v_n k k_7 / (v'_3 \gamma_3)] + z_{ход} = [63 \cdot 10^{-6} \cdot 1,25 \cdot 1 / (23,4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5)] + 1,7 = 8,4$ ;

$z_n = v_n k k_8 / [0,5 v'_3 \gamma_n (1+i^{-1})] = 63 \cdot 10^{-6} \cdot 1,25 \cdot 0,5 / [0,5 \cdot 23,4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,8 \cdot (1+2,2^{-1})] = 2,9$ ;

$z_d = v_n k k_9 i / (v'_3 \gamma_d) = 63 \cdot 10^{-6} \cdot 1,25 \cdot 0,5 \cdot 2,2 / (23,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1) = 3,7$ ;

$$l_3 = a_B z_3 = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 8,4 = 3,36 \cdot 10^{-1} \text{ м}; \quad l_n = a_B z_n = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 2,9 = 1,16 \cdot 10^{-1} \text{ м};$$

$$l_d = a_B z_d = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 3,7 = 1,48 \cdot 10^{-1} \text{ м}.$$

Предложенный метод расчета можно использовать также для определения общей длины шнека, если задать глубину канала. В этом случае рассчитывают рабочую длину шнека  $L_{общ}$  и длину каждой зоны  $l_3$ ,  $l_n$ ,  $l_d$ . По отношению  $h/D$  определяют  $(v'_3)^2/D^6$  (по рис. 3.7) и значение объема одного витка в зоне загрузки  $v'_3$ . По формуле (3.26) находят значение эффективного числа витков шнека  $z_{эф}$ , эффективную  $L_{эф} = z_{эф} a_B$  и рабочую (общую)  $L_{общ} = (z_{эф} + z_{ход}) a_B$  длину шнека. Затем определяют число витков в каждой зоне по формулам (3.23) — (3.25) и длину каждой зоны.

**Пример 3.** Определить геометрические параметры шнека при заданной глубине в зоне загрузки  $h_1 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Исходные данные и расчетные коэффициенты приведены в примере 2.

Требуется определить общую длину шнека, длину отдельных зон.

1.  $h_1/D = 6 \cdot 10^{-3} / (4 \cdot 10^{-2}) = 0,15$ .

По рис. 3.7 при  $k_3 = 1$ ,  $k_4 = 0,13$  находим  $(v'_3)^2/D^6 = 1320 \cdot 10^{-4}$ .

2.  $v'_3 = [1320 \cdot 10^{-4} (4 \cdot 10^{-2})^6]^{1/2} = (23,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3)$ .

3.  $z_{эф} = v_n k \{k_7/\gamma_3 + k_8/[\gamma_n 0,5(1+i^{-1})] + k_9 i/\gamma_d\} / v'_3 = 63 \cdot 10^{-6} \cdot 1,25 \{1/0,5 + 0,5/[0,8 \cdot 0,5(1+2,2^{-1})] + 0,5 \cdot 2,2/1\} / (23,4 \cdot 10^{-6}) = 13,3$ .

4.  $z_{общ} = z_{эф} + z_{ход} = 13,3 + 1,7 = 15$ .

$L_{общ} = z_{общ} a_B = 15 \cdot 4 \cdot 10^{-2} = 0,6 \text{ м}$ .

Глубину канала в зоне дозирования и длину зон рассчитывают, как показано в примере 2.

**Расчет диаметра шнека из условий обеспечения требуемой его геометрии.** В приведенных расчетах при определении глубины канала шнека или общей его длины принималось условие — в межвитковом пространстве шнека должно находиться определенное число отливок. При таком расчете может быть получена большая длина шнека, чем это возможно из условий технологии его изготовления (если задана глубина канала шнека), или большая глубина канала шнека, чем допустимо из прочностных условий (если задана длина шнека). Корректировка длины шнека по условиям его изготовления или глубины канала шнека по прочностным расчетам достигается только изменением диаметра шнека.

**Пример 4.** Определить диаметр и геометрические параметры шнека для переработки полиамидов на литьевой машине с объемом впрыска за цикл  $500 \text{ см}^3$ . Исходные данные и расчетные коэффициенты:  $v_n = 500 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ;  $q_{пл} = 43 \text{ кг/ч}$ ;  $P_{л} = 120 \text{ МПа} = 120 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ;  $P_{гд} = 10 \text{ МПа} = 10 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ;  $L_{общ} = 18D$ ;  $k = 1,35$ ;  $k_1 = 2,5$ ;  $k_2 = 0,13$ ;  $k_3 = 1$ ;  $k_4 = 0,12$ ;  $k_6 = 2$ ;  $k_7 = 1$ ;  $k_8 = 0,5$ ;  $k_9 = 0,5$ ;  $\gamma_3 = 0,5$ ;  $\gamma_n = 0,8$ ;  $\gamma_d = 1$ ;  $i = 2,2$ ;  $L_{общ}$ ,  $i$  — по табл. 3.7;  $k_6 - k_9$ ,  $\gamma_3$ ,  $\gamma_n$ ,  $\gamma_d$  — по табл. 3.10.

Требуется определить диаметр, глубину канала и длину шнека.

1.  $D_1 = [v_n k / (0,785 k_1)]^{1/3} = [500 \cdot 10^{-6} \cdot 1,35 / (0,785 \cdot 2,5)]^{1/3} = 7 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;  $D_2 = (q_{пл} / 0,7)^{1/2,5} 10^{-2} = (43 / 0,7)^{1/2,5} 10^{-2} = 5,19 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;  $D_n = (P_{л} D_1^2 / P_{гд})^{1/2} = [120 \cdot 10^6 (7 \cdot 10^{-2})^2 / 10 \cdot 10^6]^{1/2} = 2,42 \cdot 10^{-1} \text{ м}$ ;  $D_3 = (P_{гд} D_{п1}^2 / P_{л})^{1/2} = [10 \cdot 10^6 \times (2,4 \cdot 10^{-1})^2 / (120 \cdot 10^6)]^{1/2} = 6,93 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ , где  $D_{п1} = 2,4 \cdot 10^{-1} \text{ м}$  определяют по стандартному ряду диаметров.

По полученным диаметрам  $D_1, D_2, D_3$  определяем номинальный диаметр шнека  $D_H = 7 \cdot 10^{-2}$  м.

2. По  $D_H$  определяем глубину канала шнека  $v'_3 = v_H k \{k_7/\gamma_3 + k_8/[\gamma_H 0,5 (1 + i^{-1})] + k_9 i/\gamma_D\} / z_{\text{эф}} = 500 \cdot 10^{-6} \cdot 1,35 \{1/0,5 + 0,5/[0,8 \cdot 0,5 (1 + 2,2)^{-1}] + 0,5 \times 2,2\} / 15,5 = 172 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>, где  $z_{\text{эф}} = L_{\text{эф}}/D = (L_{\text{общ}} - H_{\text{ш}})/D = [L_{\text{общ}} - v_H/(0,785D^2)]/D = L_{\text{общ}}/D - v_H/(0,785D^3) = 18 - 500 \cdot 10^{-6} \cdot 1,35/[0,785 (7 \cdot 10^{-2})^3] = 18 - 2,5 = 15,5$ .

Отношение  $(v'_3)^2/D^6 = (172 \cdot 10^{-6})^2/(7 \cdot 10^{-2})^6 = 2090 \cdot 10^{-4}$ . По рис. 3.7 при  $k_3 = 1$  и  $k_4 = 0,12$  находим  $h_1/D = 0,205$ . Отсюда  $h_1 = 0,205 \cdot 7 \cdot 10^{-2} = 1,43 \cdot 10^{-2}$  м. Из этого расчета получилась большая глубина канала шнека. Диаметр вала шнека  $D_B = 7 \cdot 10^{-2} - 2,86 \cdot 10^{-2} = 4,14 \cdot 10^{-2}$  м.

3. Если задать глубину канала шнека (отношением  $k_2 = h_1/D$ ), то можно определить длину шнека. По рис. 3.7 при выбранном значении  $k_2 = 0,13$  находим  $(v'_3)^2/D^6 = 1060 \cdot 10^{-4}$ . Отсюда  $(v'_3) = [1060 \cdot 10^{-4} (7 \cdot 10^{-2})^6]^{0,5} = 112,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>.

$z_{\text{эф}} = v_H k \{k_7/\gamma_3 + k_8/[\gamma_H 0,5 (1 + i^{-1})] + k_9 i/\gamma_D\} / v'_3 = 500 \cdot 10^{-6} \cdot 1,35 \{1/0,5 + 0,5/[0,8 \cdot 0,5 (1 + 2,2)^{-1}] + 0,5 \cdot 2,2/1\} / 112,5 \cdot 10^{-6} = 23,7$ ;  $z_{\text{общ}} = z_{\text{эф}} + z_{\text{ход}} = 23,7 + 2,5 = 26,2$ ;  $L_{\text{общ}} = 26,2D$ .

Такая длина шнека может вызвать технологические трудности при изготовлении.

Из расчета следует, что при диаметре шнека  $7 \cdot 10^{-2}$  м получается глубокая канавка в зоне загрузки или большая длина шнека, поэтому необходимо скорректировать диаметр шнека, вводя в его расчет дополнительные требования. При расчете диаметра шнека с учетом обеспечения требуемого профиля шнека к условиям создания заданного объема впрыска за цикл, пластикационной способности, давления литья добавляется четвертое условие — в межвитковом пространстве шнека соответствующего профиля должно находиться заданное количество полимера.

**Пример 5.** Определить диаметр шнека с учетом его профиля для переработки полиамида на литьевой машине с объемом впрыска за цикл  $500 \text{ см}^3$ . Исходные данные и расчетные коэффициенты приведены в примере 4. Пользуясь результатами расчета примера 4, получим  $D_1 = 7 \cdot 10^{-2}$  м,  $D_2 = 5,19 \cdot 10^{-2}$  м,  $D_3 = 6,93 \cdot 10^{-2}$  м.

1. Определяем диаметр шнека из условия обеспечения его заданного профиля. По рис. 3.7 при  $k_2 = 0,13$ ;  $k_3 = 1$ ;  $k_4 = 0,12$  находим отношение  $(v'_3)^2/D^6 = 1060 \cdot 10^{-4}$ .

По найденному в примере 4 значению  $v'_3 = 172 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup> определяем  $D_4 = 8,1 \times 10^{-2}$  м. Принимаем окончательный диаметр шнека  $D = 8 \cdot 10^{-2}$  м. Тогда  $h_1 = 1,04 \cdot 10^{-2}$  м, принимаем  $h_1 = 1 \cdot 10^{-2}$  м.

2. Определяем геометрию шнека при принятом диаметре  $8 \cdot 10^{-2}$  м. Объем одного витка в зоне загрузки при  $D = 8 \cdot 10^{-2}$  м и  $h_1 = 1 \cdot 10^{-2}$  м составляет  $161 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>.

Объем одного витка шнека в зоне дозирования составляет:  $v'_d = v'_3/i = 161 \times 10^{-6}/2,2 = 73,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>;  $(v'_d)^2/D^6 = (73,1 \cdot 10^{-6})^2/(8 \cdot 10^{-2})^6 = 204 \cdot 10^{-4}$ .

По рис. 3.7 при  $k_3 = 1$  и  $k_4 = 0,12$  находим  $h_2/D = 0,051$ . Отсюда  $h_2 = 0,051 \times 8 \cdot 10^{-2} = 4,08 \cdot 10^{-3}$  м; принимаем  $h_2 = 4 \cdot 10^{-3}$  м. Определяем число витков и длину каждой зоны:

$$z_3 = [v_H k k_7 / (v'_3 \gamma_3)] + z_{\text{ход}} = [500 \cdot 10^{-6} \cdot 1,35 \cdot 1 / (172 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5)] + 2,5 = 10,3;$$

$$z_{\text{II}} = v_H k k_8 / [0,5 v'_3 \gamma_{\text{II}} (1 + i^{-1})] =$$

$$= 500 \cdot 10^{-6} \cdot 1,35 \cdot 0,5 / [0,5 \cdot 172 \cdot 10^{-6} \cdot 0,8 (1 + 2,2^{-1})] = 3,4;$$

$$z_{\text{д}} = v_H k k_9 i / (v'_3 \gamma_{\text{д}}) = 500 \cdot 10^{-6} \cdot 1,35 \cdot 0,5 \cdot 2,2 / (172 \cdot 10^{-6} \cdot 1) = 4,3;$$

$$l_3 = a_B z_3 = 8 \cdot 10^{-2} \cdot 10,3 = 8,24 \cdot 10^{-1} \text{ м};$$

$$l_{\text{II}} = a_B z_{\text{II}} = 8 \cdot 10^{-2} \cdot 3,4 = 2,72 \cdot 10^{-1} \text{ м};$$

$$l_{\text{д}} = a_B z_{\text{д}} = 8 \cdot 10^{-2} \cdot 4,3 = 3,44 \cdot 10^{-1} \text{ м}.$$

$$3. H_{\text{ш}} = 4 v_H k / (\pi D^2) = 500 \cdot 10^{-6} \cdot 1,35 / [0,785 (8 \cdot 10^{-2})^2] = 1,34 \cdot 10^{-1} \text{ м}.$$

$$4. D_{\text{II}} = (P_{\text{II}} D^2 / P_{\text{гд}})^{1/2} = [120 \cdot 10^6 (8 \cdot 10^{-2})^2 / 10 \cdot 10^6]^{1/2} = 2,76 \cdot 10^{-1} \text{ м}.$$

$$5. P_{\text{ф}} = P_{\text{гд}} D_{\text{II}}^2 / D^2 = 10 \cdot 10^6 (2,8 \cdot 10^{-1})^2 / (8 \cdot 10^{-2})^2 = 122 \cdot 10^6 \text{ Па} = 122 \text{ МПа},$$

где  $D_{\text{II}} = 2,8 \cdot 10^{-1}$  м — определяют по стандартному ряду диаметров.

### Расчет модификации диаметров шнеков для ряда литьевых машин.

Литье полимеров, отличающихся по технологическим свойствам, требует применения различных давлений. Для полимеров с низкой вязкостью используют давление литья 60—80 МПа, со средней вязкостью — 100—120 МПа и с высокой вязкостью — 140—160 МПа и более. Разные давления литья можно обеспечить применением шнеков, отличающихся по диаметру. При литье машину комплектуют шнеком определенного диаметра в зависимости от размеров отливаемого изделия и свойств перерабатываемого полимера.

Модификация шнеков по диаметрам для ряда литьевых машин может быть достигнута расчетом, в котором в качестве исходных данных кроме объема впрыска за цикл, пластикационной способности, давления литья, геометрического профиля еще задают дополнительное условие — обеспечение размерного соотношения по шнекам для литьевых машин разного типоразмера внутри одного ряда. В качестве такого соотношения для расчета модификаций шнеков с целью получения их минимального числа для ряда литьевых машин может быть принято:

$$D_{\text{min}_{n+1}} = D_{\text{H}_n} = D_{\text{max}_{n-1}},$$

где  $D_{\text{H}_n}$  — номинальный диаметр шнека  $n$ -й машины в ряду;  $D_{\text{min}_{n+1}}$  — минимальный диаметр шнека  $(n+1)$ -й машины в ряду;  $D_{\text{max}_{n-1}}$  — максимальный диаметр шнека  $(n-1)$ -й машины в ряду.

Такой выбор минимального и максимального диаметров шнека для каждой модели позволяет использовать их для замены одного шнека другим внутри ряда.

В табл. 3.11 приведены исходные данные, расчетные коэффициенты и результаты расчета диаметра шнека для литьевых машин разного типоразмера; расчет произведен для профиля шнека, применяемого для переработки полимеров II группы (см. табл. 3.7). Модификация шнеков для ряда литьевых машин на основе этого расчета дана в табл. 3.8.

В результате такого расчета каждая машина (условные модели I—VIII) имеет три модификации шнека, которые используются на трех моделях машин. Например, для модели I имеется три шнека с минимальным диаметром 20 мм, номинальным 25 мм и максимальным 30 мм. Каждая модель машины имеет гидроцилиндр впрыска Ц-1—Ц-8. Для всех моделей машин требуются девять различных типов шнеков. Каждый из девяти типов шнеков имеет определенную длину. Чтобы на машине одного типоразмера (гидроцилиндр впрыска имеет определенный ход) можно было устанавливать шнеки и цилиндры различной длины, необходимо предусматривать возможность закрепления на штоках гидроцилиндров размерных вставок

Исходные данные, расчетные коэффициенты  
для определения диаметров шнека

Исходные данные, * расчетные коэффициенты, параметры	Значения							
$v_n \cdot 10^6, \text{ м}^3$	16	32	63	125	250	500	1000	2000
$q_{пл}, \text{ кг/ч}$	5	7	14	25	33	43	60	—
$P_{л}, \text{ МПа}$	100	100	100	100	120	120	120	—
$P_{гд}, \text{ МПа}$	5	5	5	10	10	10	10	10
$k$	См. табл. 3.10							
$z_{общ}$	13	15	15	16	18	18	18	18
$k_1$	См. табл. 3.9							
$z_{эф}$	11,5	13,3	13,3	14	15	15,5	15,5	15,5
$k_4$	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Диаметр шнека $D \cdot 10^3, \text{ м}$ в соответствии с усло- виями обеспечения								
$v_n$	25	31	38,5	47	58	70	88	—
$q_{пл}$	19	21,8	29	35,5	40,5	45	51,5	—
$P_{л}$	24,6	30	37,6	50	57,5	69,3	87,6	—
профиля шнека	—	31,5	40	48,4	59,4	76,5	97,8	121,8
Принятый диаметр шне- ка $D_n \cdot 10^3, \text{ м}$	25	30	40	50	60	80	100	120
Уточненный ход шнека $H_{ш} \cdot 10^3, \text{ м}$	39	61	63	83	115	153	172	238
Уточненный $k_1 = H_{ш}/D$	1,56	2,03	1,58	1,66	1,92	1,91	1,72	1,98

$$k_2 = 0,13; k_3 = 1; k_6 = 0,2; k_7 = 1; k_8 = 0,5; k_9 = 0,5;$$

$$\gamma_3 = 0,65; \gamma_{п} = 0,8; \gamma_{д} = 1; i = 2,2.$$

\* Исходные данные в примере выбраны условно для иллюстрации процедуры расчета.

либо изменения расстояния между гидроцилиндром и инжекционным цилиндром.

Инжекционный узел оснащается тремя шнеками с диаметрами  $D_n, D_{max}$  и  $D_{min}$ . Эти шнеки обеспечивают создание номинального  $P_{л,н}$ , минимального  $P_{л, min}$  и максимального  $P_{л, max}$  давлений литья в инжекционных узлах с постоянными параметрами гидроцилиндра впрыска и давления в гидросистеме. Каждый из этих шнеков позволяет получать различные объемы отливок. Давления  $P_{л, max}$  и  $P_{л, min}$  рассчитывают по формулам

$$P_{л, н} \pi D_n^2 / 4 = P_{л, max} \pi D_{min}^2 / 4 = P_{л, min} \pi D_{max}^2 / 4;$$

$$P_{л, max} = P_{л, н} D_n^2 / D_{min}^2; \quad P_{л, min} = P_{л, н} D_n^2 / D_{max}^2.$$

Объем отливки для наибольшего и наименьшего значений диаметров шнека

$$v_{max} = \pi D_{max}^2 H_{ш, н} / 4; \quad v_{min} = \pi D_{min}^2 H_{ш, min} / 4,$$

где  $H_{ш, min}$  — минимальный ход шнека данного  $n$ -го типоразмера машины равен номинальному  $H_{ш, н, n-1}$  ходу шнека предыдущего ( $n-1$ )-го типоразмера машины.

Значения ходов  $H_{ш, min}$  и  $H_{ш, н}$  для каждого типоразмера машины определяются заданным отношением хода шнека к его диаметру.

## 3.5. НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИНЖЕКЦИОННЫХ УЗЛОВ

**Получение многослойных (наполненных) изделий.** Для получения изделий, у которых наружная часть образована одним материалом, а внутренняя другим (наполненные изделия), применяют специальные конструкции с двумя инжекционными узлами, объединенными насадкой, которая не допускает смешения отдельных материалов и обеспечивает подачу строго определенной порции каждого из них в полость формы. На рис. 3.8, а показана схема одной из таких конструкций. Инжекционные цилиндры 3 и 4 соединены с общей головкой 1 проходными отверстиями а, б, в. Внутри головки есть поворотный сердечник 2. Центральное отверстие сердечника совпадает с выходным отверстием б головки. Боковые отверстия сердечника попеременно соединяются с соответствующими инжекционными цилиндрами. В положении сердечника, показанном на рис. 3.8, а, инжекционный цилиндр 4 соединяется с проходным отверстием б головки и материал из цилиндра поступает в форму.

Узел работает следующим образом: полимеры (отличающиеся цветом или маркой) готовятся в инжекционных цилиндрах одновременно. При этом шнеки, как обычно, отходят в крайнее положение. После впрыска в форму одного полимера сердечник 2 поворачивается на заданный угол и полимер из другого цилиндра по соответствующему каналу в сердечнике впрыскивается в форму. Поворачиваться сердечник может посредством гидроцилиндра 5, как показано на рис. 3.8, а, или другого механизма. Особенность этой конструкции заключается в том, что полимеры (различные по цвету) не смешиваются в головке машины и в сопле. Смешение полимеров может происходить только в канале б проходной головки. Однако эта порция в каждом цикле удаляется вместе с литником изделия.

Наружный слой 1 поперечного сечения трехслойного изделия (рис. 3.8, в), отлитого по такой технологии, образован полимером, который впрыскивается в форму первым. Центральная часть 2 изделия образована другим полимером. Толщину наружного слоя регулируют дозой первого полимера. Прочностные показатели такого изделия определяются аддитивным вкладом прочностных показателей каждого слоя. Применяя третий цилиндр, можно получить трехслойные изделия (рис. 3.8, б и в). Первоначально в форму впрыскивается первый материал, который в конце ее заполнения образует поверхностный слой 1. По окончании впрыска первого материала в форму подается второй материал 2. Он отодвигает слои первого материала, размещая их по стенкам формы. По окончании впрыска второго материала в форму подается третий материал 3. Он перемещает слои второго материала в более удаленные участки формы.

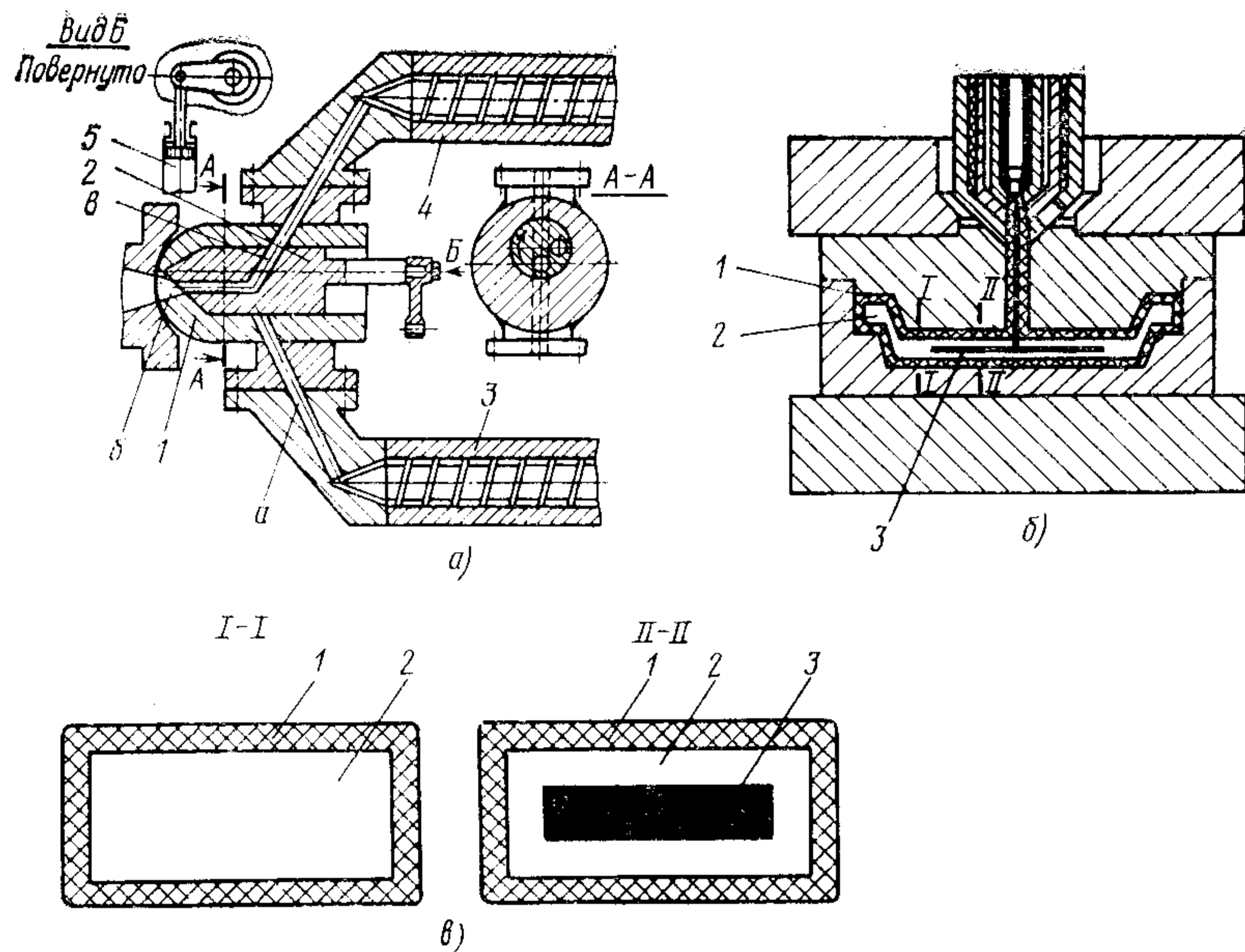


Рис. 3.8. Схема получения изделий:

а — двухслойных (наполненных); б — трехслойных; в — поперечное сечение изделий

Комбинируя различные материалы (в том числе наполнение и отходы), можно создавать экономичные конструкции различного назначения.

**Вакуумный отсос летучих веществ.** Специальная конструкция шнека и инжекционного цилиндра с отсосом летучих веществ позволяет их удалять непосредственно из расплава в цилиндре (рис. 3.9, а). Полимер поступает через горловину 4, захватывается шнеком 2, нагревается до вязкотекучего состояния и транспортируется по цилиндру 1 в показанном стрелкой направлении. Шнек имеет зоны загрузки А, уплотнения Б и дозирования В. После прохождения этих зон расплав поступает в зону декомпрессии Г, где расширяется, и далее поступает в зону вакуум-отсоса Д. Цилиндр в этой зоне имеет отверстие 3, соединенное с вакуум-отсосом. В зоне вакуум-отсоса из полимера удаляются пары воды и летучие вещества. После прохождения этой зоны полимер уплотняется в зоне Е и дозируется в зоне Ж для подачи в переднюю часть цилиндра.

Конструкция шнека с декомпрессией может быть иной (рис. 3.9, б). Зоны загрузки А и уплотнения Б удлинены. На конце зоны Б есть участок Б', на котором глубина канала шнека предельно уменьшается. Далее следуют зоны вакуум-отсоса Д, сжатия Е и дозирования Ж. На рис. 3.9, б под схемой шнека показано изменение давления по его длине. Шнеки с декомпрессией имеют длину от  $18D$  до  $28D$ . Зона Д делается такой длины, чтобы она не выходила за пределы дегазационной зоны цилиндра 1. Шнек с декомпрессией

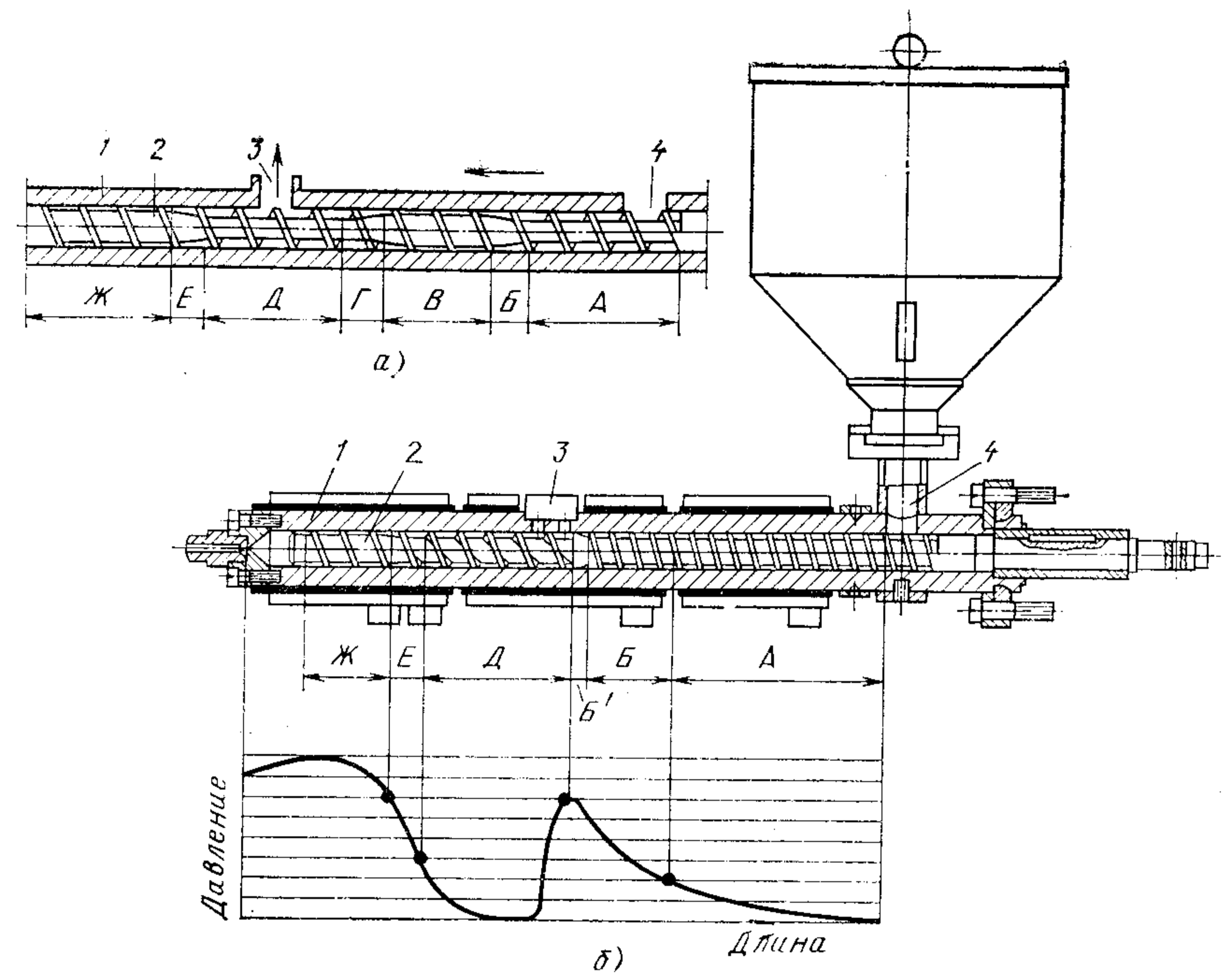


Рис. 3.9. Конструкции шнеков с вакуумным отсосом летучих веществ

имеет пластикационную способность на 50 % меньше, чем обычный шнек. Шнеки рассмотренных конструкций позволяют удалять из полимера остатки мономера и перерабатывать гигроскопичные полимеры без предварительной сушки. Режимы литья полимеров с вакуумным отсосом летучих веществ приведены в табл. 3.12.

**Окрашивание полимеров.** Совершенствование инжекционных узлов современных литьевых машин предусматривает повышение их технологических характеристик: увеличение давления литья до 200 МПа, увеличение скорости впрыска и обеспечение возможности ее регулирования по пути шнека. Современные литьевые машины обеспечивают высококачественное смешение компонентов. Это позволяет использовать концентраты красителей для окрашивания полимеров непосредственно в литьевой машине (рис. 3.10). Торпеда 2 наряду с температурной гомогенизацией расплава обеспечивает равномерное распределение красителей в порции расплава, под-

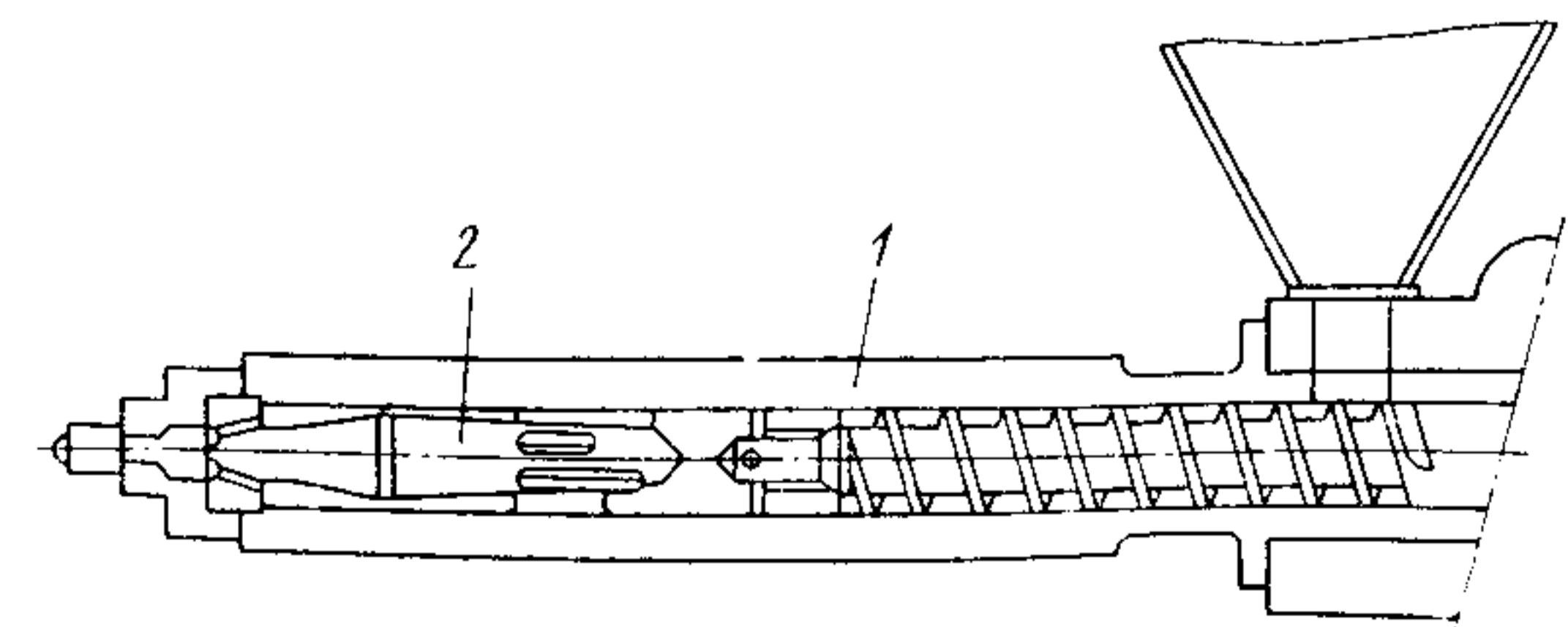


Рис. 3.10. Схема инжекционного узла для окрашивания полимеров

Режимы литья полимеров с вакуумным отсосом летучих веществ

Полимер <sup>1</sup> , нормативно-техническая документация	Температура, °С						сопла	формы	Давление литья, МПа
	инжекционного цилиндра по зонам					расплава			
	1	2	3	4	5				
Поликарбонат: ПК-2, ПК-3, ТУ 6-05-1668—80	270—300	265—285	250—260	240—250	250—270	260—270	260—275	70—120	90—170
ПК-6, ТУ 6-05-1668—80	290—320	285—305	270—280	260—270	270—290	280—290	280—295	70—120	70—170
Полиметилметакрилат, ТУ 6-05-952—74, ОСТ 6-01-67—72	220—230	195—215	195—205	195—215	205—215	205—215	210—220	40—80	100—160
Акрилонитрилбутадиенстирольный пластик, ТУ 6-05-1587—78, ГОСТ 13077—77	240—250	220—240	220—240	220—230	220—240	230—240	230—240	70—90	90—170
Полиамиды <sup>2</sup>	240—250	230—240	220—230	220—230	230—240	230—240	220—230	— <sup>3</sup>	80—140
Полибутилентерефталат	255—265	240—250	230—240	230—240	240—250	240—260	250—260	60—110	80—140
Полифениленоксид	295—305	270—290	280—290	270—280	280—290	280—290	270—280	140—160	100—150

<sup>1</sup> Литые марки.<sup>2</sup> Полиамид-12, ОСТ 6-05-425—76; полиамид-610, ГОСТ 10589—73\*;<sup>3</sup> Для ПА 12  $T_{\Phi} = 30 \pm 100$  °С, для ПА-6 и ПА-610  $T_{\Phi} = 50 \pm 90$  °С.

полиамид-6, ОСТ 6-06-С9—76, ТУ 6-06-32-278—78.

готовленной к впрыску в инжекционном цилиндре 1. Применение различно окрашенных смесей создает в отливке окраску под «мрамор».

### 3.6. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕССОВЫХ УЗЛОВ

Прессовый узел машины предназначен для перемещения литевой формы и создания усилия запирания при формовании в ней полимера. Прессовые узлы подразделяют на универсальные и специальные. Универсальные конструкции обеспечивают установку различных литевых форм (отличающихся габаритами) для изделий разного назначения. На специальных конструкциях можно получить изделия определенного вида или назначения (например, фитинги, обувь и др.). Формы с вертикальной плоскостью разреза устанавливаются на прессовый узел горизонтальной конструкции. Литые изделия со сложной арматурой производят в формах с горизонтальной плоскостью разреза, которые устанавливают на прессовый узел вертикальной конструкции. Для установки различных форм (отличающихся по высоте) в универсальных конструкциях прессовых узлов предусматривают регулировку расстояния между плитами. На крупных машинах с целью сокращения машинного времени предусматривают возможность изменения хода подвижной плиты.

Существуют различные конструкции прессовых узлов литевых машин [3, 4]. Они непосредственно влияют на технологический процесс литья (в некоторых специальных режимах формования, в которых используется усилие прессового узла), а также на стабильность размеров изделий и их качество. Конструкции прессовых узлов в большой степени отражают конструктивно-технологические традиции и механические возможности машиностроительной индустрии. Однако при всем многообразии конструктивных решений, применяемых при разработке прессовых узлов литевых машин, можно представить их в следующей классификации. Механизмы запирания подразделяются на простые — I группа и заблокированные — II группа (табл. 3.13).

В простых конструкциях смыкание формы и создание усилия запирания производится одним механизмом. В заблокированных конструкциях плита перемещается под действием одного механизма, а усилие запирания создается другим механизмом. Сблокированные конструкции механизмов запирания подразделяются на гидравлические (А), в которых усилие запирания создается гидравлическим механизмом, и рычажные (Б), в которых усилие запирания создается рычажным механизмом от гидроцилиндра. Механизмы перемещения плит (форм) можно подразделить на гидравлические или пневматические (1), рычажные (2) и электромеханические (3). Рычажные, в свою очередь, подразделяются на гидро- или пневмомеханические (2а) и электромеханические (2б).

В простых гидравлических конструкциях (1—1) один гидравлический механизм выполняет две функции — перемещает плиту и создает усилие запирания. В простых гидромеханических (1—2а)

Классификация механизмов записания и перемещения формы

Механизм перемещения формы	Механизм записания формы	
	Простые (I)	Сблокированные (II)
Гидравлические (или пневматические) (1)		
Рычажные (2)		
Электромеханические (3)		

или электромеханических (I—2б) конструкциях эти функции выполняет также один механизм — гидромеханический или электромеханический. Электромеханический привод механизма запираения (I—3) осуществляется от электродвигателя через механическую передачу.

В заблокированных гидравлических конструкциях (II—А) усилие запираения формы создается гидравлическим механизмом, а механизмы перемещения плит могут быть различными — плиты могут перемещаться под действием гидроцилиндра (II—А—1), под действием гидроцилиндра через рычажную систему (II—А—2а), от электродвигателя через рычажную (II—А—2б) или электромеханическую (II—А—3) системы. В заблокированной рычажной конструкции (II—Б—1) плиты перемещаются под действием гидроцилиндров, а запираение формы обеспечивает рычажный механизм от гидроцилиндра.

Простые гидравлические конструкции имеют некоторые ограничения в применении, так как большие размеры гидроцилиндра требуют больших расходов масла для сокращения продолжительности перемещения подвижной плиты, а также большая масса механизма при необходимости создания больших усилий запираения. Для уменьшения размеров гидроцилиндра необходимы высокие удельные давления масла и, следовательно, применение насоса высокого давления.

Гидромеханические конструкции прессовых узлов обладают некоторыми преимуществами по сравнению с гидравлическими, так как кинематика механизма обеспечивает уменьшение скорости движения плит при смыкании полуформ. Кроме этого, гидромеханические конструкции дают возможность получать большие усилия смыкания при сравнительно небольших усилиях, создаваемых на поршне гидроцилиндра смыкания, благодаря чему отпадает необходимость в использовании высокого давления в гидросистеме смыкания. При распрямлении рычагов давление в гидросистеме смыкания может сниматься. Гидромеханические конструкции по сравнению с гидравлическими более экономичны (в отношении потребления энергии) и имеют более простые гидросистемы. Все это обуславливает широкое применение гидромеханических конструкций в литейных машинах.

Основное направление совершенствования прессовых узлов — уменьшение габаритов и металлоемкости при увеличении хода плиты, расстояния между плитами и величины его регулирования (для установки форм с широким диапазоном размера по высоте), что может быть достигнуто в результате применения новых конструкций гидроблоков с механическими приводами или применения значительно больших рабочих давлений гидрожидкости.

### 3.7. РАСЧЕТ УЗЛОВ ЗАПИРАНИЯ

Расчет узлов запираения рычажной конструкции. Усилие запираения в узлах рычажной конструкции зависит от создаваемого усилия на ведущем звене механизма, кинематики механизма и конст-

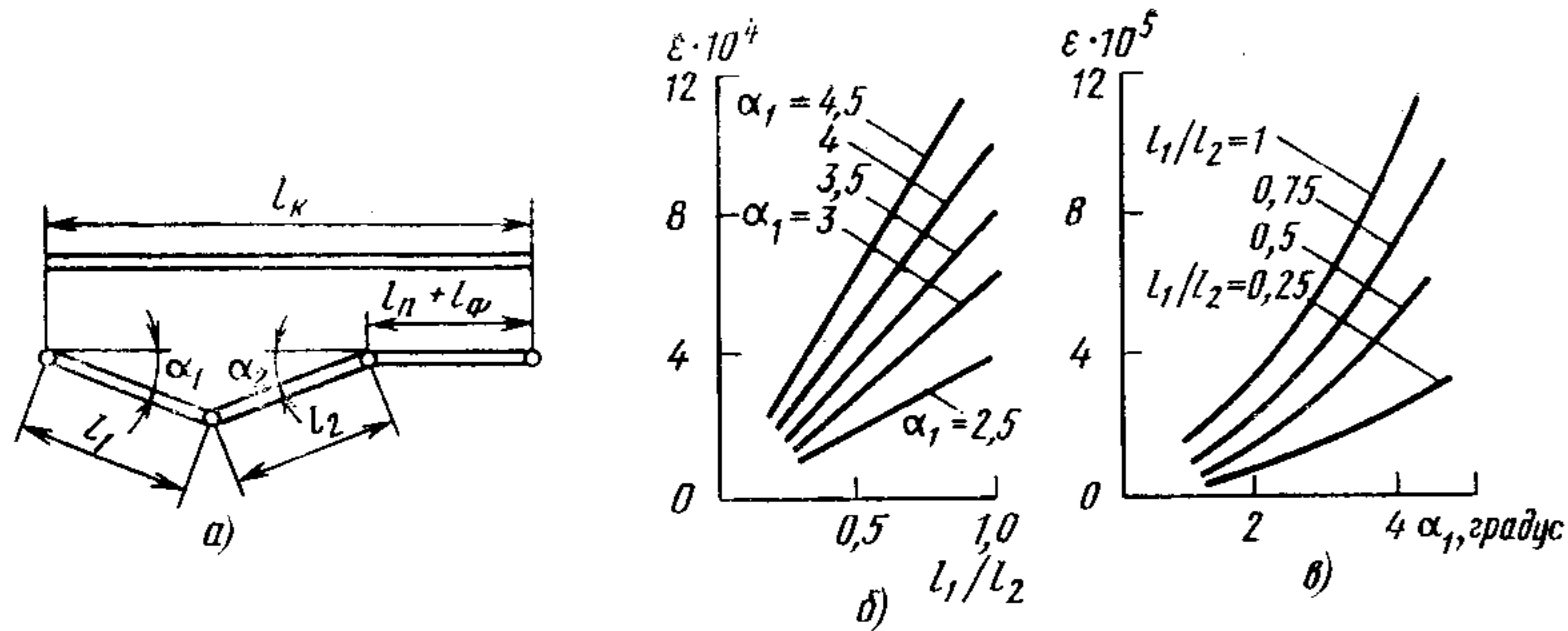


Рис. 3.11. Зависимости относительной деформации  $\varepsilon$  звеньев рычажного механизма (а):

б — от отношения  $l_1/l_2$  длин звеньев рычагов при различных углах  $\alpha_1$ ; в — от угла  $\alpha_1$  при различных отношениях  $l_1/l_2$

рукции узла его регулирования. Рычажные конструкции рассчитывают в положении, когда литевая форма закрыта. В этом положении колонны и звенья рычагов испытывают деформации: колонны (станина) растягиваются, а рычаги сжимаются.

Начальную длину колонн при соприкосновении полуформ можно выразить через размеры механизма (рис. 3.11, а)

$$l_K = l_1 \cos \alpha_1 + l_2 \cos \alpha_2 + l_{\text{п}} + l_{\text{ф}},$$

где  $l_1, l_2, l_{\text{п}}$  и  $l_{\text{ф}}$  — длины первого и второго звеньев рычагов, плиты и формы;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — углы между звеньями рычагов и горизонтальной осью в момент соприкосновения половин формы.

Упругое удлинение колонн

$$\Delta l_K = Fl_K / (E_K S_K), \quad (3.27)$$

здесь  $F$  — усилие запираения формы;  $E_K$  — модуль упругости материала колонн;  $S_K$  — суммарная площадь сечения колонн.

Упругое сокращение звеньев рычажного механизма

$$\Delta l_{\text{зв}} = Fl_1 / (E_1 S_1) + Fl_2 / (E_2 S_2) + Fl_{\text{п}} / (E_{\text{п}} S_{\text{п}}) + Fl_{\text{ф}} / (E_{\text{ф}} S_{\text{ф}}),$$

где  $E_1, E_2, E_{\text{п}}$  и  $E_{\text{ф}}$  — модули упругости первого и второго звеньев рычагов, плиты и формы;  $S_1, S_2, S_{\text{п}}$  и  $S_{\text{ф}}$  — площади сечения первого и второго звеньев рычагов, плиты и формы.

Уравнение совместных деформаций запишем:

$$l_K + \Delta l_K = l_{\text{зв}} - \Delta l_{\text{зв}},$$

где  $l_{\text{зв}}$  — общая длина всех звеньев;  $\Delta l_{\text{зв}}$  — деформация звена.

После некоторых допущений и преобразований можно получить:

$$F = ES_K \varepsilon. \quad (3.28)$$

Относительная деформация всего рычажного механизма  $\varepsilon$  повышается с увеличением углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и соотношения  $l_1/l_2$  (см. рис. 3.11, б). При определенных размерах звеньев и колонн развиваемое усилие тем больше, чем больше углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в момент соприкосновения полуформ. Если угол  $\alpha_1 > \alpha'$  ( $\alpha'$  — угол, на ко-

торый рассчитан механизм), то колонны будут деформированы больше и будет развиваться большее усилие запираения (предполагается, что усилие привода ведущего звена достаточно для этого). Если  $\alpha_1 < \alpha'$ , то усилие запираения будет меньше, чем указано в паспорте машины.

Все механизмы смыкания формы допускают регулирование расстояния между плитами (для установки форм разной высоты). При регулировании в зависимости от конструкции механизма длина рабочей части колонн может изменяться или оставаться неизменной. В тех случаях, когда расстояние между плитами регулируют винтовой передачей или изменением длины рычагов, рабочая длина колонн не изменяется. Если расстояние между плитами регулируют смещением механизма с помощью гаек, то рабочая длина колонн изменяется. Если рабочая длина колонн не изменяется, то при переналадке механизма на новую (по высоте) форму следует стремиться, чтобы углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в момент соприкосновения полуформ были равны заданным. Если же в результате переналадки увеличивается длина колонн, то углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  необходимо также увеличить, с тем чтобы достичь номинального расчетного усилия запираения форм. Именно поэтому наладка механических и гидромеханических конструкций более трудоемка, чем гидравлических. Сложность переналадки этих конструкций определяется главным образом тем, что непосредственно усилие запираения в них не регистрируется и визуально не отмечается. Регулировка механизма значительно упрощается, если на нем устанавливать приборы, контролирующие развиваемое усилие запираения (см. п. 4.2).

Механизм запираения с учетом суммарного сопротивления перемещению подвижных механизмов  $\sum F_M$  должен развивать усилие

$$\bar{F} = F + \sum F_M.$$

Усилие запираения возрастает при перемещении плиты, достигая максимального значения в момент запираения. Весь путь перемещения плиты можно разбить на два участка: от начала движения до момента соприкосновения половин формы (действует только сила  $\sum F_M$ ) и от последнего до момента выхода рычагов враспор (усилие возрастает до  $F + \sum F_M$ ). Допускают, что соприкосновение половин формы происходит, когда угол между звеном механизма и горизонтальной осью (направлением движения плиты) составляет  $\alpha_1$  и усилие до момента выхода рычагов враспор возрастает прямолинейно.

Параметры гидроцилиндра определяют следующим образом. Задаваясь ходом подвижной плиты, производят построение положения всех звеньев механизма по циклу. В результате определяют размеры звеньев и необходимый ход ведущего звена — поршня гидроцилиндра. Рассчитывают усилие запираения формы (см. п. 2.2). Задаются углом между звеном механизма и горизонтальной осью. Для периода деформации колонн строят план сил, позволяющий определить усилие, которое необходимо приложить к ведущему звену для создания заданного усилия запираения на плите  $F$  (допу-

скают, что усилие изменяется прямолинейно в этот период). Максимальное усилие на ведущем звене следует использовать для расчета параметров гидроцилиндра привода механизма смыкания в гидромеханических конструкциях или мощности в механических.

Размер гидроцилиндра определяют с учетом давления в гидроприводе, которым задаются. Выбирая расход жидкости в гидроприводе, определяют скорость движения плиты механизма при смыкании и размыкании и время, необходимое для смыкания и размыкания плит (быстроходность прессовой части). Рассчитывают усилия на всех звеньях в цикле.

При выборе типа гидромеханической конструкции прессового узла необходимо учитывать быстроходность, усилие запираения и усилия, воспринимаемые шарнирами в различных положениях звеньев. При этом нужно привести сравниваемые конструкции механизмов к одинаковым условиям — задаются равными ходами подвижной плиты, усилиями запираения, углами  $\alpha_1$ , давлениями в гидроприводе. В реальных условиях работы механизмов при подходе поршня к стенке гидроцилиндра движение поршня замедляют с помощью специальных дросселирующих устройств, поэтому фактическое значение быстроходности механизмов ниже, чем полученные в результате расчетов. Однако поскольку это замедление производится на всех механизмах и может быть принято одинаковым, то при их сравнении его можно не учитывать.

При значениях углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , принятых при расчете механизма, обеспечивается номинальное усилие запираения. Отклонение от этих углов приводит к изменению усилия. Значение  $\epsilon$  уменьшается при уменьшении углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (см. рис. 3.11, б, в). Следовательно, для достижения того же усилия запираения необходимо увеличить площадь сечения колонн.

Износ звеньев механических и гидромеханических конструкций влияет на качество отливаемых изделий (разнотолщинность). Максимальному износу подвергаются шарниры, втулки и др. С целью уменьшения их износа стремятся разгрузить рабочие звенья. Для этого на рычагах устанавливают специальные сухари, поверхность которых тщательно притирают. Для уменьшения удельных нагрузок на соединительные шарниры, возникающие при создании больших усилий запираения, рычаги выполняют из трех или четырех параллельных звеньев, в которых нагрузки распределяются равномерно.

**Расчет узлов запираения гидравлической конструкции.** Усилие запираения в узлах гидравлической конструкции составляет

$$F = S_{\text{п}} P_{\text{р}} - F_{\text{тр}},$$

где  $S_{\text{п}}$  — площадь сечения поршня гидроцилиндра;  $P_{\text{р}}$  — давление рабочей жидкости;  $F_{\text{тр}}$  — сила трения.

Деформацию колонн при создании усилия запираения определяют по формуле (3.28), записанной в виде

$$F = E_{\text{к}} S_{\text{к}} \epsilon_{\text{к}}, \quad (3.29)$$

где  $\epsilon_{\text{к}}$  — относительная деформация колонн;  $\epsilon_{\text{к}} = \Delta l_{\text{к}} / l_{\text{к}}$ .

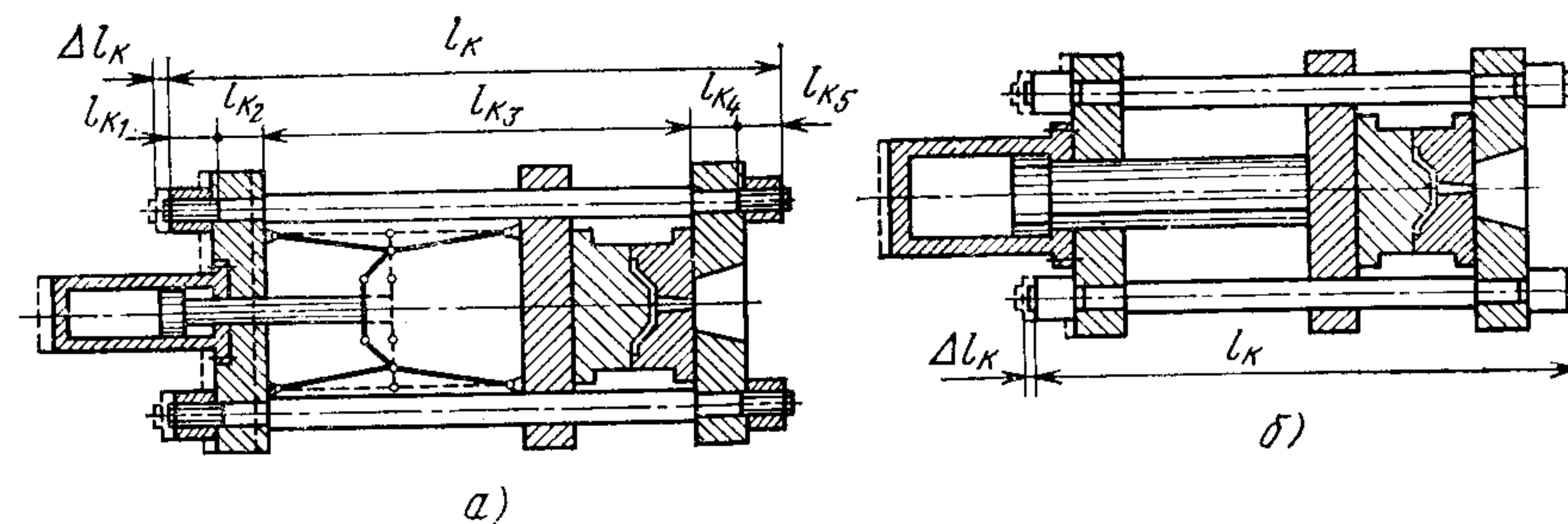


Рис. 3.12. Рычажный (а) и гидравлический (б) механизмы запираения

Относительную деформацию колонны можно выразить через относительные деформации отдельных ее участков (рис. 3.12):

$$\epsilon_{\text{к}} = \sum_{i=1}^n \epsilon_{\text{к}i} = \sum_{i=1}^n \Delta l_{\text{к}i} / l_{\text{к}i}, \quad (3.30)$$

здесь  $l_{\text{к}i}$  и  $\Delta l_{\text{к}i}$  — длина и удлинение отдельных участков (количеством  $n$ ) колонны.

Из соотношений (3.29) и (3.30) при заданном удлинении можно определить размеры колонн, которые затем корректируют в соответствии с прочностными расчетами:

$$\sigma_{\text{р}} = F / S_{\text{к}} \leq [\sigma_{\text{р}}],$$

где  $[\sigma_{\text{р}}]$  — допустимое напряжение на растяжение.

Для сравнения работы механизмов запираения гидравлической и гидромеханической конструкций проведем их расчет (см. рис. 3.12). Данные для расчета обеих конструкций одинаковые:  $F = 10^6$  Н;  $E_{\text{к}} = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па;  $l_{\text{к}} = 2,1$  м;  $\Delta l_{\text{к}} = 10^{-3}$  м; допустимое напряжение на растяжение  $[\sigma_{\text{р}}] = 120$  МПа (принимается, что колонна состоит из одного участка).

Площадь колонны  $S_{\text{к}}$  рассчитываем на основании формул (3.28) и (3.30)

$$S_{\text{к}} = F l_{\text{к}} / (E_{\text{к}} \Delta l_{\text{к}}) = 10^6 \cdot 2,1 / (2,1 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-3}) = 10^{-2} \text{ м}^2$$

и проверяем ее на прочность:

$$\sigma_{\text{р}} = F / S_{\text{к}} = 10^6 / 10^{-2} = 10^8 \text{ Па} = 10^2 \text{ МПа} < [\sigma_{\text{р}}].$$

Если предположить, что усилие в форме возрастает на 10 %, то усилие запираения  $F$  увеличится до  $1,1 \cdot 10^6$  Н (допускается, что механизм запираения обеспечивает это усилие), а удлинение колонн составит  $1,1 \cdot 10^{-3}$  м, т. е. деформация формы уменьшится на  $10^{-4}$  м. В гидравлической конструкции в этом случае форма может раскрыться на величину, превышающую  $10^{-4}$  м. При литье на такой машине на поверхности детали образуется утолщение. Поэтому гидравлические конструкции менее жесткие, чем рычажные.

Для получения деталей с допуском по толщине большое значение имеет жесткость формы, т. е. деформация ее соприкасающихся поверхностей в момент создания усилия запираения.



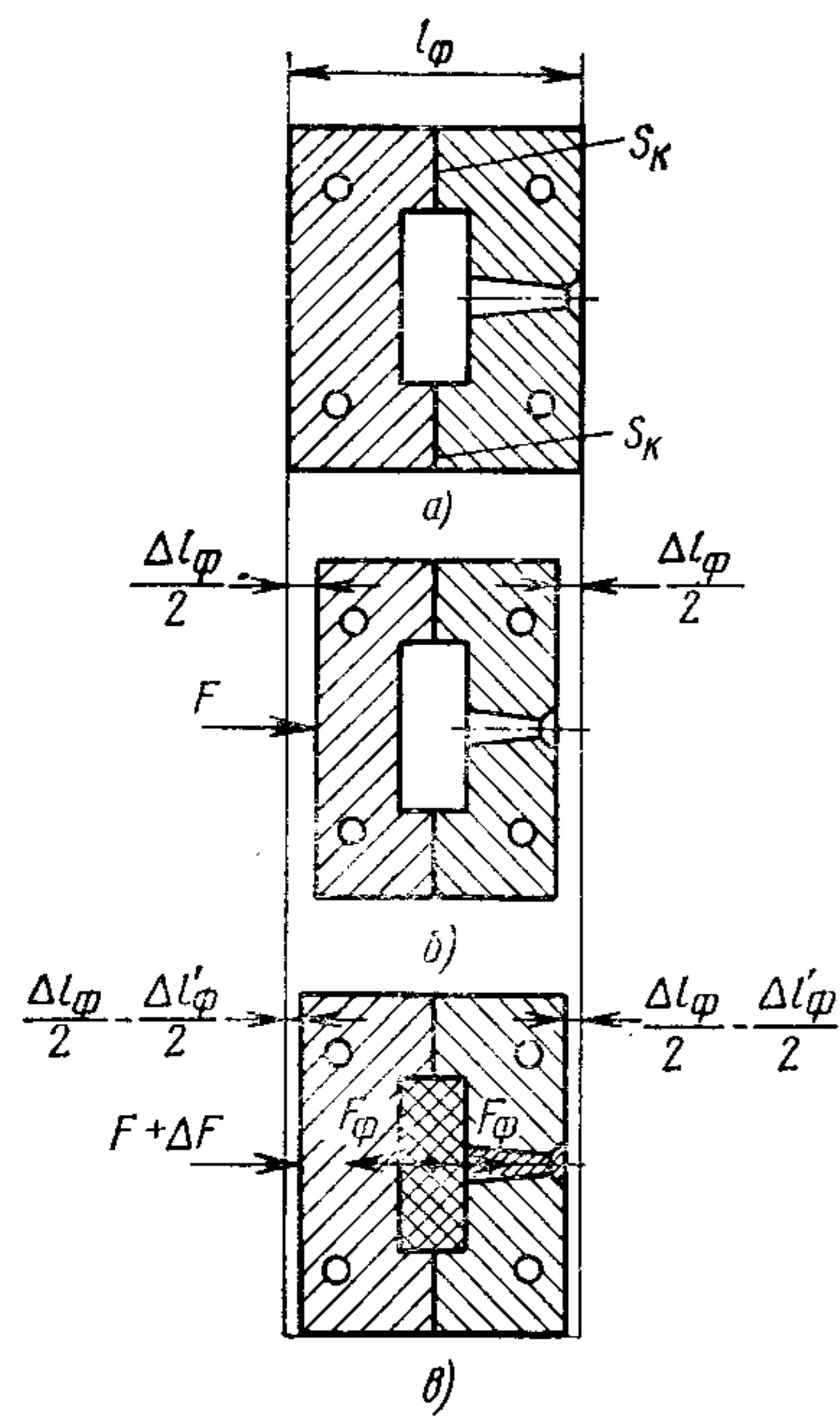


Рис. 3.13. Деформация литейной формы во время цикла литья

**Расчет жесткости.** Жесткость прессового узла литейной машины и формы оказывает существенное влияние на размерную точность отливляемых изделий и стабильность их свойств. Для получения высокоточных изделий со стабильными свойствами нужно нормировать параметр жесткости прессового узла машины и литейной формы.

Литейная форма (рис. 3.13, а) с контактными поверхностями  $S_k$  не является абсолютно жесткой и во время цикла литья деформируется (рис. 3.13, б, в). Под действием усилия  $F$ , развиваемого механизмом запирания, литейная форма уменьшает свои размеры на  $\Delta l_\phi$  (см. рис. 3.13, б). В период заполнения формы и нарастания давления в форме развивается усилие  $F_\phi$ , которое увеличивает ее размеры на  $\Delta l'_\phi$  (см. рис. 3.13, в). Изменение размеров формы, устанавливаемой на машине, зависит как от жесткости

самой формы и технологии литья (развиваемого в форме усилия), так и от жесткости механизма запирания, которая, в свою очередь, зависит от его конструкции.

При запирании механизма возникает усилие  $F$ , под действием которого в узлах механизма и отдельных его частях развивается деформация в пределах упругой деформации.

$$F = (ES/l) \Delta l = C \Delta l,$$

где  $E$ ,  $S$ ,  $l$  — модуль упругости, площадь и длина деформируемых элементов;  $\Delta l$  — деформация;  $C$  — жесткость, равная  $F/\Delta l$ .

Жесткость элемента равна усилию, вызывающему его деформацию, равную единице длины. Поскольку при запирании формы все сопряженные звенья механизма запирания, форма и колонны испытывают одинаковое усилие, можно записать:

$$F = C_{м.з} \Delta l_{м.з} = C_\phi \Delta l'_\phi = C_k \Delta l_k,$$

где  $\Delta l_{м.з}$  — деформация механизма запирания;  $C_{м.з}$ ,  $C_\phi$  и  $C_k$  — жесткость механизма запирания, формы и колонн.

Деформацию, которая создается в механизме запирания, можно записать:  $\Delta l_{м.з} = \sum \Delta l_i$ , а жесткость:  $1/C_{м.з} = \sum (1/C_i)$ , где  $\Delta l_i$  и  $C_i$  — деформация и жесткость отдельных элементов механизма (за исключением формы).

Тогда усилие, создаваемое в механизме запирания, можно выразить:

$$F = \sum \Delta l_i / \sum (1/C_i) = \Delta l_{м.з} C_{м.з}.$$

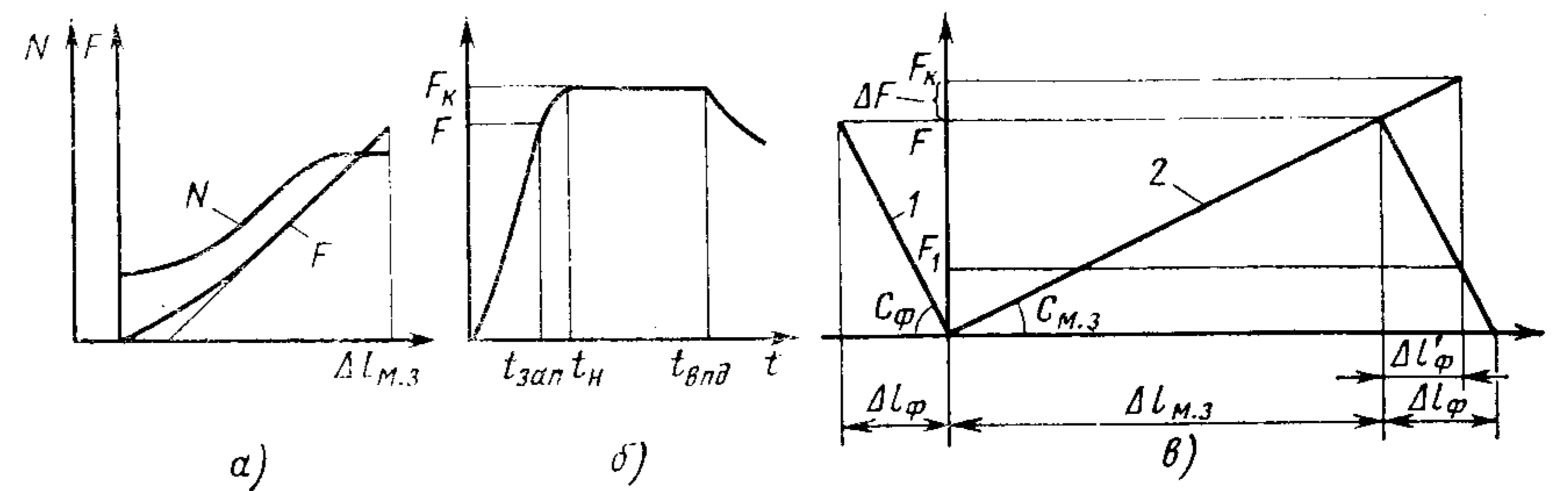


Рис. 3.14. Изменение усилия и деформации во время цикла литья

При запирании формы усилие в механизме запирания возрастает практически пропорционально развивающейся в ней деформации (рис. 3.14, а). При этом затрачиваемая гидроприводом мощность достигает максимального значения несколько раньше, чем форма окончательно запирается. Это объясняется особенностью работы гидросистемы, так как сливной клапан начинает перепускать жидкость на слив до полного запираания формы.

При запирании формы в течение  $t_{зап}$  усилие в механизме запирания возрастает до величины  $F$  (рис. 3.14, б). После впрыска расплава в форму и развития в ней давления в течение  $t_n$  усилие в механизме запирания возрастает до величины  $F_k$ . Далее давление в форме в течение  $t_{выд}$  выдерживается постоянным и усилие в механизме запирания остается постоянным. При дальнейшем охлаждении давление в форме уменьшается, что приводит к постепенному снижению усилия в механизме запирания.

Диаграмма изменения деформации и усилий в механизме запирания и в форме показана на рис. 3.14, в. Под действием усилия запирания форма деформируется на величину  $\Delta l_\phi$ . Тангенс угла наклона линии 1 — зависимости усилия запирания от деформации формы — равен жесткости формы  $C_\phi$ . Усилие возрастает до величины  $F$ . В то же время в механизме запирания деформация составляет величину  $\Delta l_{м.з}$ . Тангенс угла наклона линии 2 — зависимости усилия запирания от деформации механизма запирания — равен жесткости механизма запирания  $C_{м.з}$ . Для простоты последующих рассуждений линию 1 можно нарисовать с правой стороны диаграммы. Под действием усилия  $F_\phi$  (см. рис. 3.13, в) развивающегося в форме, она деформируется на величину  $\Delta l'_\phi$ . В результате этого усилие в механизме запирания увеличивается на величину  $\Delta F = F_k - F$ . Общее усилие запирания составляет  $F_k$ . Усилие на контактных поверхностях формы  $S_k$  (см. рис. 3.13, а) уменьшается до величины  $F_1$ .

Окончательное усилие запирания в форме  $F_k$  с учетом обратной деформации формы  $\Delta l'_\phi$  составляет:

$$\begin{aligned} F_k &= (\Delta l_{м.з} + \Delta l'_\phi) C_{м.з} = \Delta l_{м.з} C_{м.з} + \Delta l'_\phi C_{м.з} = \\ &= F + (\Delta l'_\phi / \Delta l_{м.з}) F = F (1 + \Delta l'_\phi / \Delta l_{м.з}). \end{aligned}$$

Если определить надежность механизма запираия как отношение  $(\Delta F/F) 100 \% = (\Delta l_{\phi}/\Delta l_{м.з}) 100 \%$ , то из этого следует, что, чем больше  $\Delta l_{\phi}$  или чем меньше исходное значение  $\Delta l_{м.з}$  при заданном  $F$ , тем больше надежность механизма. Отсюда вытекает, что при выборе машины для применения важное значение имеет общая деформативность механизма запираия под действием усилия, возникающего в форме. Опыты показывают, что рычажные конструкции более жесткие и более надежные. В конструкциях с гидравлическим приводом столб масла — наименее жесткий элемент. Поэтому в таких конструкциях масляная пробка должна по возможности уменьшаться.

Основываясь на изложенном, можно разработать метод расчета жесткости механизма запираия. Для расчета задаются величиной  $\Delta l_{м.з} = KL$ , тогда  $C_{м.з} = F/\Delta l_{м.з}$ . Ориентировочно  $C_{м.з} = (1 \div 1,5) 10^9$  Н/м. Значение  $\Delta l_{\phi}$  можно принять равным  $(0,8 \div 0,9) \Delta l_{\phi}$ . Тогда, задаваясь надежностью 10—15 %, получим  $\Delta l_{\phi}/\Delta l_{м.з} = 0,15$  или  $(0,8 \div 0,9) \Delta l_{\phi}/\Delta l_{м.з} = 0,15$ . Поскольку  $\Delta l_{\phi}/\Delta l_{м.з} = C_{м.з}/C_{\phi}$ , то  $C_{\phi}/C_{м.з} \approx 5 \div 10$ , откуда  $C_{\phi} \approx (5 \div 10) C_{м.з}$ . Коэффициент критерия подобия изменения жесткости механизма запираия по ряду литевых машин приведен в приложении 2.

### 3.8. УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАЛАДКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРЕССОВЫХ УЗЛОВ

Конструкции прессовых узлов основаны на ранее отработанных вариантах и постоянно совершенствуется путем установки различных устройств для облегчения их наладки, правильной и надежной эксплуатации.

**Регулирование расстояния между плитами.** Установка на литевой машине форм различных конструкций требует изменения (регулирования) расстояния между плитами. В зависимости от типа прессового узла машины расстояние между плитами регулируют по-разному. В рычажных механизмах запираия положение плиты регулируют путем изменения размера одной из тяг рычажной системы. Для этого тягу выполняют из двух стержней с правой и левой резьбами, соединенными между собой вращающейся стяжкой. На больших машинах регулирование длины рычагов механизировано и тем самым обеспечивается более высокая точность распределения нагрузок на соединительные шарниры.

Расстояние между плитами изменяют смещением всей рычажной системы узла запираия (рис. 3.15, а). От двигателя 2 движение передается на центральный зубчатый механизм 3 (размещен на задней плите 4 машины), который одновременно приводит в движение все гайки (шестерни) колонн 1, перемещая тем самым плиту. В гидромеханических узлах расстояние между плитами регулируют с помощью винтовой передачи, расположенной между подвижной плитой машины и промежуточной. Регулирование производится вручную через червячную передачу или от электродвигателя.

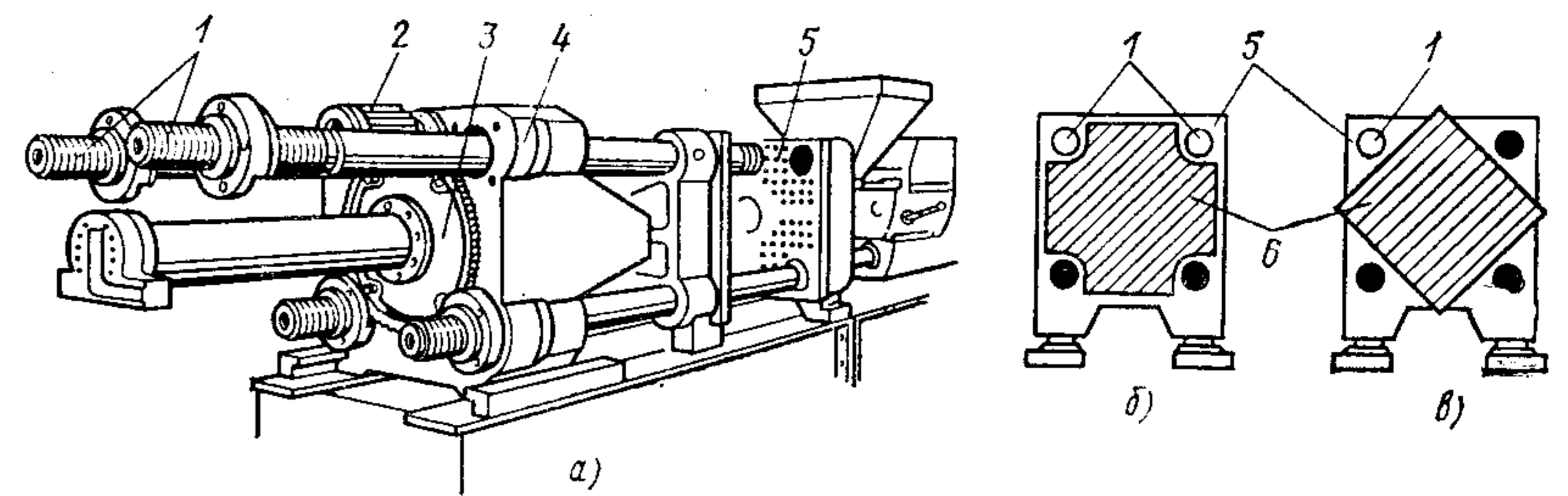


Рис. 3.15. Механизм запираия с устройством для регулирования расстояния между плитами и выдвижения колонн (а); варианты расположения форм на плите (б, в)

В гидравлических простых или заблокированных конструкциях узла запираия расстояние между плитами регулируют путем изменения хода подвижной плиты с помощью промежуточной винтовой пары или передвижения задней плиты узла.

Чтобы получить деталь большей высоты, чем позволяет максимальное расстояние между плитами, используют литевые формы с подвижным (выносным) пуансоном. В этом случае на подвижной плите машины устанавливают салазки, по которым вдоль плиты перемещается пуансон формы. По окончании цикла пуансон выдвигают за пределы плиты и снимают деталь. Движение пуансону может сообщаться гидроцилиндром.

Получение сложных изделий с арматурой (вставки, вкладыши, знаки и т. п.) и резьбовых требует независимого регулирования скорости смыкания и размыкания форм.

**Механизация настройки усилия запираия.** Она осуществляется с помощью механизма (см. рис. 3.15, а) централизованного регулирования расстояния между плитами (рабочей длины колонн). Этот механизм позволяет использовать систему числового программного управления (ЧПУ) для автоматической поднастройки усилия запираия (регулированием рабочей длины колонн) в зависимости от знака и значения рассогласования заданного и действительного усилий запираия, фиксирующегося специальным контролирующим прибором, принцип действия которого основан на измерении деформации колонн (см. п. 4.2).

**Выдвижение колонн.** Выдвижение верхних (двух или одной) колонн 1 значительно облегчает и ускоряет установку литевых форм на плитах (см. рис. 3.15, а). Когда колонны выдвинуты, можно устанавливать формы значительно больших размеров и эффективнее использовать поверхность плит (возможное расположение форм 6 между колоннами на плитах 5 показано на рис. 3.15, б и в). Подобная механизация значительно сокращает продолжительность установки сложных форм со вставными знаками и перемещающимися механизмами, так как в этом случае для установки форм не требуются их разработка и последующая сборка.

**Регулирование скорости перемещения.** Скорость перемещения узлов механизма запираия постоянно увеличивается — превышает

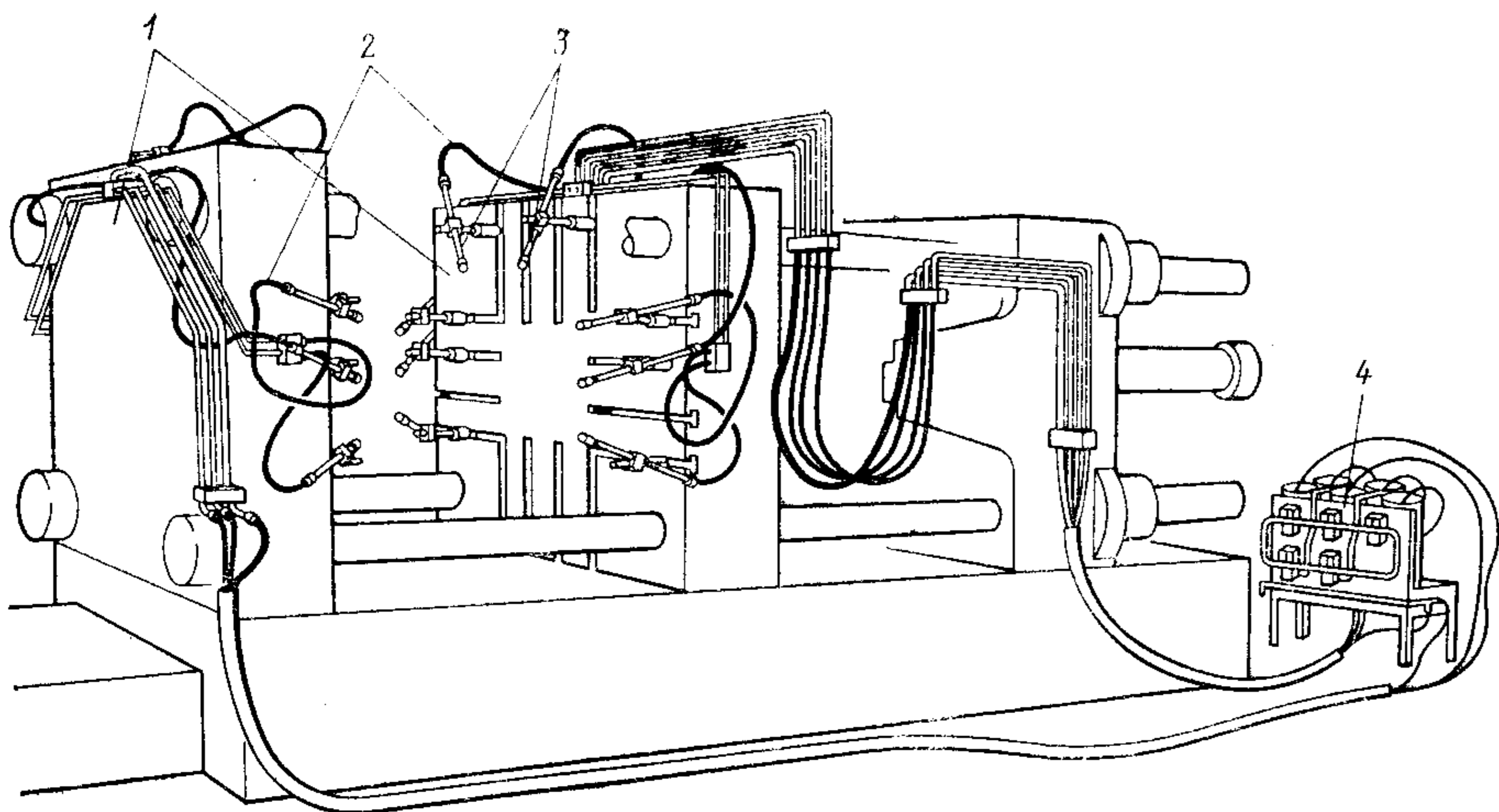


Рис. 3.16. Система для смазывания полуформ

1 м/с. Для обеспечения надежной и долгосрочной работы машины на таких скоростях применяют системы ЧПУ, которые регулируют и следят за скоростью перемещения узлов механизма и ее снижением перед смыканием полуформ. Эти системы наряду с повышением скорости обеспечивают безаварийную работу механизма записывания и сохраняют от преждевременного изнашивания дорогостоящие формы. Кроме того, они обеспечивают меньшее нагревание гидрожидкости и экономят воду для охлаждения.

**Применение робототехники на литейном оборудовании.** Робототехника на литейном оборудовании выполняет разные операции — съем изделий, транспортирование и укладку изделий, проверку извлечения изделий и литников из формы, смазывание формы, установку формы на плитах и др. Робототехника может предназначаться для выполнения одной операции (например, съем изделий или смазывание формы) или для последовательного выполнения нескольких операций (например, съем изделий, проверка извлечения изделий и литников из формы, транспортирование и укладка изделий). Одна робототехническая система может обслуживать одну литейную машину или группу литейных машин. Робототехника может быть выполнена с системой логического управления, на которой предварительно задают требуемые операции и которая обеспечивает их выполнение в определенной последовательности на каждой машине в отдельности.

Пример системы (робототехники) для выполнения одной операции — автоматически действующая система для смазывания литейной формы. Эта система включает (рис. 3.16) емкости 4 для смазочных материалов на водной или масляной основе, шланги 2 для подвода смазочных материалов и сопла 3 для их распыления. Шланги 2 закрепляют на плитах 1 в тех же пазах, в которых закрепляется

форма. Сопла 3 направляются на формирующую поверхность формы так, чтобы обеспечить смазывание всей ее площади. Система имеет индивидуальное управление. Смазочный материал подается с помощью воздуха при давлении до 0,5 МПа. На пульте управления набирают программу подачи смазочного материала — продолжительность подачи каждым соплом и интервалы между этими подачами.

Для удаления изделий из формы используют механические выталкиватели с пневматическими или гидравлическими съемными приспособлениями, т. е. роботы, стационарно установленные на машине. Конструкцию выталкивающей системы выбирают в зависимости от типа узла запирающей машины, конфигурации изделия и т. д. Автоматизация процесса съема изделия связана с контролем чистоты формы после его удаления. Применяют специальные автоматические блокировочные устройства форм, которые предотвращают начало нового цикла (подается звуковая или световая сигнализация) при неполном удалении изделия или остатков грата из формы. Проблема автоматизации процесса литья не может быть решена полностью без автоматического удаления литника из формы (в тех случаях, когда он не удаляется вместе с изделием). Используют специальные устройства, которые обеспечивают очистку литникового отверстия и его проверку (оптический или механический контроль) от возможного затвердевания частиц материала. Литники иногда удаляют со стороны инъекционного узла. На сопле или переходной втулке выполняют заплечики, за которые зацепляется литник, затем он сталкивается гидротолкателем.

Пример системы (робототехники) для выполнения нескольких операций — автоматические механические манипуляторы. Они извлекают отливку из формы и перемещают ее в требуемое место (на

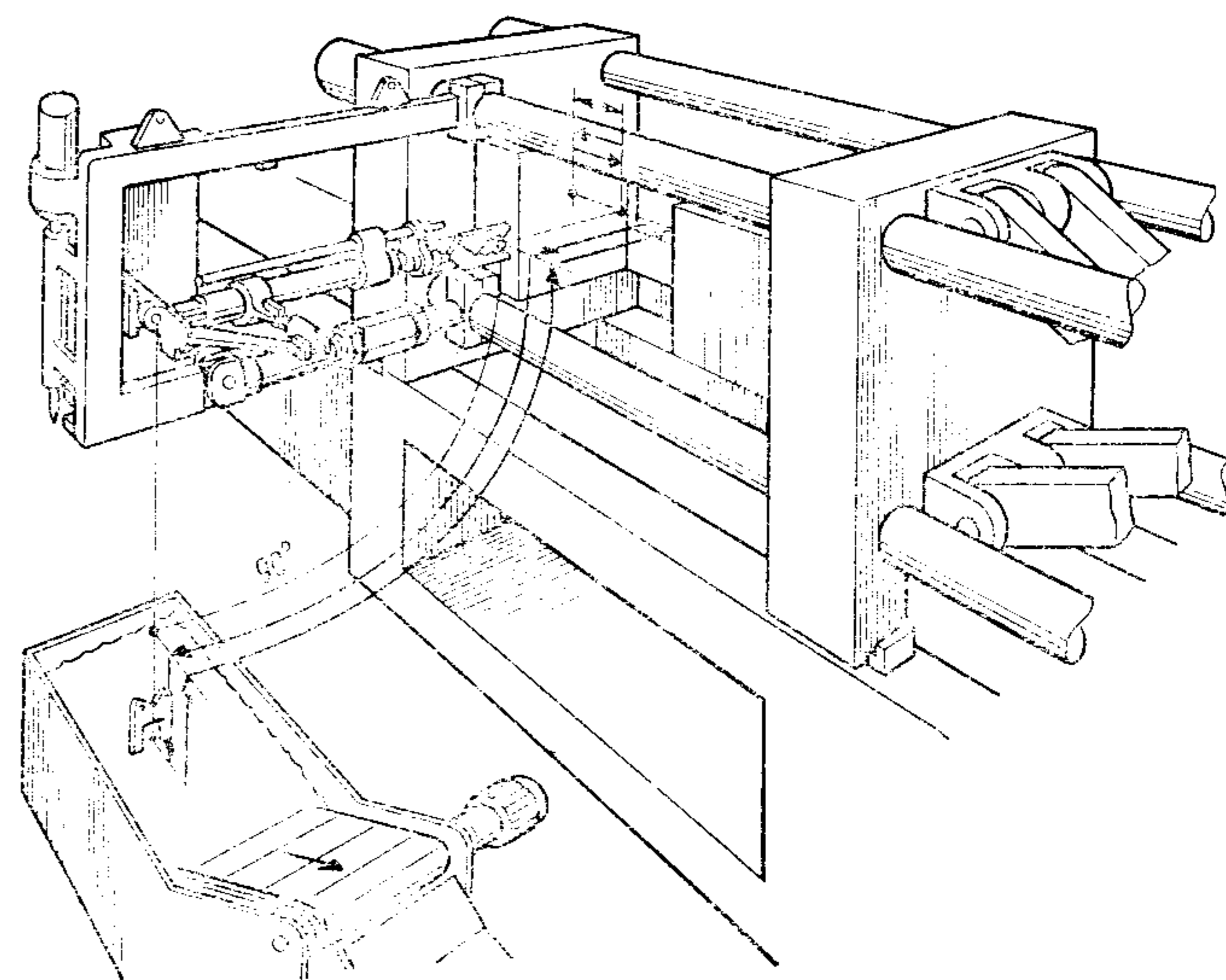


Рис. 3.17. Механический манипулятор

конвейер, на место последующей обработки и др.). Механический манипулятор монтируется сбоку литейной машины со стороны оператора или с противоположной стороны (рис. 3.17). Из начального бокового положения горизонтальным телескопическим удлинением манипулятор входит внутрь двух открытых полуформ, захватом берет отливку за литник и вынимает из полуформы, следуя за движением центрального выталкивателя. Затем манипулятор выходит из колонн и поворачивается на  $90^\circ$ , открывает захваты и кладет отливку в ящик, на конвейер или в другое место. Кроме того, рука после поворота на  $90^\circ$  может удлиняться и после этого открывать захват. Подобные манипуляторы могут применяться и для обслуживания группы машин.

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЛИТЬЕВЫМИ МАШИНАМИ

Основа автоматизации — автоматизированные, обеспечивающие автоматизированное управление технологическими процессами по заданным технологическим и технико-экономическим критериям при участии персонала, и автоматические (без вмешательства персонала) системы управления технологическими процессами. Автоматизированные системы управления повышают уровень организации производства, позволяют обслуживающему персоналу оперативно регулировать технологические процессы на оборудовании и их оптимизировать (изделия получают высокого качества со стабильными показателями).

Литейная машина с автоматическим управлением технологическими параметрами комплектуется устройствами, позволяющими стабилизировать параметры или стадии процесса на заданном уровне или устанавливать оптимальное сочетание параметров по заданному критерию качества изделий. В первом случае система управления включает приборы стабилизации, но не предусматривает обратной связи по качеству изделий. Во втором случае основная задача сводится к созданию алгоритма и системы управления с обратной связью по качеству изделий. Такой подход существенным образом влияет и на формирование требований к объекту управления.

Система автоматического регулирования (САР) обеспечивает поддержание на заданном уровне или изменение по заданной программе регулируемых параметров объекта с помощью различных технических средств. САР состоит из регулируемого объекта и элементов управления, которые воздействуют на объект при отклонении одного или нескольких регулируемых параметров от заданных значений. Элементы управления формируют входные сигналы, воздействующие на объект управления и поддерживающие (изменяющие) регулируемые параметры на заданном уровне (по заданной программе).

Технологический процесс формования полимера протекает под воздействием следующих основных параметров: давления  $P$ , температуры  $T$ , скорости  $V$ , времени  $t$  и возмущающих воздействий  $ВВ$ . При управлении процессом без обратной связи (рис. 4.1, а) все основные параметры задаются вручную на задающем приборе  $Z$  и поддерживаются на заданном уровне. При этом возмущающие воздействия вызывают отклонение параметров процесса литья, что приводит к изменению качества изделий  $K$ . При управлении с обратной связью



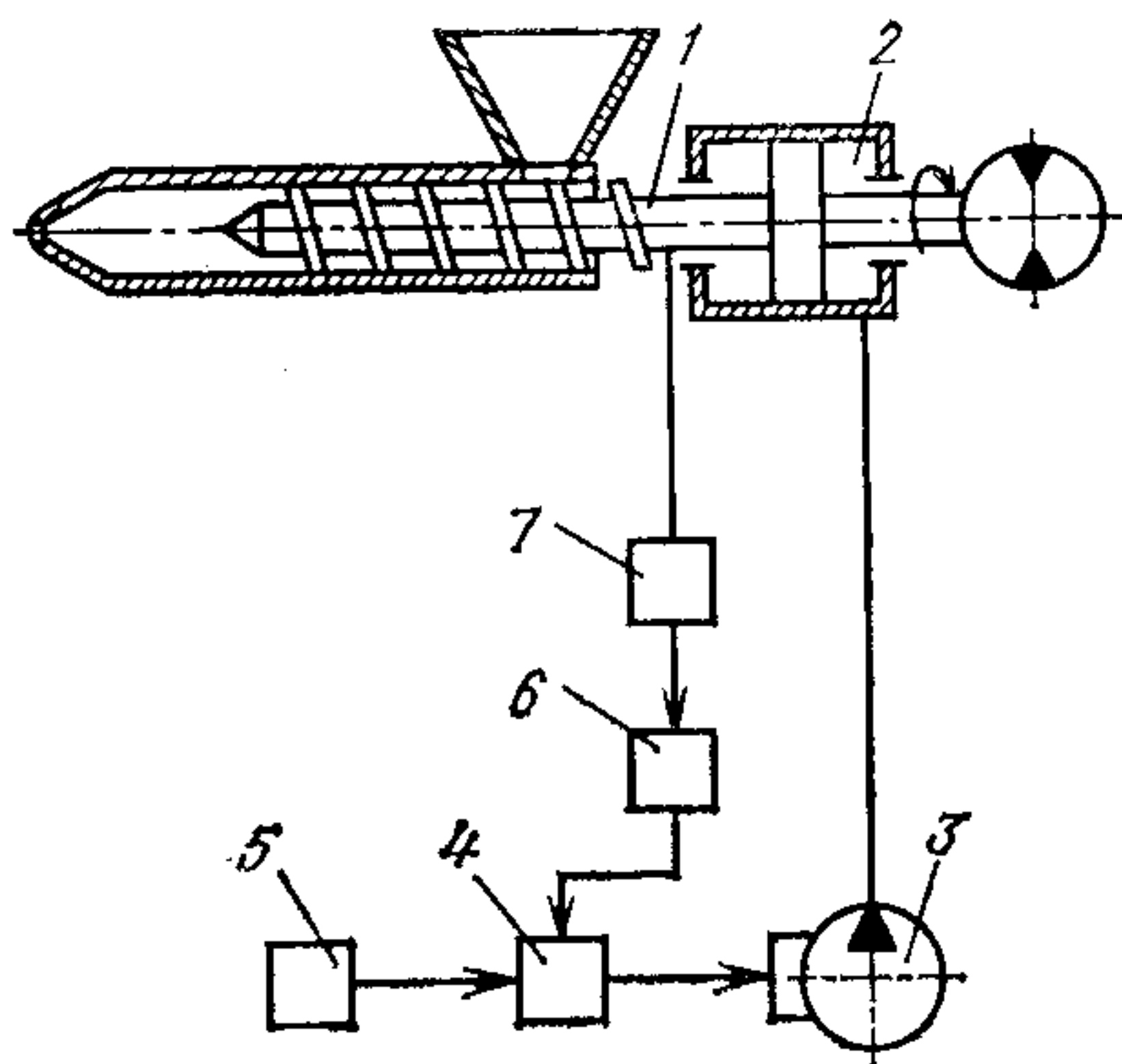


Рис. 4.2. Схема локальной системы автоматической стабилизации скорости впрыска

от насоса 3 с дистанционно регулируемой подачей. Путь, проходимый шнеком, контролируется датчиком 7, сигнал которого дифференцируется блоком 6 в сигнал, пропорциональный скорости движения шнека. Этот сигнал поступает на один из входов блока сравнения 4, на второй вход которого поступает сигнал, пропорциональный заданной скорости перемещения шнека от прибора 5. На выходе блока сравнения вырабатывается сигнал рассогласования между сигналами, поступающими на его входы. По знаку и значению этого сигнала насос изменяет свою подачу, что обеспечивает заданное значение действительной скорости впрыска.

Пример замкнутой системы программного управления — система регулирования давления формования. Система основана на применении в качестве исполнительного механизма автоматического регулятора давления с электрическим пропорциональным управлением, который может реализовать при формовании в разные (предварительно задаваемые) промежутки времени различные (предварительно задаваемые) давления. При формовании датчик давления, установленный в гидроцилиндре впрыска, вырабатывает сигнал, пропорциональный развивающемуся в гидроцилиндре давлению. Этот сигнал сравнивается с сигналом, пропорциональным заданному давлению на данном временном интервале. Вырабатываемый сигнал рассогласования служит сигналом для коррекции давления, настраиваемого автоматическим регулятором.

Наиболее совершенный класс систем автоматического управления литьевыми машинами — самонастраивающиеся системы. Сущность таких систем заключается в том, что в каждом конкретном случае формования деталей для стабилизации их свойств выбирается наилучший вариант компенсации или регулирования параметров формования (путем изменения давления, температуры, объемной скорости впрыска или двух-трех параметров вместе взятых).

лением, предварительно настроенным во втором предохранительном клапане. Давление, развивающееся в каждом цикле литья не влияет на давление, развивающееся в последующих циклах.

Системы с обратной связью можно подразделить на локальные системы автоматической стабилизации и системы программного управления. Пример локальной системы автоматической стабилизации — система регулирования скорости впрыска (рис. 4.2). Скорость перемещения шнека 1 (скорость впрыска) определяется расходом масла, поступающего в поршневую полость гидроцилиндра 2

Работа аналитических самонастраивающихся систем управления основывается на алгоритмах, которые разрабатываются по математическому описанию, моделирующему процессы литья на различных стадиях и в разные периоды (см. гл. 1). Такое же управление может основываться на статистических моделях, описывающих процессы литья.

## 4.2. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИТЬЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАЦИЙ ЦИКЛА

В настоящее время управление процессом литья производится с помощью различных систем регулирования с обратной связью. Поэтому ниже приведены примеры регулирования параметров стадии пластикации и формования с применением таких систем.

**Стадия пластикации.** Управление процессом литья на стадии пластикации основывается на знаниях наиболее важных и информативных критериев качества порции расплава, подготовленной к впрыску, и параметров, на них влияющих, с учетом эффективности регулирования параметров для управления процессом на этой стадии. Основная задача пластикации — получение точной порции полимера с заданной температурой за минимально возможный период времени, в который полимер находится при повышенных температурах. Колебания температуры по длине подготовленной к впрыску порции расплава зависят от давления пластикации, частоты вращения и хода шнека, стабильности температуры инжекционного цилиндра. При пластикации регулируют дозу расплава, подготовленную к впрыску, давление пластикации, частоту вращения шнека и температуру инжекционного цилиндра.

Системы автоматического регулирования объемной дозы расплава. Точность порции, подготовленной к впрыску, определяет количество полимера, подаваемого в форму, и тем самым влияет на условия развития давления в форме, а следовательно, на характер протекающих процессов формования в период нарастания и спада давления. Процессы пластикации влияют на объем самой порции и на разность между объемами порций в разных циклах. Эта разность возникает в результате непрогнозируемого воздействия различных факторов: колебания технологических параметров процесса пластикации (частоты вращения шнека, давления, температуры), неточности срабатывания командной аппаратуры (определяет неточность хода шнека), нестабильности технологических свойств сырья. Разность между объемами порций определяется также техническим состоянием оборудования. При правильном подборе режима пластикации эта разность достигает 2—3 % объема порции, в связи с чем необходимо устанавливать на машинах дополнительные регулировочные и контрольные приспособления для компенсации этой разности.

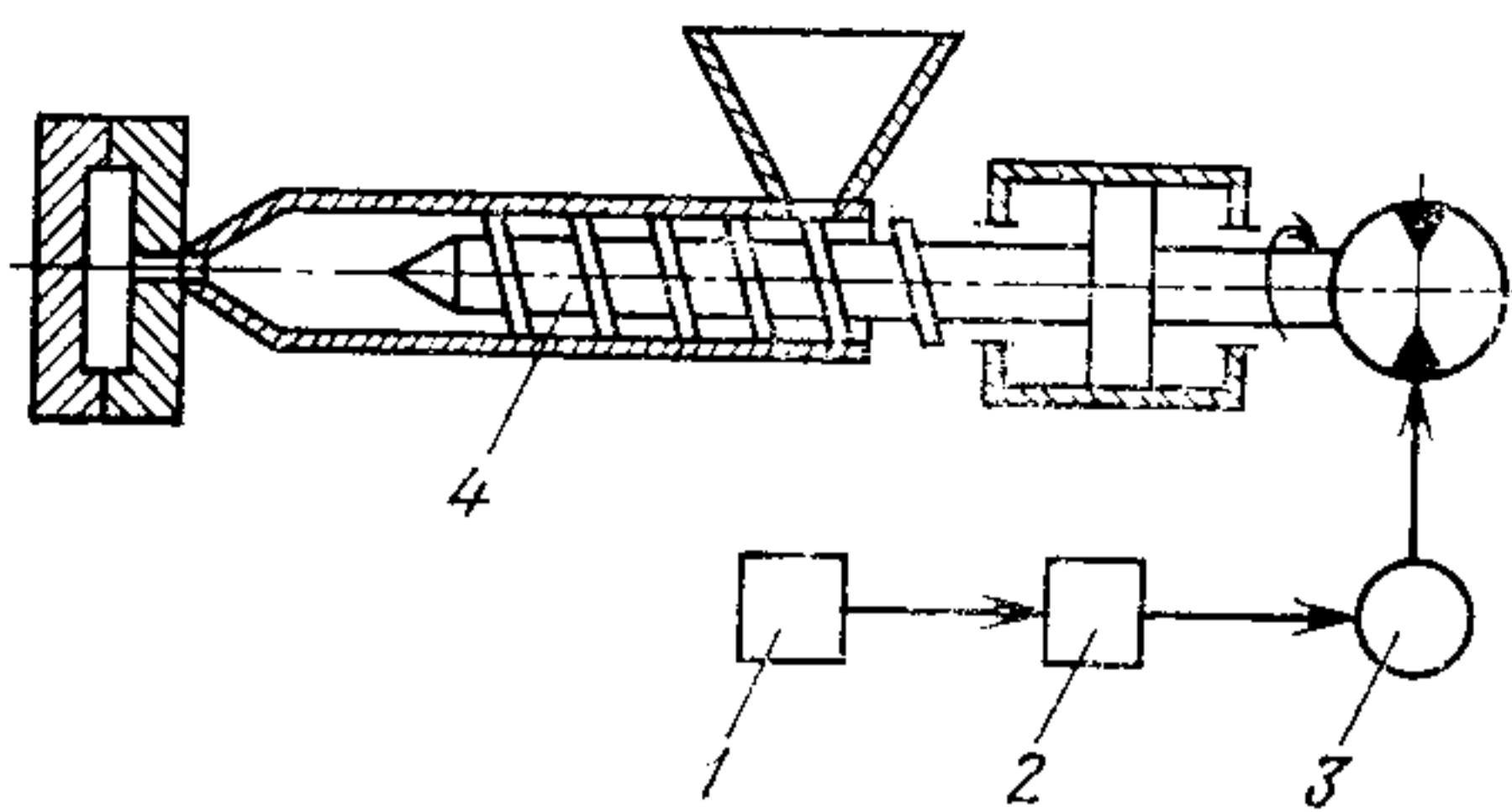


Рис. 4.3. Схема системы регулирования объемной дозы расплава без обратной связи

лируемый параметр — ход шнека, продолжительность пластикации. Требуемое значение регулируемого параметра устанавливается оператором при наладке вручную на задающем устройстве. Пластикация осуществляется до момента достижения заданного значения регулируемого параметра. Задающее устройство 1 через блок управления 2 выработывает команду исполнительному механизму 3 на прекращение вращения шнека 4. Ручная настройка задающего устройства 1 сопряжена с большим расходом полимера и большой продолжительностью наладки, и системы без обратной связи не обеспечивают требуемой точности дозирования в различных циклах вследствие нестабильности срабатывания регулирующих аппаратов и большой инерционности механизма пластикации и его привода, а также не учитывают нестабильность свойств сырья и изменения внешних возмущающих воздействий.

Локальные системы управления с обратной связью, компенсируя влияние инерционности механизма пластикации и его привода, стабилизируют заданную объемную дозу расплава. При такой системе управления литьевые машины кроме задающих устройств комплектуют датчиками обратной связи, контролирующими отработку заданного контролируемого параметра. Известны различные локальные системы управления с обратной связью объемной дозы расплава (рис. 4.4) — по пути перемещения шнека или по продолжительности пластикации. Пластикация осуществляется до момента достижения заданного задающим устройством 6 значения регулируемого параметра. При этом датчик обратной связи 2, соединенный со шнеком 1, контролирует изменение значения регулируемого параметра. Сигналы от задающего устройства и датчика обратной связи поступают в блок сравнения 5, определяющий разность между реализуемым и заданным значениями регулируемого параметра. По значению и знаку этой разности блок управления 4 в следующем цикле выработывает команду исполнительному механизму 3 на прекращение пластикации уже не в момент достижения заданного задающим устройством значения регулируемого параметра, а при достижении значения, равного алгебраической сумме задающего устройства и сигнала, выработанного блоком сравнения. Локальные системы управления с обратной связью, устраняя не-

Известны различные системы регулирования объемной дозы расплава. Системы без обратной связи обеспечивают регулирование объемной дозы расплава по пути перемещения шнека или по продолжительности пластикации. При такой системе управления литьевые машины (рис. 4.3) оснащают специальными устройствами (конечными переключателями, реле времени), задающими регу-

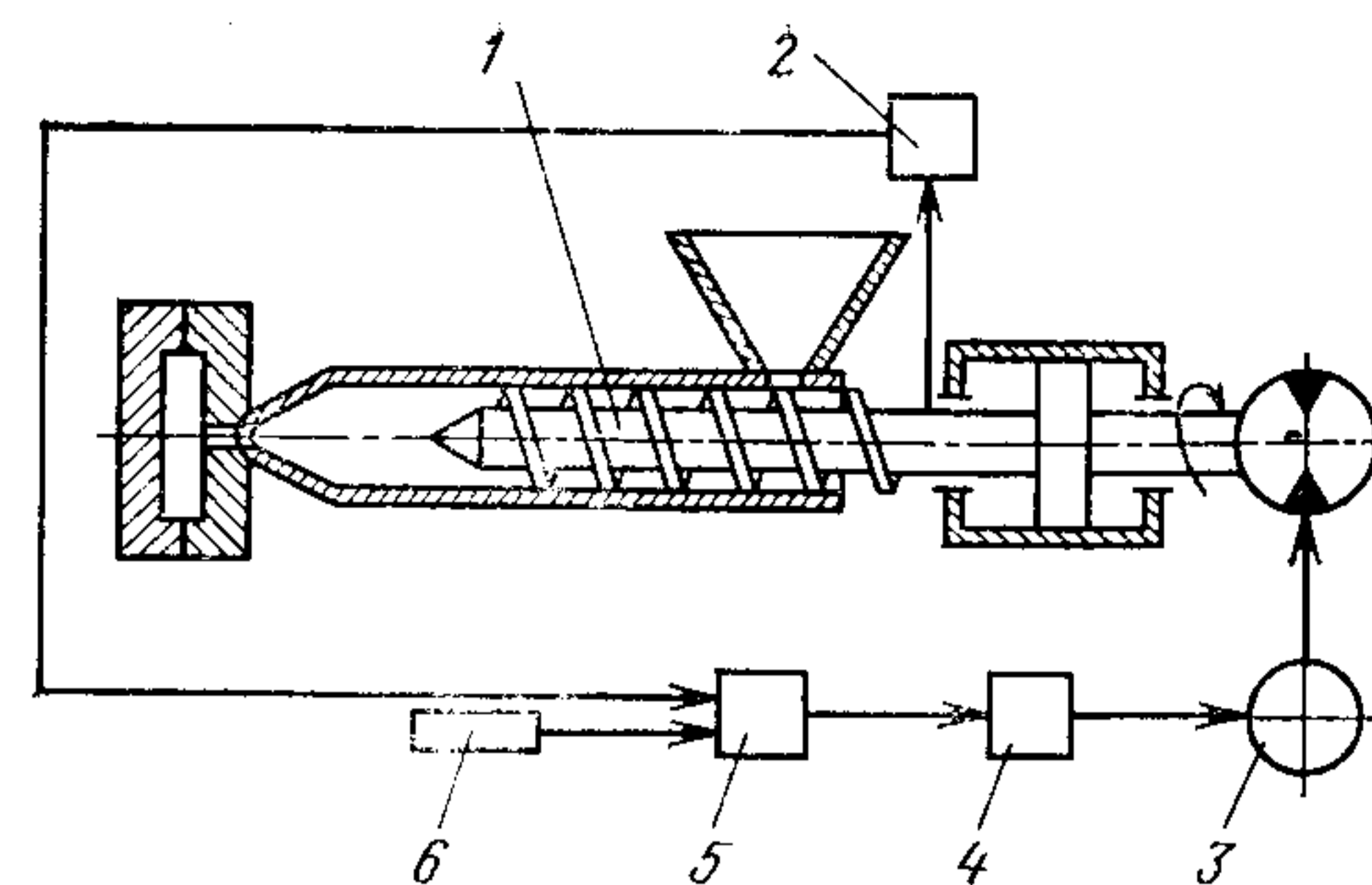


Рис. 4.4. Схема локальной системы регулирования объемной дозы расплава с обратной связью

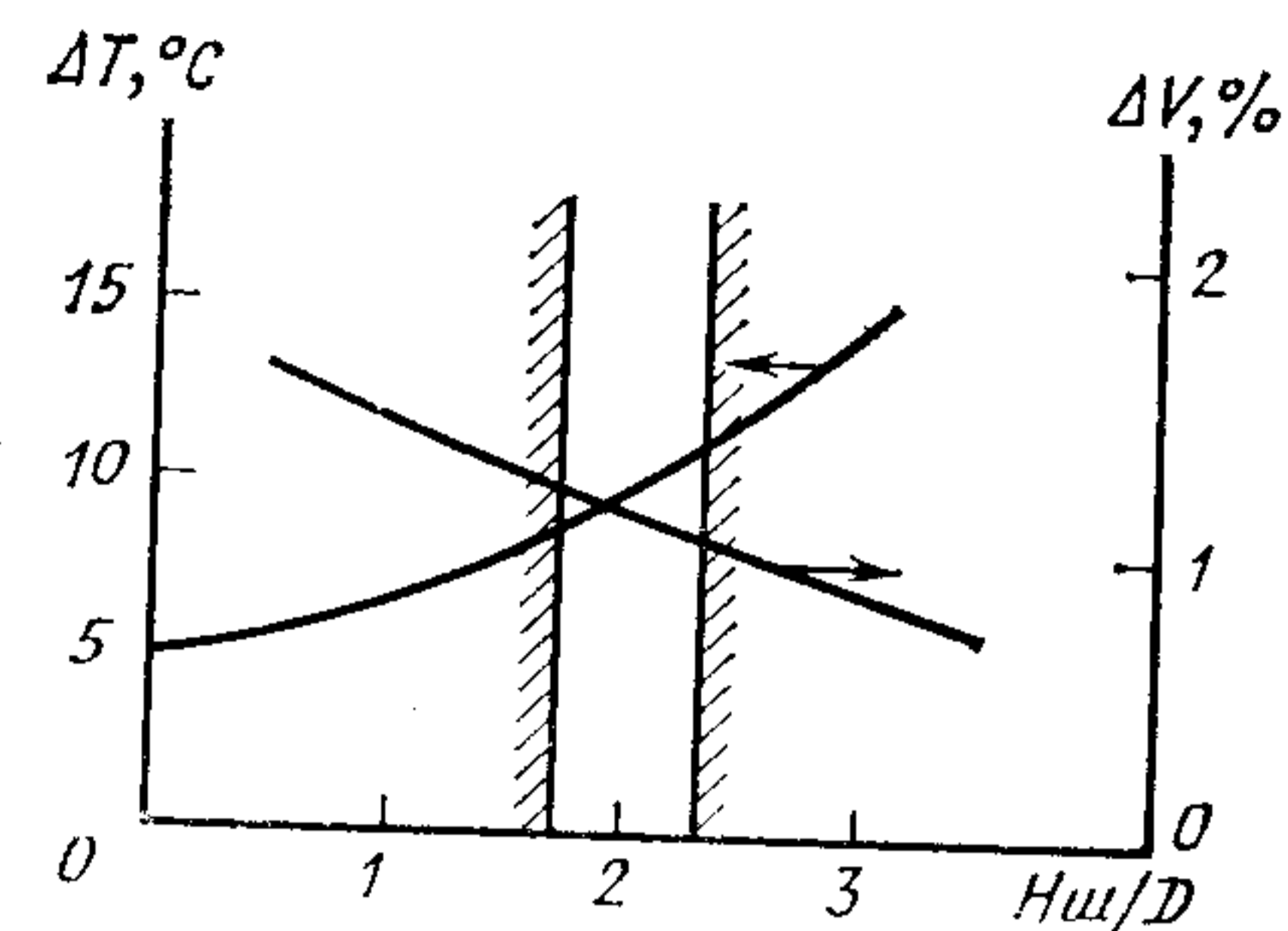


Рис. 4.5. Изменение температуры и скорости течения в зависимости от  $H_{ш}/D$

стабильность, связанную с работой механизмов, не обеспечивают компенсацию изменения удельного объема расплава, вызываемого нестабильностью теплофизических характеристик полимера и температуры.

На стабильность работы шнекового пластикатора оказывают влияние конструктивные параметры шнека. Увеличение отношения хода шнека при впрыске к диаметру шнека  $H_{ш}/D$  приводит к неоднородности температуры  $\Delta T$  по длине порции расплава, подаваемой в форму, в результате возрастает нестабильность температуры порции расплава в различных циклах (рис. 4.5). Вместе с тем увеличение  $H_{ш}/D$  повышает стабильность объема порций расплава, подаваемых в различных циклах. Поэтому имеется область оптимальных значений  $H_{ш}/D$  в зависимости от общей длины шнека. Для шнека с относительной длиной  $L/D = 13 \div 16$  эти значения приведены на рис. 4.5. При увеличении хода шнека с целью повышения точности объема порций расплава, подаваемых в форму в различных циклах, нужно увеличить длину шнека, чтобы обеспечить ту же температурную стабильность порций расплава.

Известны системы, регулирующие объемную дозу расплава стабилизацией «подушки», которая остается в передней части инжекционного цилиндра перед шнеком после впрыска для компенсации усадки полимера в форме при формовании. В этих системах стабилизация объемной дозы достигается по внешним по отношению к самой системе показателям. Схема адаптационной системы, основанной на определении момента окончания заполнения формы, приведена на рис. 4.6. Датчик линейного перемещения 1 шнека фиксирует действительную координату шнека в момент окончания впрыска, который определяется устройством 7, т. е. фиксирует величину «подушки» перед шнеком  $H_{п}$  в момент окончания заполнения. Блок сравнения 8 определяет значение и знак разности между действительной величиной «подушки» и величиной, заданной задающим устройством 6. Блок коррекции 5 по сигналу блока сравнения 8 корректирует заданный задающим устройством 4 ход шнека при пластикации  $H_{ш}$ , производя алгебраическое суммирование сигналов блока 8 и задающего устройства 4. Откорректированный сигнал, определя-

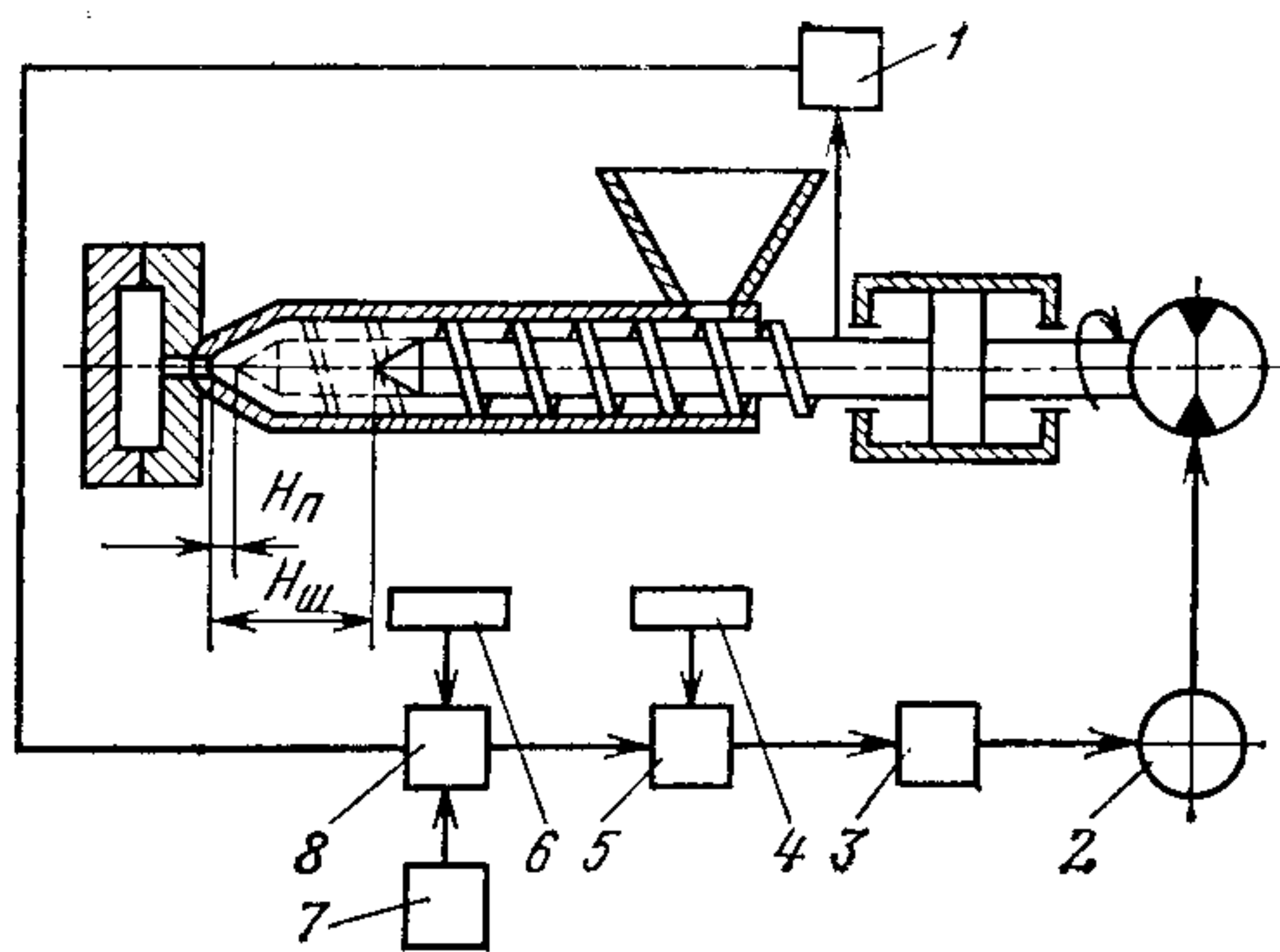


Рис. 4.6. Схема адаптивной системы регулирования объемной дозы расплава

цилиндра и отодвигает шнек назад. При этом рабочая длина шнека сокращается, давление в шнеке уменьшается (при постоянных давлении в гидроприводе и частоте вращения шнека) и образуется температурный градиент по длине порции расплава (рис. 4.7, а) в результате: различия сдвиговых усилий, испытываемых разными слоями порции при пластикации; разной продолжительности нагрева этих слоев за счет теплообмена; а также изменения эффективной длины шнека. Это приводит к изменению температуры и неоднородности свойств расплава по длине порции.

Наиболее сильное влияние на температуру полимера оказывают давление пластикации и частота вращения шнека. Их выбирают в качестве параметров для регулирования температуры полимера как наименее инерционные по степени воздействия. На рис. 4.7, б схематично показано изменение температуры полимера по ходу шнека под действием различных источников тепла. Кривая 2 показывает изменение температуры полимера при постоянном давлении в гидроприводе; кривая 3 — изменение температуры в результате изменения работы сдвиговых сил при изменении давления пластикации (кривая 4), которое при отходе шнека плавно уменьшается до минимального значения с последующим возрастанием до заданного (аналогично изменяется давление в гидроприводе, вызывающее такое изменение давления пластикации). Суммирование кривых 2 и 3 дает практически постоянную температуру по длине порции расплава (линия 1).

ющий ход шнека в следующем цикле, через блок управления 3 вырабатывает команду исполнительным механизмам 2 на остановку вращения шнека при достижении им откорректированного положения.

Системы автоматического регулирования давления пластикации и частоты вращения шнека. При пластикации расплав накапливается в передней части цилиндра

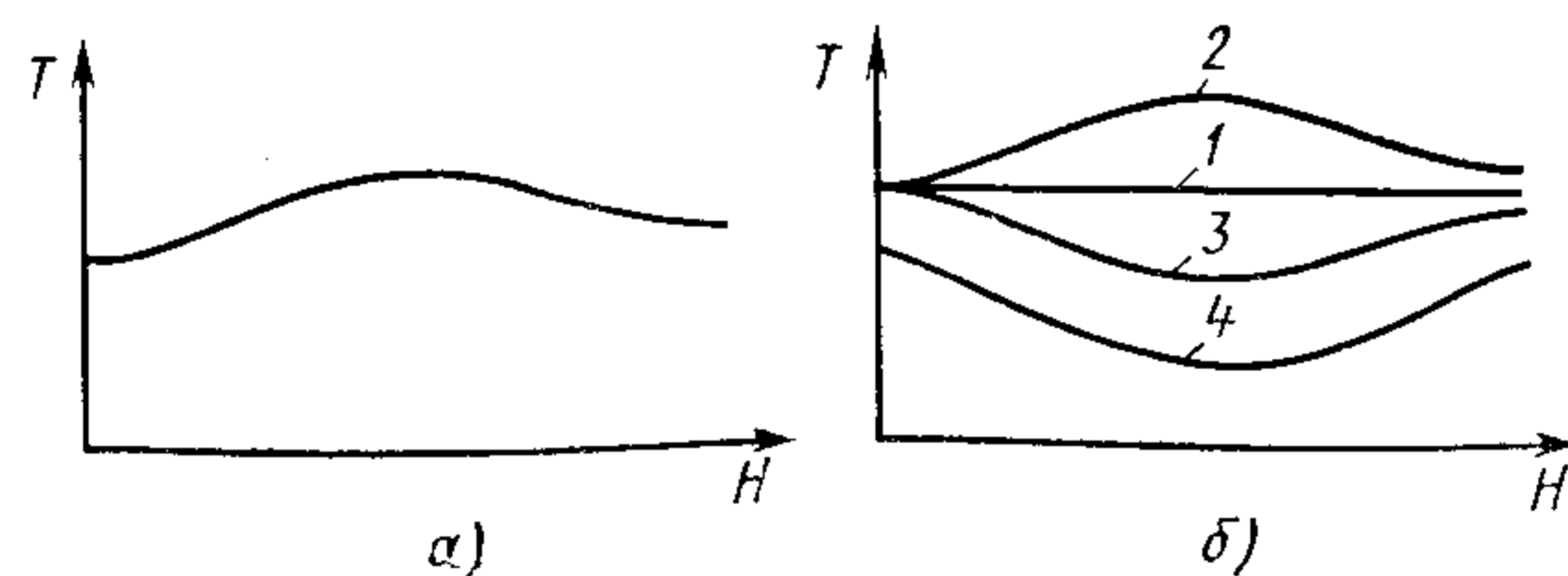


Рис. 4.7. Изменение температуры  $T$  по ходу шнека  $H$  (длине порции расплава) — кривые 1, 2, 3 и изменение давления пластикации — кривая 4

Системы без обратной связи ступенчато регулируют давление пластикации и частоту вращения шнека по пути его перемещения или по времени пластикации. Ход шнека при пластикации (или ее продолжительность) разбивают на несколько участков (4—10). Для каждого участка задают параметры пластикации (давление или скорость) таким образом, чтобы при отходе шнека назад температура пластикационного полимера не изменялась. Точность регулирования давления и скорости системами без обратной связи невелика.

Адаптивные системы регулируют параметры пластикации с большей эффективностью. Пример такой системы (рис. 4.8) — система, основанная на контроле крутящего момента, действующего на шнек. Устройства 3, 4 задают давление и частоту вращения шнека для начального момента пластикации. Датчик крутящего момента 5 вырабатывает сигнал, пропорциональный моменту, возникающему на шнеке 2 при заданных параметрах. Этот сигнал поступает в логический блок 6 и запоминается в нем. При уменьшении рабочей длины шнека в инжекционном цилиндре 1 крутящий момент, действующий на него, изменяется. При этом логический блок вырабатывает сигнал регуляторам давления и частоты на изменение параметров таким образом, чтобы крутящий момент сохранялся на том же уровне, что и в начальный момент пластикации.

Такая схема позволяет компенсировать изменение эффективной длины шнека при пластикации, но ее недостаток — необходимость задания параметров для начального момента процесса.

Системы автоматического регулирования температуры инжекционного цилиндра. Точность поддержания температуры по зонам цилиндра пластикации оказывает существенное влияние на качество подготовленной при пластикации порции расплава к впрыску. Цилиндры пластикации литьевых машин обогреваются ленточными электронагревателями сопротивления, закрепленными на их наружной поверхности. Каждая зона обогрева имеет локальную систему регулирования температуры, которая обычно состоит из датчика температуры, терморегулирующего прибора со встроенным задающим устройством и выходным усилителем мощности. Широко применяют двухпозиционные терморегуляторы. Однако двухпозиционное регулирование приводит к значительным колебаниям температуры цилиндра относительно заданного значения. Это обусловлено наличием определенной зоны нечувствительности в регуляторе и большим значением «чистого» запаздывания зоны обогрева.

Другой способ регулирования температуры стенки инжекционного цилиндра — регулирование мощности обогрева путем дозирования энергии. Питание обогреву подается не непрерывно, а импульсами. Регулируя соотношение между периодами подачи энергии для обогрева и паузами, можно регулировать среднее значение силы тока обогрева. Однако порционное регулирование энергии сокращает срок службы обогревательных элементов. Этих недостатков лишено устройство плавного регулирования силы тока обогрева. Термопара



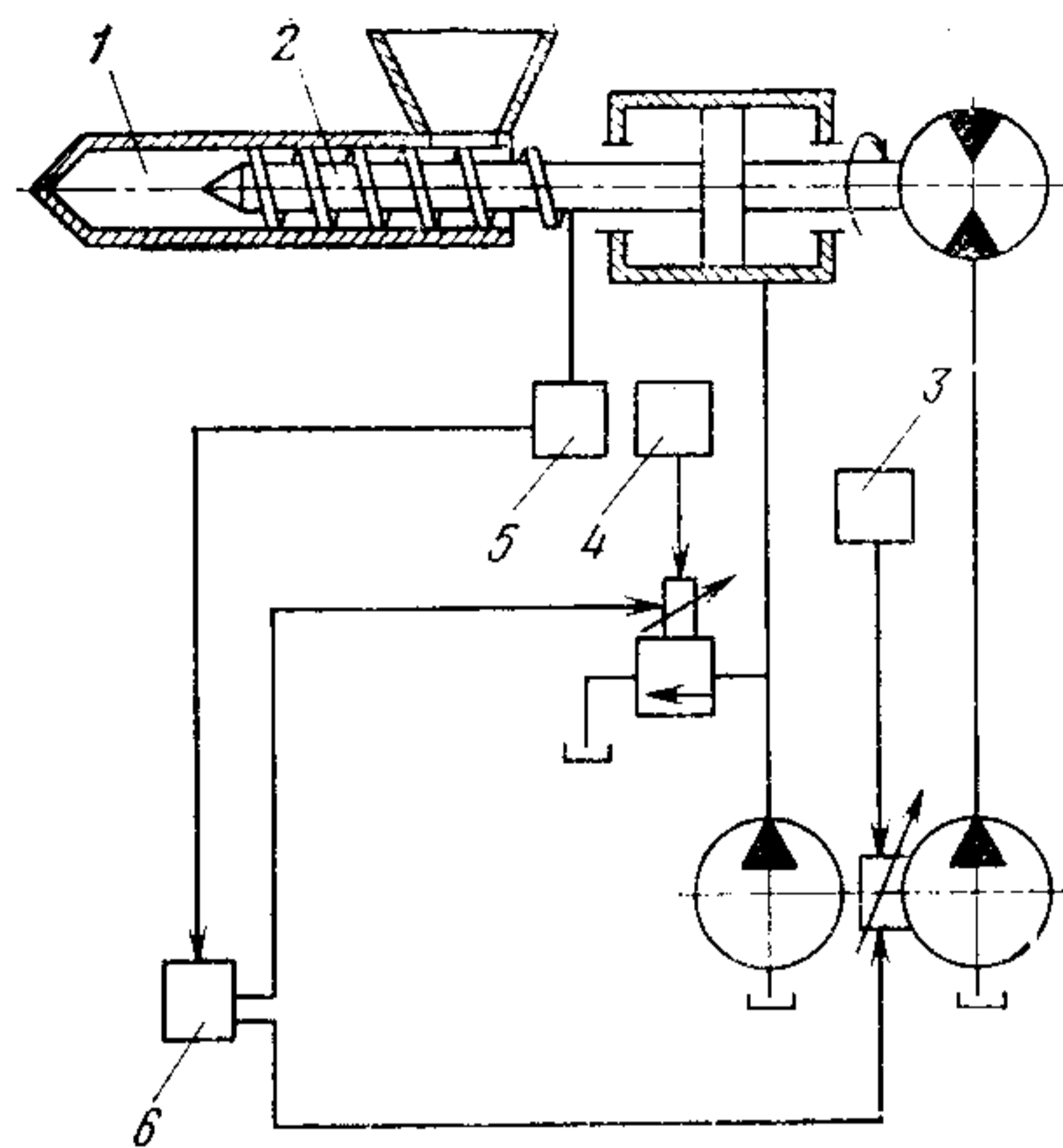


Рис. 4.8. Схема адаптивной системы регулирования параметров пластикации

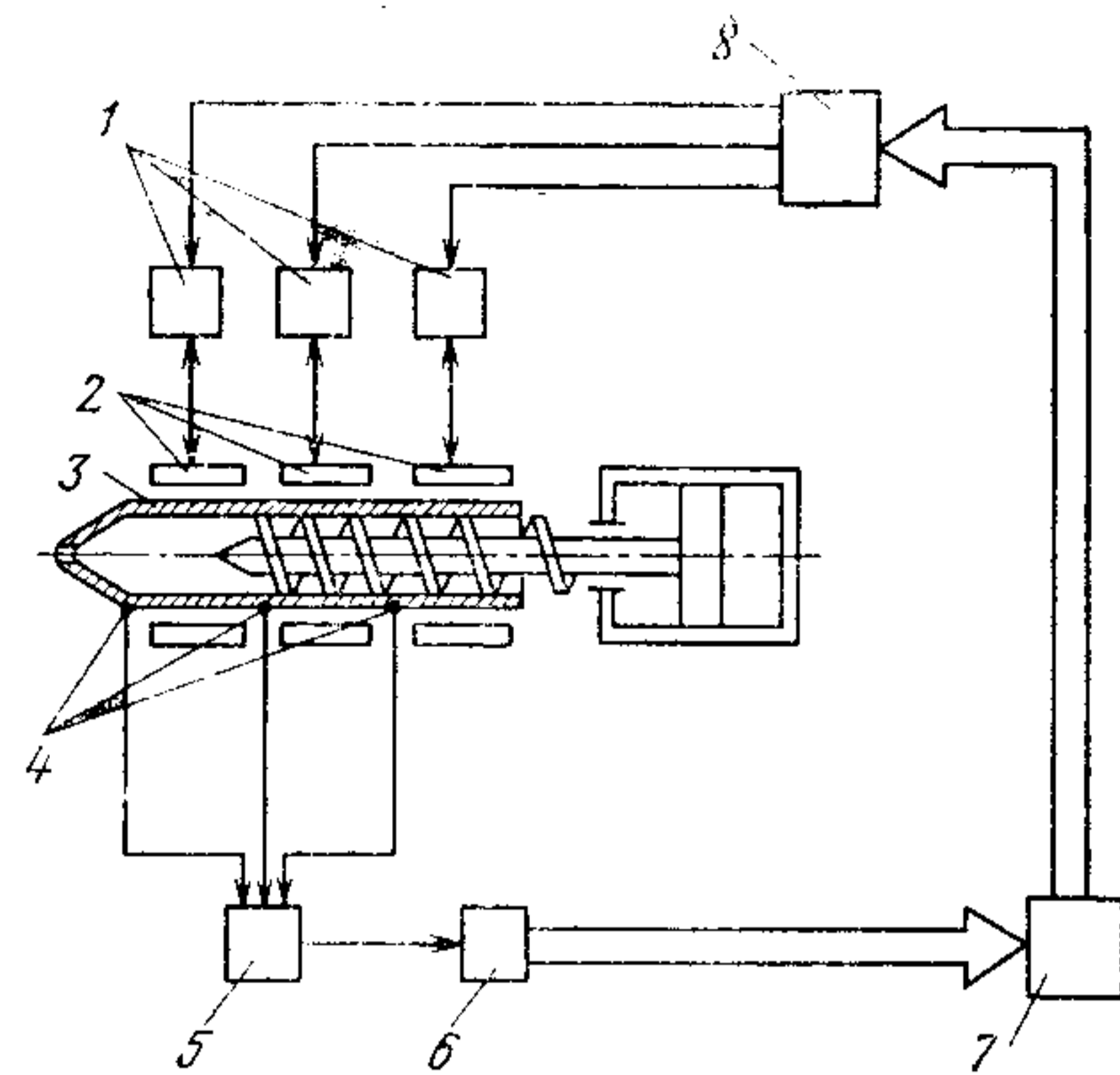


Рис. 4.9. Схема системы автоматического регулирования температуры с использованием ЭВМ

Влияние изменения технологических параметров на качественные показатели изделий и продолжительность цикла

Параметр	Изменение параметра		Изменение, %			
	в единицах измерения	в %	прочностных показателей	относительного удлинения при разрыве	размерной точности	продолжительности цикла
Температура полимера	40—60 °С	15—30	10—20	40—60	20—30	10—15
	До 6 °С	2—3	1—2	4—5	2—3	5—20
Температура формы	30—40 °С	40—60	15—30	40—60	20—30	20—40
	2—5 °С	10	1—2	—	—	5
Давление формования	30—50 МПа	30—40	3—10	10—20	10—15	—
	2—5 МПа	3—5	1—2	—	1	—
Время впрыска	0,5—3 с	40—60	10—30	10	10	—
	До 0,8 с	10—15	1—1,5	—	—	—

Примечание. Верхняя строка — возможные интервалы регулирования параметров; нижняя — возможные нерегулируемые колебания параметров при постоянном режиме.

подключается к измерительному мосту, который балансируется для заданной температуры. При отклонении температуры от заданного значения вырабатывается разностный сигнал, который управляет исполнительными органами в системах автоматического регулирования температуры, усиливая или уменьшая подаваемую мощность обогрева за счет изменения напряжения.

Достаточно высокую точность имеет система автоматического регулирования температуры (рис. 4.9) с использованием ЭВМ. Температура нагревателей 2 инжекционного цилиндра 3 позонно регулируется терморегуляторами 1 по сигналам от ЭВМ 7, поступающим через преобразователь 8. Используют терморегуляторы с пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования. Температура обогреваемых зон контролируется термодатчиками 4, сигналы которых через устройство согласования 5 и аналого-цифровой преобразователь 6 поступают на входы ЭВМ. Измеряемая при литье температура сравнивается с заданной, и в зависимости от значения рассогласования по разработанному алгоритму вычисляются откорректированные значения температур зон инжекционного цилиндра.

Применение для регулирования температуры обогрева инжекционного цилиндра систем с обратной связью обеспечивает требуемую точность поддержания заданной температуры при использовании в качестве датчиков обратной связи безынерционных терморпар, контролирующих температуру стенки цилиндра в непосредственной близости от его внутренней поверхности, контактирующей с расплавом.

**Стадия формования.** На процессы формования (физико-химические и формирования структуры изделий), их стабильность, и, следовательно, на свойства и качество получаемых изделий большое влияние оказывают параметры формования: температура полимера,

поступающего в форму, давление формования, скорость впрыска (время впрыска), температура формы, продолжительность выдержки под давлением, общая продолжительность пребывания полимера в форме. Кроме этих регулируемых параметров на свойства отливаемых изделий оказывают влияние конфигурация и размеры изделий, конструкция литника и его расположение, конструкция литьевой машины, свойства перерабатываемого полимера. Изменяя параметры формования, можно регулировать процессы формования на каждой стадии и в каждом периоде и в результате этого получать изделия требуемого качества в зависимости от условий их эксплуатации. В табл. 4.1 приведены возможные интервалы регулирования параметров формования (в диапазоне допустимых режимов переработки) для большинства промышленных полимеров, в которых показатели качества не снижаются ниже нормируемых значений, и диапазоны возможного изменения показателей качества изделий и продолжительности цикла литья при варьировании параметров формования в этих интервалах.

На стабильность процесса литья и свойства получаемых изделий и, следовательно, на их качество большое влияние оказывает отклонение технологических свойств (главным образом, вязкости) перерабатываемого полимера, определяющих процессы формования. Поэтому для обеспечения работоспособности литьевых машин с автоматическим управлением промышленные полимеры выпускают в марочном ассортименте по вязкости с узкими интервалами возможного колебания вязкости, которое может быть компенсировано регулированием технологических параметров литья [9].

На стабильность процесса литья оказывают влияние нерегулируемые изменения параметров формования в результате возмущающих воздействий, вызванных колебанием вторичных факторов технологии (температуры окружающей среды, напряжения в электросети, расхода и температуры воды для охлаждения и др.). В табл. 4.1 приведены возможные нерегулируемые изменения параметров формования при постоянном режиме переработки в результате возмущающих воздействий и диапазоны колебания качественных показателей отливков за счет этих изменений. Приведенные данные показывают, что стабилизацией основных параметров формования на заданном уровне можно достичь экономии полимера, улучшить и стабилизировать качество изделий и повысить производительность переработки.

Для направленного изменения протекающих при литье процессов и регулирования свойств литьевых изделий необходимо знать параметры, которые целесообразно использовать в качестве объектов управления [6]. Для этого нужно знать эффективность целесообразности управления каждым параметром.

Температуру цилиндра или литьевой формы нельзя использовать как объект регулирования и поднастройки процессов литья в цикле вследствие значительной инерционности. Температура при работе машины в режиме стабилизации должна задаваться как постоянный параметр в зависимости от конкретных технологических условий и поддерживаться на постоянном уровне. Возможное случайное отклонение температуры цилиндра или формы должно устраняться непосредственно в цикле или компенсироваться другими параметрами. Однако в случае сильных отклонений свойств сырья целесообразно использовать и автоматическое управление температурой цилиндра или формы. Такое регулирование (поднастройка) температуры должно применяться только тогда, когда отклонение свойств изделия (критерий качества) превысит допустимые значения. Изменять температуру литьевой формы в цикле, изменяя расход охлаждающей жидкости, не эффективно, так как продолжительность изменения температуры формы большой массы соизмерима с длительностью цикла. Однако температуру литьевой формы технологически желательно изменять при переходе от периода заполнения формы к периоду нарастания давления. Это может эффективно достигаться в результате специального способа формования. Такие циклы целесообразны при изготовлении тонкостенных изделий, либо изделий больших габаритов (с большой площадью литья, с большими расстояниями течения от впускного отверстия).

Давление формования — наиболее информативный параметр процесса, безынерционен, позволяет точно (в пределах точности аппаратуры) менять его значение и регулировать распределение давления по длине формы. Меняя давление, можно создавать различные режимы формования, при этом давление как параметр можно регулировать в течение большей части продолжительности цикла формования, включая заполнение формы. С помощью давления можно осуществлять подрегулировку процесса непосредственно в том же цикле по результатам показаний различных индикаторов

процесса. Давление можно использовать как индикатор стабильности процесса в циклах. Поэтому давление формования — универсальный объект контроля и управления процесса литья.

Продолжительность выдержки под давлением — безынерционный параметр и его можно корректировать в каждом следующем цикле. Диапазон влияния давления формования на качество полимера шире, чем диапазон влияния продолжительности выдержки под давлением. При регулировании процесса по продолжительности выдержки под давлением на конечное распределение давления в форме оказывают влияние размеры литника и изделия, время до момента снятия давления, что ограничивает возможности регулирования качества изделий и усложняет расчет оптимальных параметров. С уменьшением времени подпитки уменьшается остаточное давление в форме. Использование продолжительности выдержки под давлением в качестве объекта управления невыгодно экономически, так как приходится устанавливать наибольшее давление, которое не нужно для формирования свойств изделий. При этом форма и механизм запираания испытывают большие деформации, которые сказываются на стабильности размеров изделий.

Скорость впрыска оказывает существенное влияние на свойства изделий и может быть эффективно использована как объект управления при автоматическом регулировании совместно с давлением. Регулирование одной скорости впрыска недостаточно, так как период заполнения формы — первый начальный период процесса формования, и скорость впрыска не может оказать окончательного воздействия на процессы формования в последующие периоды, где определяющими факторами являются другие параметры. Применение скорости впрыска в качестве единственного параметра управления исключает возможность выполнения подрегулировку процесса в том же цикле.

Температуру полимера можно регулировать непосредственно или путем измерения давления в сопле при впрыске полимера в форму. Измерение температуры через давление более информативно, так как позволяет учесть возможные возмущения в процессе заполнения (например, охлаждение сопла, формы и т. д.) и компенсировать их непосредственно в том же цикле подачей команды в режимах со сбросом давления на изменение вторичного давления формования (т. е. давления формования после сброса давления).

Также возможно регулирование продолжительности цикла при изменении температуры полимера или формы в каждом конкретном цикле. Проведенный анализ параметров формования показывает, что для автоматического управления процессом литья на стадии формования можно использовать давление и скорость впрыска.

Системы автоматического регулирования давления формования. В обычном режиме литья после заполнения формы давления в сопле (линия 2 на рис. 4.10) и на входе в форму (линия 3) достигают максимальных значений, обусловленных установленным в гидроприводе давлением (линия 1), и практически не изменяются (на машинах с предварительной пластикацией) в те-

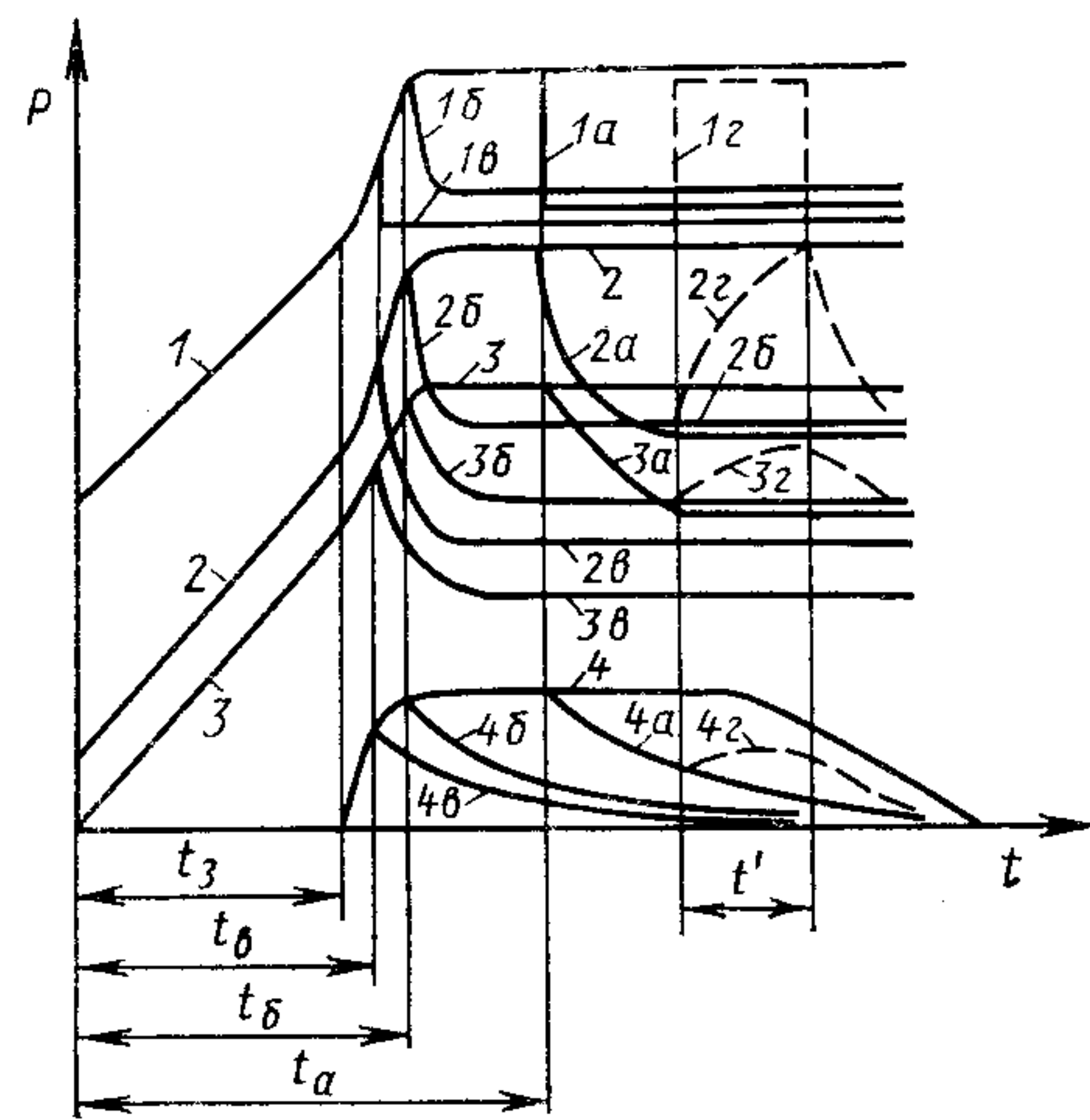


Рис. 4.10. Изменение давления во времени в различных режимах со сбросом давления

формы (линии 4а, 4б, 4в). На диаграмме показано изменение давления в системе после сброса давления в гидроприводе через разные промежутки времени ( $t_a$ ,  $t_b$ ,  $t_v$ ) с момента начала заполнения формы ( $t_3$  — время заполнения формы). Вторичные давления (после сброса давления) в сопле и в форме соответствуют задаваемому вторичному давлению (после сброса) в гидросистеме. Сброс давления в сопле и форме происходит практически одновременно со сбросом давления в гидроприводе. Если для формования изделия необходимо более высокое давление по сравнению со вторичным давлением, то его можно вновь увеличить, как показано линиями 1а—1г, 2а—2г, 3а—3г, 4а—4г. Это позволяет сохранять давление в форме высоким в течение заданного времени  $t'$  до момента отключения литника.

Изменение давления на входе в форму в режимах формования со сбросом давления (рис. 4.11, а) приводит к изменению перепада давлений по длине формы (рис. 4.11, б). Линия 1 показывает изменение давления на входе в форму в режиме формования без сброса давления, линии 2, 3 — со сбросом давления в разные моменты. В момент заполнения формы (точка а) распределение давления вдоль формы показывает линия 4, а в момент развития в системе максимальных усилий  $t_m$  — линия 5 (соответствует участку бс). Если сбросить давление в момент  $t_m$  (точка б), то давление на входе в форму пойдет по линии 3 (участок де), а давление по длине формы распределяется по линии 6. Если давление сбросить до полного нарастания давления в момент  $t_1$  (точка ж), давление в форме распределяется по линии 7. Таким образом, время сброса давления влияет на распределение давления в форме. Давление и его распределение по длине формы в режимах формования со сбросом давления зависят от задаваемого вторичного давления формования и времени сброса давления.

чение выдержки полимера в форме под давлением. В ряде случаев требуется изменять (регулировать) давление на входе в форму и его распределение по ее длине в период заполнения формы или в период нарастания давления. Это достигается ступенчатым изменением (регулированием) давления в гидроприводе — применением режимов формования со сбросом давления.

Ступенчатое изменение (регулирование) давления в гидроприводе (линии 1а, 1б, 1в) приводит к ступенчатому изменению давления в сопле (линии 2а, 2б, 2в), на входе (линии 3а, 3б, 3в) и в конце

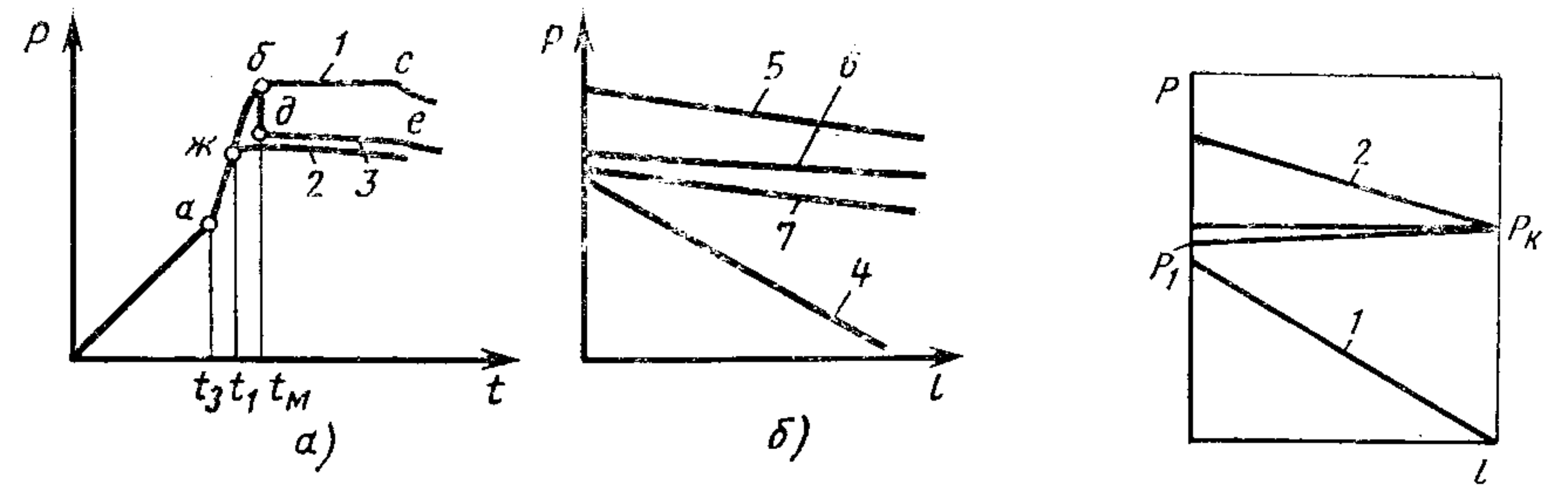


Рис. 4.11. Изменение давления во времени  $t$  (а) и по длине формы  $l$  (б) в режимах со сбросом давления в разное время цикла

Рис. 4.12. Изменение давления по длине формы в режиме со сбросом давления, обеспечивающим равномерное распределение давления по длине формы

К моменту сброса давления в конце формы возникает определенное давление  $P_k$  (рис. 4.12). Линия 2 показывает распределение давления по длине формы в момент сброса давления (сброс в период нарастания давления), линия 1 — в момент окончания заполнения формы. Если вторичное давление на входе установить равным  $P_1$ , то давление вдоль формы распределяется по линии  $P_1 P_k$ , если вторичное давление задать равным  $P_k$ , то получается одинаковое давление по всей длине формы (перепад давлений равен нулю).

Для реализации режимов формования со сбросом давления момент сброса можно определять по сигналу от датчика давления, установленного в конце формы, когда давление на этом участке достигает контрольного значения. Устанавливая на контрольном датчике требуемое давление и задавая соответствующее вторичное давление в гидросистеме, можно реализовать режимы формования со сбросом давления, обеспечивающие требуемое среднее давление в форме и минимальный перепад давлений по ее длине. Контрольный датчик давления можно устанавливать в любом месте по длине формы, тем самым производя контроль и регулирование давления в необходимых пределах на участке вход — заданное сечение изделия.

Для реализации различных режимов формования со сбросом давления нужно обеспечить отдельное регулирование первичного и вторичного давлений формования и возможность сброса давления в различные моменты формования: до заполнения формы, после заполнения, до развития максимальных усилий, в момент развития максимальных усилий и в последующие моменты. Режимы формования со сбросом давления применяют главным образом в трех случаях.

Первый случай: при формовании в форме развивается высокое давление, которое создает большое распорное усилие (стремится раскрыть форму), превышающее усилие запирающей литевой машины. Форма раскрывается (возникает зазор между полуформами), что приводит к образованию облоя и изменению размеров изделия. Для получения стабильных размеров изделий организуют режим формо-

вания со сбросом давления, в котором возникающее при формировании усилие не превышает усилие запирающего.

Второй случай: при выдержке полимера в форме под давлением по ее длине образуется большой перепад давлений — относительное давление  $P_{\text{к}}/P_{\text{н}} < 0,6 \div 0,7$  (отношение давлений в конце  $P_{\text{к}}$  и в начале  $P_{\text{н}}$  формы). Неравномерное распределение давления при формировании вызывает различие свойств по длине изделия (разнотолщинность, различие ориентационных напряжений и физико-механических показателей). Для получения изотропных свойств по длине изделий перепад давлений при формировании должен быть минимальным — относительное давление  $P_{\text{к}}/P_{\text{н}} > 0,85$ . Для этого режим формирования со сбросом давления организуют таким образом, что относительное давление при выдержке полимера в форме под давлением  $P_{\text{к}}/P_{\text{н}} > 0,85$ .

Третий случай: для получения изделий с заданными в зависимости от условий их эксплуатации качественными показателями (в том числе по размерной точности) полимер нужно формировать при определенном давлении. Для этого организуют режим формирования со сбросом давления, в котором выдержка полимера в форме под давлением осуществляется при требуемом давлении.

Для регулирования давления формирования используют системы без обратной связи, локальные системы с обратной связью и адаптивные системы. Эти системы могут обеспечивать ступенчатое (4—10 ступеней) изменение давления в течение стадии формирования. Для каждой ступени формирования задают ее продолжительность и давление. Давление формирования регулируется изменением давления масла в поршневой полости гидроцилиндра впрыска, которое без обратной связи поддерживается с точностью исполнительных гидравлических аппаратов. Ведение процесса с помощью систем регулирования давления формирования без обратной связи дает минимальную информацию об истинном распределении давления в полости формы во времени.

Локальные системы регулирования давления формирования с обратной связью регулируют давление в поршневой полости гидроцилиндра впрыска в зависимости от отклонения реализуемого давления от заданного давления в полости формы или в сопле инжекционного цилиндра. Эти системы хорошо регулируют давление, но требуют установки датчика давления в полости формы или в сопле.

Известны системы регулирования давления формирования, основанные на использовании шагового принципа регулирования. В таких системах в качестве индикатора процесса можно использовать также интегральный критерий качества изделия — его массу. В каждом цикле отливаемое изделие взвешивается и его масса сравнивается с заданной. В зависимости от знака сигнала рассогласования давление в поршневой полости гидроцилиндра впрыска в следующем цикле увеличивается или уменьшается на предварительно заданное значение. Такая система позволяет стабилизировать на заданном уровне массу отливаемых изделий. Ее недостатком является то, что

параметр в последующем цикле литья регулируется по информации, полученной в предыдущем цикле.

Вследствие малой продолжительности времени сброса давления в некоторых режимах, соизмеримой с точностью срабатывания гидро- и электроаппаратуры в системе управления машины, целесообразно в этих случаях давление регулировать по значению первичного давления формирования: давление сбрасывать в момент, когда давление в гидросистеме впрыска достигает требуемого значения (устанавливается специальным ограничителем).

Системы автоматического регулирования объемной скорости впрыска. Регулировать процессы формирования можно изменением скорости течения полимера при заполнении формы путем изменения объемной скорости впрыска (рис. 4.13). Снижение скорости течения полимера при заполнении на любом участке формы вызывает снижение давления на входе в форму и среднего в ней давления в момент окончания ее заполнения (на первом участке при скорости течения  $V_{11}$  и  $V_{12}$  давление развивается по линиям  $P_{11}$  и  $P_{12}$ , а на втором — при скорости течения  $V_{21}$  и  $V_{22}$  по линиям  $P'_{21}$ ,  $P_{22}$ , если скорость течения не изменяется (линия  $V'_{21}$ ), то давление изменяется по линии  $P'_{21}$ . Чрезмерное снижение скорости течения (линия  $V_{23}$ ) с начального значения  $V_{13}$  (при этой скорости давление развивается по линии  $P_{13}$ ) приводит к увеличению давления на входе в форму и среднего в ней давления (линия  $P_{23}$ ) к концу периода заполнения в результате сильного влияния неизотермичности течения на перепад давлений (см. разд. 1.2.2). Режим изменения скорости заполнения позволяет регулировать давление в форме и его распределение по длине формы в период ее заполнения.

На рис. 4.14, а показан цикл ступенчатого изменения скорости течения при заполнении формы: на первом участке скорость  $V_1$ , на втором —  $V_2$ , на третьем —  $V_3$ . Перепад давлений на первом участке, равный  $P_1$ , показан линией 1, на втором, равный  $P_2$  — линией 2, на третьем, равный  $P_3$  — линией 3. Если скорость на третьем участке не уменьшать — оставить равной на втором участке  $V_2$  ( $V_3 = V_2$ ), то перепад давлений (линия 5) увеличится до  $P_5$ . При скорости на третьем участке, равной  $V_4$ , перепад давления (линия 4) составляет  $P_4$ . На рис. 4.14, б показаны кривые изменения давления в сопле  $P_c$  (кривые 6), на входе в форму  $P_n$  (кривые 7) и в конце формы  $P_k$  (кривые 8а—8в) в период заполнения формы ( $0 - t_3$ ) и в период нарастания давления ( $t_3 - t_4$ ) в зависимости от скорости течения полимера на третьем участке формы: при скорости  $V_5$  — кривые 6а, 7а, 8а; при скорости  $V_4$  — кривые 6б, 7б, 8б; при скорости  $V_3$  — кривые 6в, 7в, 8в. Чем больше скорость течения на последнем участке формы при заполнении, тем больше подъем давления в конце формы в период нарастания давления. Для уменьшения этого подъема следует снижать скорость движения полимера на последнем участке.

На рис. 4.14, в показано распределение давления по длине формы к концу периода заполнения (кривые 10, 11) и в момент развития в системе максимальных усилий в период нарастания давления

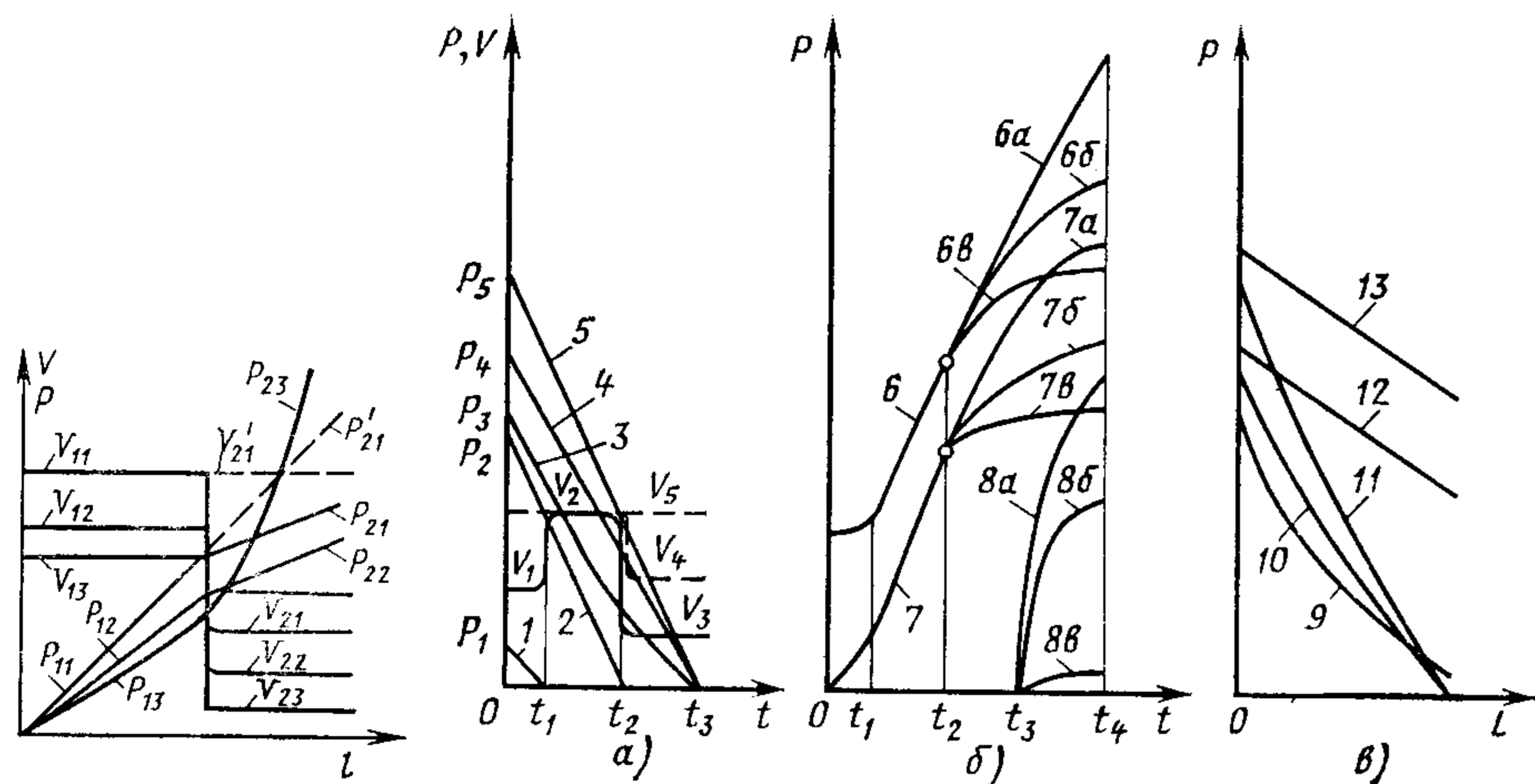


Рис. 4.13. Изменение скорости заполнения по длине формы и давления в режимах с уменьшением объемной скорости впрыска.

Рис. 4.14. Изменение скорости заполнения, давления и его распределения по длине формы в различных режимах со ступенчатым изменением объемной скорости впрыска

(кривые 9, 12, 13) при различных режимах скорости заполнения на последнем участке: при скорости  $V_3$  — кривая 9; при скорости  $V_4$  — кривые 10, 12; при скорости  $V_5$  — кривые 11, 13. Из рисунка видно, что для снижения давления формования можно применять режимы с регулированием скорости заполнения формы путем изменения объемной скорости впрыска. Но при этом нужно учитывать влияние изменения скорости заполнения на формирование структуры изделий.

Регулирование объемной скорости впрыска применяют при формовании изделий с разным поперечным сечением по длине. При заполнении с постоянной объемной скоростью впрыска формы с разным поперечным сечением по длине скорость перемещения фронта потока расплава изменяется, что приводит к формированию разной структуры полимера по длине изделия и в связи с этим к различию качественных показателей. Для получения изотропных свойств по длине изделий с разным поперечным сечением применяют режимы, в которых объемную скорость впрыска регулируют таким образом, что скорость перемещения фронта потока расплава остается постоянной.

Для регулирования объемной скорости впрыска применяют системы без обратной связи, локальные системы с обратной связью и адаптивные системы. При регулировании системами без обратной связи путь шнека при впрыске разбивают на участки (может быть 4—10 участков), на каждом из которых задают требуемую скорость. Как правило, системой управляют с помощью системы дросселей, регламентирующих подачу масла в поршневую полость гидроцилиндра впрыска. При переходе шнеком границ участков автомати-

чески включается предварительно настроенный дроссель или совокупность дросселей. Известные системы регулирования без обратной связи обеспечивают задание объемной скорости впрыска с дискретностью 3—10 % максимального значения.

Аналогично работают локальные системы регулирования объемной скорости впрыска с обратной связью. Однако они осуществляют объемное регулирование подачи масла и базируются на насосах с дистанционно регулируемой подачей или на системе дросселей с программным управлением. В этих системах в качестве датчиков обратной связи используют различные датчики перемещения шнека. Дифференцированный сигнал датчика поступает в блок сравнения, сравнивается с заданным значением объемной скорости впрыска и по сигналу рассогласования корректирует работу исполнительного механизма, т. е. подачу масла в поршневую полость гидроцилиндра впрыска.

Локальные системы с обратной связью могут быть основаны и на управлении системой дросселей. В систему управления входит вычислительное устройство, которое переключает дроссели так, что на каждом участке реализуется подача масла, компенсирующая отклонение действительной скорости от заданной. Достигается тот же эффект, что и применением насосов с регулируемой подачей. Локальные системы с обратной связью более точно регулируют скорость впрыска по задаваемой программе, чем системы без обратной связи.

Наряду с системами автоматического регулирования объемной скорости впрыска применяют системы контроля и информации о ее действительном значении, реализуемом при заполнении формы. На приборе задают требуемую объемную скорость впрыска и допустимые от нее отклонения. Прибор измеряет действительную объемную скорость впрыска, сравнивает ее с заданной и, если измеренная скорость входит в заданные пределы, с помощью контрольных лампочек сигнализирует о правильном режиме работы. В противном случае, если измеренная скорость не входит в заданные пределы, прибор останавливает машину и подает сигнал аварийного выключения для устранения причин, вызывающих изменение скорости.

Системы автоматического определения момента окончания заполнения формы и начала периода нарастания давления. Точное определение момента окончания заполнения формы имеет большое значение для правильной организации процесса литья. Так как при впрыске регулируют подачу масла в поршневую полость гидроцилиндра впрыска, а в период нарастания давления — давление, то определение момента окончания впрыска, т. е. момента полного заполнения расплавом полости формы, позволяет своевременно перейти с регулятора скорости на регулятор давления. Задержка с переходом приводит к развитию пикового давления в поршневой полости гидроцилиндра впрыска, которое вызывает чрезмерное уплотнение расплава в форме, приводящее к развитию больших внутренних напряжений в изделии.

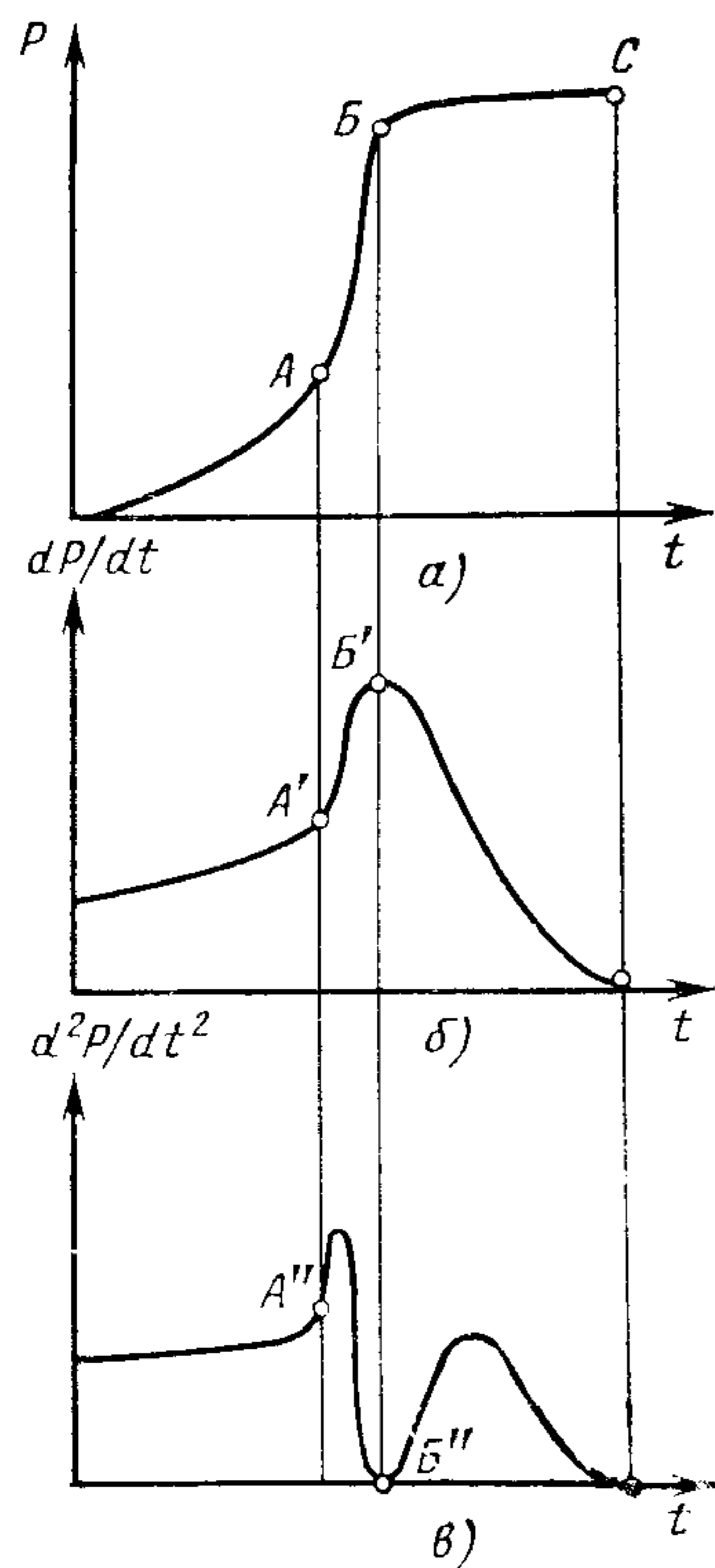
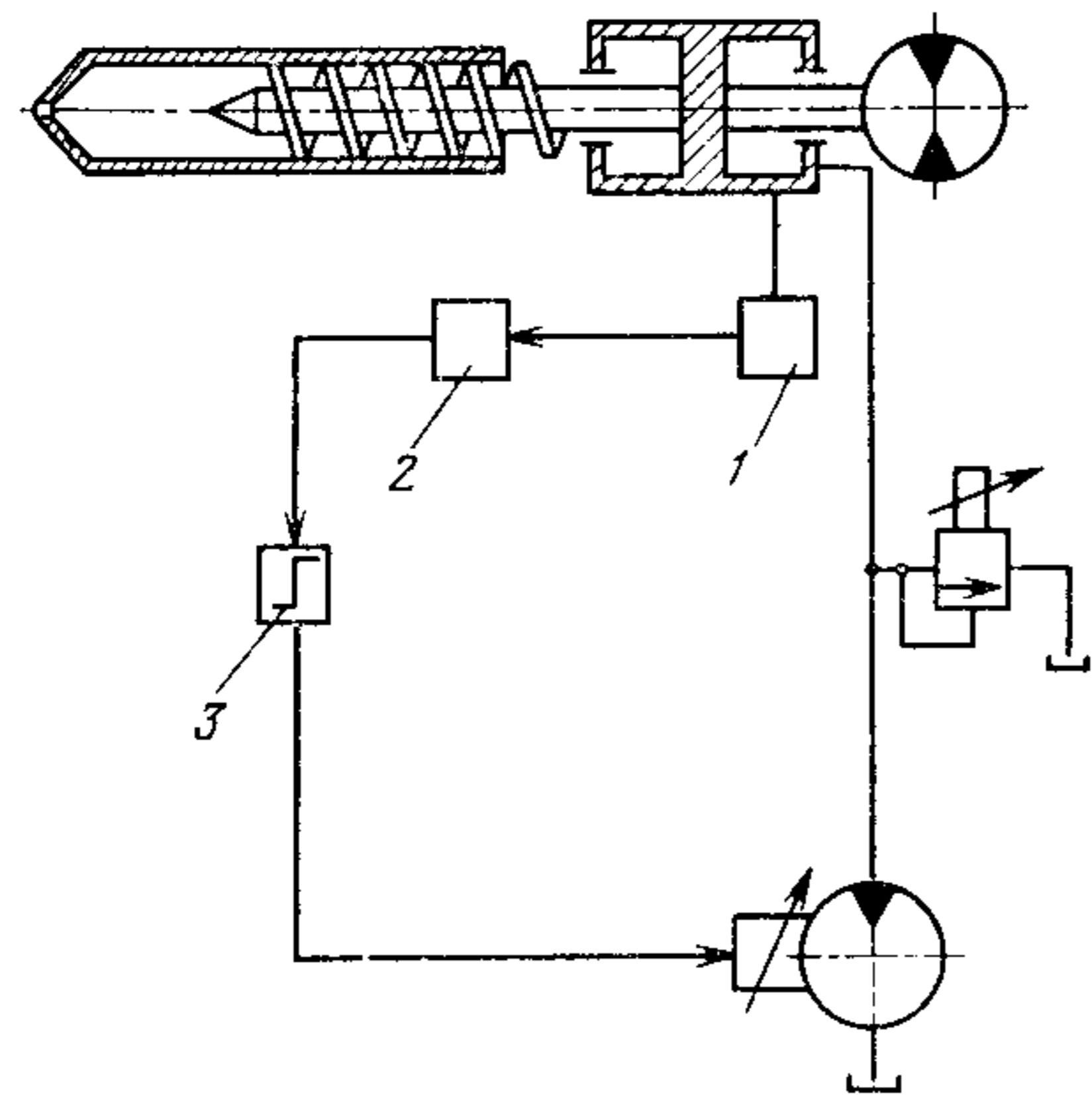


Рис. 4.15. Изменение давления  $P$  (а),  $dP/dt$  (б) и  $d^2P/dt^2$  (в) при формировании

Рис. 4.16. Схема системы автоматического определения моментов окончания впрыска и развития максимального давления



Момент окончания впрыска определяют по пути шнека, времени впрыска, по сигналу термопар, заделанных на поверхности формы, или по давлению расплава в наиболее удаленной точке формы, давлению масла в поршневой полости гидроцилиндра впрыска, скорости впрыска. Алгоритмы определения момента окончания впрыска по пути шнека и по времени впрыска наиболее простые. В этих случаях задается расчетная координата шнека или расчетное время впрыска, ориентировочно соответствующие полному заполнению формы расплавом. При достижении расчетного значения происходит переключение с регулятора скорости на регулятор давления. Такие системы не позволяют точно осуществлять переход в требуемый момент, так как действительные значения координаты шнека или времени, соответствующие окончанию впрыска, сложно задать, и они зависят от многих неуправляемых возмущающих воздействий.

Системы, использующие сигналы датчика давления расплава или температуры формы, позволяют более точно осуществлять переход с регулятора скорости на регулятор давления. Датчики устанавливают в наиболее удаленных от впуска точках формы и фиксируют действительный момент окончания впрыска. Использование этих систем сопряжено со значительными конструктивными трудностями — установкой датчиков в полости формы.

Хорошие результаты дает использование алгоритма определения истинного момента окончания впрыска и момента развития в системе

максимальных усилий по изменению давления при формировании (рис. 4.15, а). Сигнал датчика давления 1 (рис. 4.16) поступает на вход блока дифференцирования 2, на выходе которого генерируются сигналы, пропорциональные первой (рис. 4.15, б) и второй (рис. 4.15, в) производным функциям изменения давления во времени. В момент окончания впрыска (точка А на рис. 4.15) наклон касательной к кривой первой производной  $dP/dt$  резко изменяется (точка А') и вторая производная  $d^2P/dt^2$  резко увеличивает свое значение (точка А''). В момент (точка В), когда давление в форме достигает 90—95 % максимально развивающегося давления (точка С), первая производная имеет наибольшее значение (точка В'), а вторая производная нулевое (точка В''). Сигналы первой и второй производной поступают на вход прибора 3 (см. рис. 4.16), который фиксирует точки А', А'' и В', В'' (см. рис. 4.15). В моменты, соответствующие точкам А' и А'', подается команда на переход от регулирования скорости впрыска к регулированию давления. В момент, соответствующий точкам В' и В'', подается команда на различные режимы формирования со сбросом давления, регулирующие давление и перепады давлений в течение выдержки полимера в форме под внешним давлением. Такие системы конструктивно просты и надежны.

Системы одновременного регулирования объемной скорости впрыска и давления формирования. Системы (рис. 4.17) измеряют и регулируют перемещение шнека во времени (скорость), давление в форме и гидравлическое давление в цилиндре впрыска. Исполнительным механизмом для регулирования скорости движения шнека может служить система дросселей, которая управляет подачей масла пропорционально электрическому входному сигналу (рис. 4.18). Насос 6 через систему дросселей 1—5 подает масло в гидросистему. Комбинируя включение различных дросселей, можно обеспечить подачу масла от 33 до 93 л/мин с шагом 3 л/мин. Перемещение шнека измеряет линейный потенциометр 2 (см. рис. 4.17). Пьезоэлектрический датчик давления 1 измеряет давление в форме и подает электрический сигнал, пропорциональный измеренному значению. Гидравлическое давление измеряет датчик давления 3. Требуемый профиль (программу) изменения объемной скорости впрыска выставляют на приборе 4, который имеет сетку с 20-ю горизонтальными и 20-ю вертикальными линиями. На нем можно выставлять любой профиль. Поскольку прибор имеет 20 вертикальных

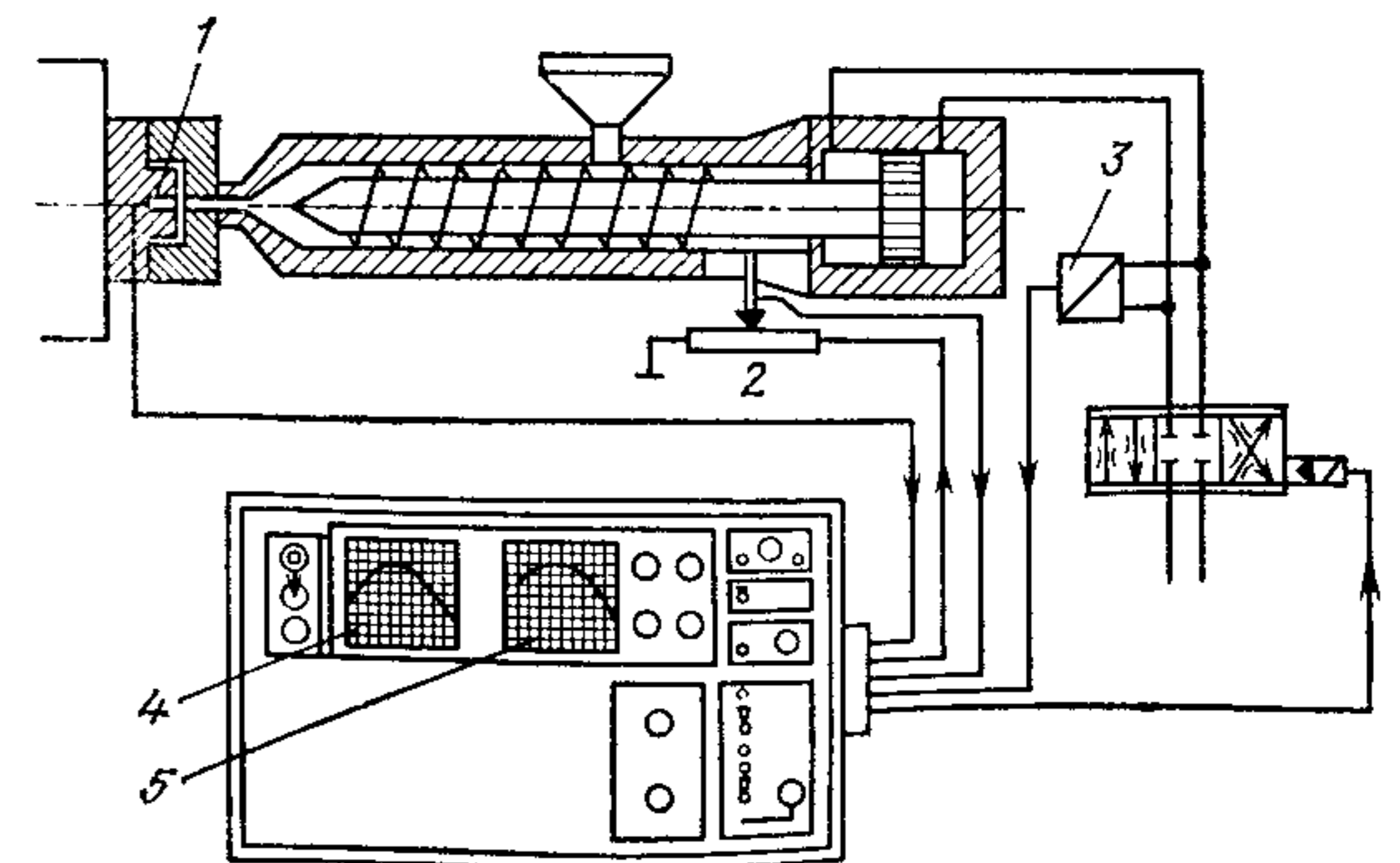


Рис. 4.17. Схема системы одновременного регулирования объемной скорости впрыска и давления формирования

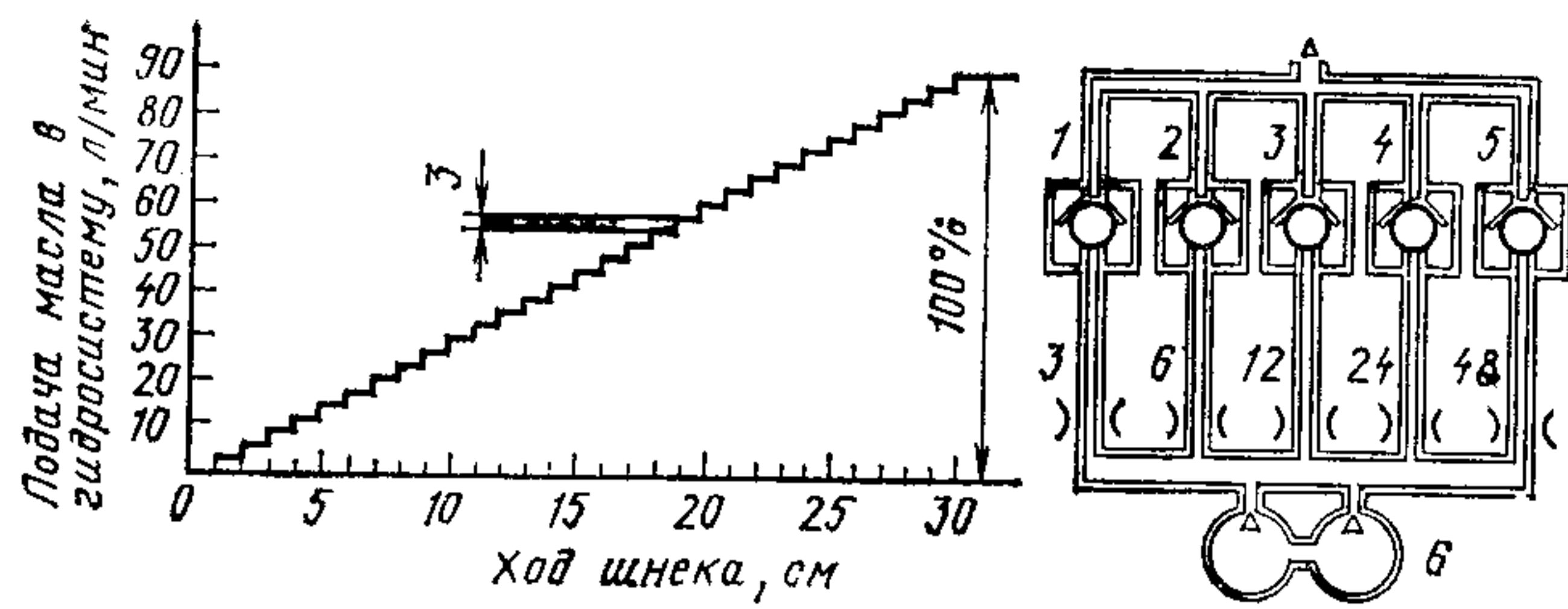


Рис. 4.18. Схема гидравлической системы регулирования подачи гидрожидкости в системе впрыска

линий ход шнека разбивается соответственно на 20 участков (возможно другое число участков) и на этих вертикальных линиях выставляют значение скорости на каждом участке. Светящиеся диоды показывают истинную скорость инъекции. Требуемый профиль (программу) изменения давления формования во времени выставляют на другом приборе 5, также имеющем сетку с 20-ю горизонтальными и с 20-ю вертикальными линиями. Если при формовании в некоторый момент измеряемое давление в форме превышает заданный профиль, то автоматически происходит переключение с регулирования процесса по скорости на регулирование процесса по давлению, и объемная скорость впрыска в течение последующего формования изменяется в соответствии с заданным профилем давления. В какой момент произошло переключение, можно определить по светящимся диодам. Такие следящие системы позволяют точно воспроизводить найденные параметры изменения объемной скорости впрыска и давления формования, при которых изделия получают требуемого качества.

Системы автоматического регулирования продолжительности отдельных операций цикла литья. В системах управления циклом работы большинства моделей литьевых машин продолжительность операций формования и охлаждения задается эмпирически настройкой соответствующих регуляторов. При этом задаваемая продолжительность отдельных операций не учитывает истинного характера протекания процесса. Как правило, оператор задает продолжительности операций формования и охлаждения, превышающие требуемые, тем самым снижая производительность литьевой машины.

Известны устройства для регулирования продолжительности формования и охлаждения, основанные на контроле зазора между полуформами. Этот зазор, образующийся при впрыске расплава в форму и при нарастании в ней давления, уменьшается в результате усадки полимера при охлаждении. Операция охлаждения прекращается в момент соприкосновения полуформ, когда зазор становится равным нулю или когда перестает изменяться.

Известны системы автоматического регулирования продолжительности охлаждения, основанные на контроле температуры полимера в полости формы. Датчик температуры, установленный в полости формы, при достижении заданного оператором значения температуры полимера выдает команду на окончание операции охлаждения и на раскрытие формы и съем изделия. Реализация такого

способа регулирования продолжительности охлаждения сопряжена с конструктивной трудностью — установкой датчика температуры, контактирующего с полимером в полости формы.

Системы контроля и регулирования механизма замыкания формы. При работе литьевой машины усилие запирания формы может изменяться вследствие тепловых воздействий, изнашивания формы и разрегулирования отдельных механизмов. Это устраняется специальными системами контроля, сигнализации и управления. На колонны машины помещают датчики, измеряющие действительную деформацию, которая пропорциональна развивающемуся усилию запирания. Перед началом работы на электронном устройстве контроля задают требуемое усилие запирания формы и допустимые от него отклонения. В каждом цикле литья измеряемое усилие запирания сравнивается с заданным и, если измеренное значение не входит в заданные пределы, система дает команду на останов машины. При соответствующей доукомплектации исполнительными механизмами возможна автоматическая корректировка усилия запирания и затяжка каждой колонны.

#### 4.3. САМОНАСТРАИВАЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Самонастраивающиеся автоматизированные системы управления обеспечивают работу литьевой машины с автоматической подстройкой процесса по заданному критерию качества. Такие системы способствуют созданию высокой производительности процесса литья и получению изделий требуемого качества в зависимости от условий их эксплуатации в сочетании со стабильностью свойств.

Качество изделий оценивают по их массе и размеру, внутренним напряжениям, степени анизотропии свойств в различных направлениях, физико-механическим показателям (предел текучести и разрушающее напряжение при растяжении, ударная вязкость, относительное удлинение при разрыве), стабильности формы, стойкости к растрескиванию, теплостойкости, морозостойкости, технологической усадке. Однако при автоматическом управлении можно использовать только неразрушающие методы оценки качества изделий и приборы, позволяющие непрерывно дистанционно оценивать качество изделий этими методами, и которые можно встраивать в схему управления машины. Наиболее доступные средства усредненной оценки качества изделий — измерение их массы и размера (не разрушающие методы). Масса и размер изделий в каждом конкретном случае можно сопоставить с их физико-механическими показателями, внутренними напряжениями, показателями стабильности их свойств.

Для разработки алгоритма управления процессом нужны функциональные зависимости между выбранным для оценки показателем качества изделий и параметрами процесса литья и между выбран-

ным для оценки показателем качества и теми показателями качества, которые определяют поведение изделий при эксплуатации. Такие зависимости можно подразделить на статистические модели (получают эмпирически на основе статистических данных) и аналитические модели (отражают физико-химические процессы формирования структуры изделий и ее связи с показателями качества). Статистические или аналитические модели закладываются в ЭВМ, управляющую процессом при изменении показателя качества изделий, по которому ведется управление. При этом возможны два варианта управления: компенсацией одного параметра и компенсацией нескольких параметров. Последнее предполагает последовательное изменение параметров по заданному алгоритму; пропорциональное одновременное изменение параметров по заданному алгоритму; совместное (последовательное и пропорциональное) регулирование параметров по заданному алгоритму.

**Статистические модели.** Это формальные количественные зависимости между отдельными показателями качества изделий и между показателями качества изделий и параметрами процесса литья.

Корреляционные зависимости, устанавливающие связь между выходным параметром  $y$  — показателем, по которому оценивают качество изделий при управлении (например, массой, толщиной), и показателями качества изделий  $x_k$ , которые определяют их поведение при эксплуатации, получают на основе экспериментальных данных построением парного уравнения регрессии вида

$$y = a_y + \sum_{k=1}^n b_k x_k^{c_k}, \quad (4.1)$$

где  $a_y$ ,  $b_k$  и  $c_k$  — константы.

При расчете коэффициента корреляции и корреляционных зависимостей (4.1) предполагают, что они достоверны при нормальном распределении параметров. Теоретическую линию регрессии (4.1) можно описывать уравнением первого порядка (см. табл. 4.1). В этом случае многочлен (4.1) превращается в двучлен:

$$y = a_y + b_k x_k.$$

Коэффициент корреляции  $r$  определяют из соотношения:

$$r = \left( \sum_{i=1}^n x_{k_i} y_i - \bar{x}_k \bar{y} \right) / (n \sigma_{x_k} \sigma_y),$$

где  $x_{k_i}$  и  $y_i$  — текущие значения параметров  $x_k$  и  $y$ ;  $\bar{x}_k$  и  $\bar{y}$  — средние значения параметров  $x_k$  и  $y$ ;  $\sigma_{x_k}$  и  $\sigma_y$  — дисперсии параметров  $x_k$  и  $y$ .

$$\bar{x}_k = \sum_{i=1}^n x_{k_i} / n; \quad \bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n;$$

$$\sigma_{x_k}^2 = \left( \sum_{i=1}^n x_{k_i}^2 - \bar{x}_k^2 \right) / n; \quad \sigma_y^2 = \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 - \bar{y}^2 \right) / n.$$

Зависимости между выходным параметром — массой (толщина) — изделий и их физико-механическими показателями характеризуются

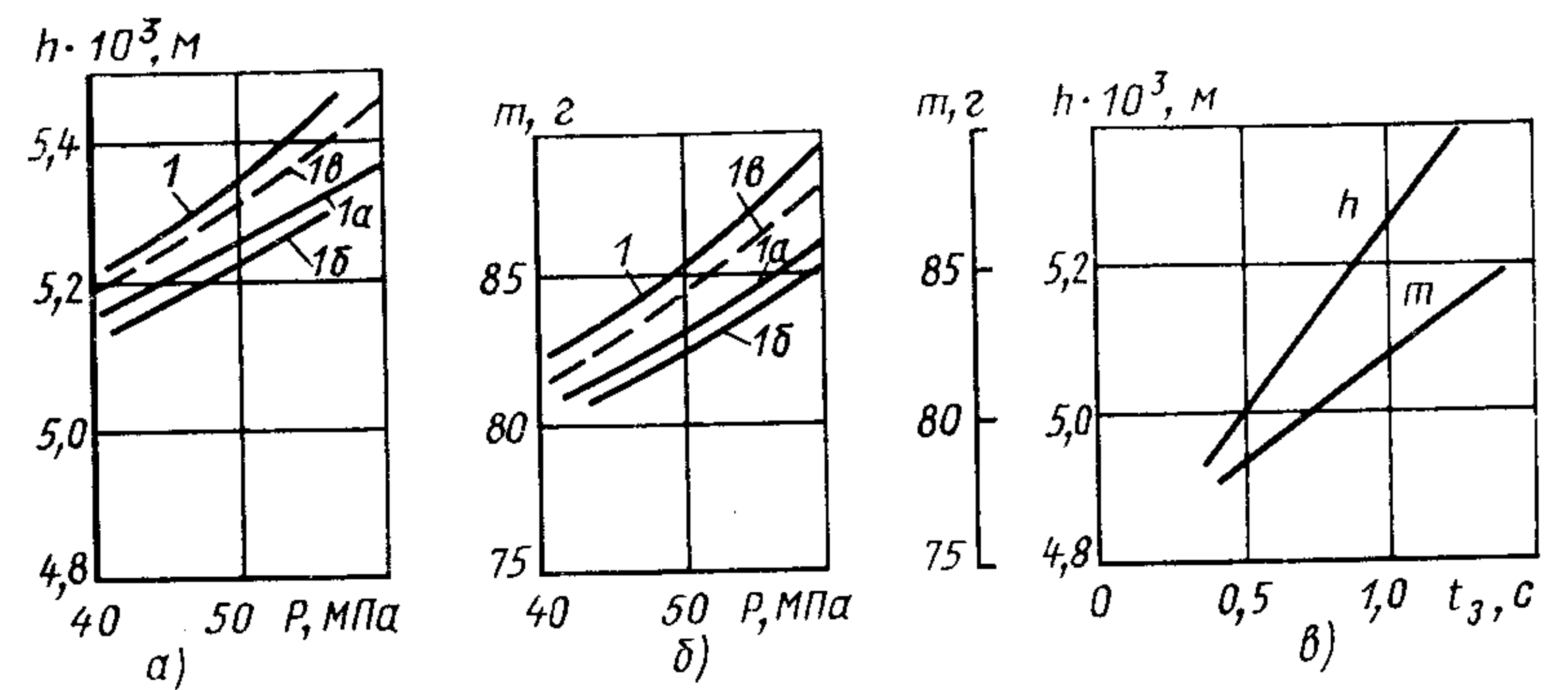


Рис. 4.19. Зависимости толщины (а и в) и массы  $m$  (б и в) изделий от параметров литья для полистирола:

1 и 1б — температура полимера  $T_0 = 250^\circ\text{C}$ ; продолжительность выдержки под давлением  $t_{\text{впд}} = 20$  и 5 с; 1а и 1в —  $t_{\text{впд}} = 20$  с,  $T_0 = 200^\circ\text{C}$  и  $220^\circ\text{C}$ ;  $t_3$  — продолжительность заполнения формы

положительной связью и линейны в интервале возможных режимов переработки. Для большинства промышленных полимеров (полистирола, полиэтилена, полиамидов, сополимеров формальдегида и др.) корреляционные зависимости подобны и их можно принять за основу при оценке качества продукции по массе (толщине) изделий.

Выходной параметр — показатель качества (например, масса, размеры изделий) — зависит от основных технологических параметров литья: давления, температуры полимера, скорости впрыска (продолжительности заполнения формы), продолжительности выдержки полимера под давлением (рис. 4.19). Регрессионный анализ позволяет выявить возможность и эффективность управления процессом литья регулированием параметров для получения заданного показателя качества изделий. С помощью регрессионных уравнений по известным методике и формулам устанавливают связь между выходным параметром — показателем качества  $y$  (например, масса, толщина изделий) и основными параметрами литья  $x_1, x_2, \dots, x_k$ :

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_k x_k.$$

Для нахождения коэффициентов этого уравнения решают систему уравнений. При составлении регрессионных уравнений для различных изделий необходимо учитывать, что температура по-разному влияет на показатели их качества в зависимости от отношения диаметра  $d$  (толщины  $h$ ) литника к толщине изделия  $\delta_{\text{и}}$  (рис. 4.20). При литье с точечным литником форма после заполнения практически сразу отключается от внешнего давления, и зависимость массы изделий от давления литья  $P_{\text{л}}$  и температуры полимера  $T$  имеет вид:  $m = f_1(P_{\text{л}}/T)$ . Это следует из уравнения состояния:

$$(P + \pi) [(v/m) - \omega] = R^1 T,$$

где  $v$  — объем формы.



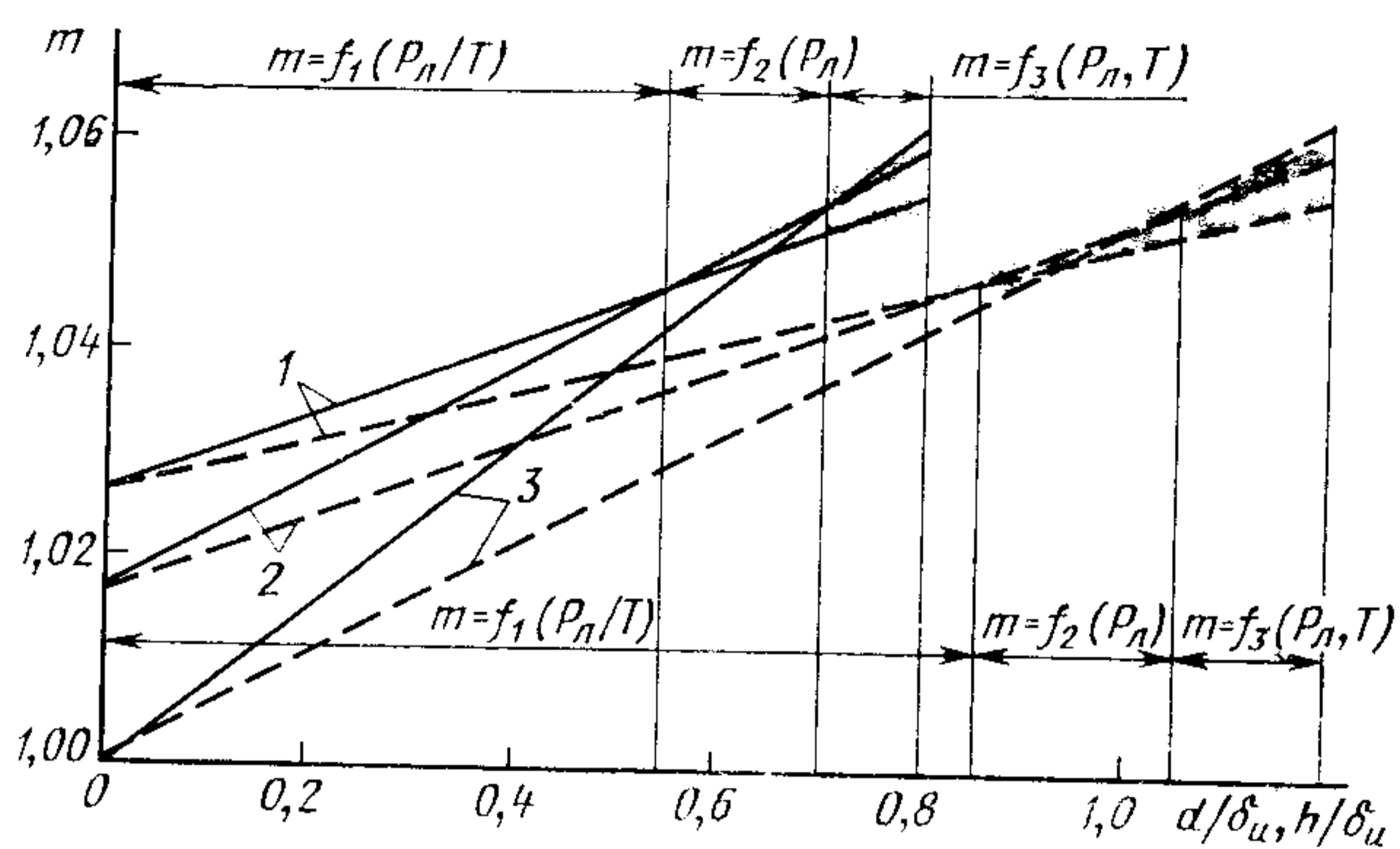


Рис. 4.20. Зависимость массы изделий в относительных единицах от отношения толщины литника к толщине изделия  $h/\delta_{\text{л}}$  (—) или диаметра литника к толщине изделия  $d/\delta_{\text{л}}$  (---) при разных температурах: 1 —  $T_1$ ; 2 —  $T_2$ ; 3 —  $T_3$  ( $T_1 < T_2 < T_3$ )

Наоборот, если литник большого диаметра ( $h/\delta_{\text{л}} > 0,7$ ), то давление в форме  $P_{\text{ф}}$  поддерживается практически постоянным до застывания материала. В этом случае  $m = f_3(P_{\text{ф}})$ . Давление в форме  $P_{\text{ф}}$ , в свою очередь, зависит от температуры: чем она выше, тем меньше потери давления  $\Delta P$  от гидроцилиндра в форму и тем большее давление передается в форму. Поэтому функция имеет вид  $m = f_3(P_{\text{л}} - \Delta P)$  или  $m = f_3(P_{\text{л}}, T)$ . При промежуточных значениях  $h/\delta_{\text{л}}$  температура практически не влияет на массу изделий и функция имеет вид  $m = f_2(P_{\text{л}})$ . Таким образом, знак при температуре в уравнении регрессии может быть разный в зависимости от отношения диаметра (толщины) литника к толщине изделия.

**Аналитические модели.** Эти модели описывают физико-химические процессы формирования структуры изделий при литье и ее связь с показателями качества изделий, а также изменение параметров формования при литье на основе системы уравнений теплопередачи и гидродинамики (см. п. 1.2.5).

При формовании изделия литьем под давлением в изделиях возникает ориентация — преимущественное направление в расположении участков макромолекул или кристаллитов, что обусловлено способностью полимеров к развитию высокоэластической деформации, связанной с деформацией участков макромолекул под действием напряжений сдвига при течении в процессе формования. При течении под действием внешнего давления наряду с необратимой деформацией вязкого течения развивается и накапливается высокоэластическая, которая в отличие от необратимой релаксирует (уменьшается) после прекращения деформирования. Накапливаемая при заполнении формы высокоэластическая деформация зависит от условий деформирования (скорости или напряжения сдвига, температуры, давления, реализуемых при формовании) и от модуля высокоэластичности полимера, который определяется его природой, молекулярной массой и молекулярно-массовым распределением (степенью полидисперсности).

По окончании заполнения формы высокоэластическая деформация релаксирует. Релаксация происходит не мгновенно, а в течение определенного времени. Быстрое охлаждение расплава в форме

уменьшает скорость релаксации (увеличивается время релаксации вследствие снижения температуры). Ниже температуры стеклования релаксационные процессы протекают очень медленно, поэтому релаксация высокоэластической деформации в литьевой форме ограничена продолжительностью охлаждения полимера до температуры стеклования. Ограничение продолжительности и снижение скорости релаксационного процесса приводят к тому, что находящиеся в деформированном состоянии молекулы полимера не успевают отрелаксировать (перейти в равновесную форму) и оказываются зафиксированными в неравновесных состояниях. В аморфных полимерах эта неравновесность проявляется в преимущественном направлении цепей макромолекул в направлении течения, а в кристаллизующихся — в направленном расположении осей кристаллографических ячеек. Остаточная ориентация зависит от ориентации, возникающей при течении, а также от релаксационных свойств полимера и скорости охлаждения его в форме (определяется тепловым режимом литья и теплофизическими свойствами полимера).

Ориентация образуется в период заполнения формы и в последующие периоды формования полимера. Течение полимера при подпитке вызывает ориентацию полимера во внутренних слоях изделия. Ориентация внутренних слоев отливок существенно возрастает при заполнении формы в двух режимах: вначале с постоянной, а затем с убывающей скоростью течения. Ориентация в центре литьевых изделий может возникнуть в период охлаждения в результате вытекания полимера из формы при малой продолжительности подпитки.

Ориентация структуры в поперечном сечении литьевого изделия распределяется неравномерно (рис. 4.21, а). Наибольшая ориентация фиксируется в поверхностном слое. Уменьшаясь от поверхности к центру, ориентация в поверхностном слое проходит через максимум. В центральных слоях полимер практически изотропен, что связано с низкими напряжениями сдвига, реализуемыми при за-

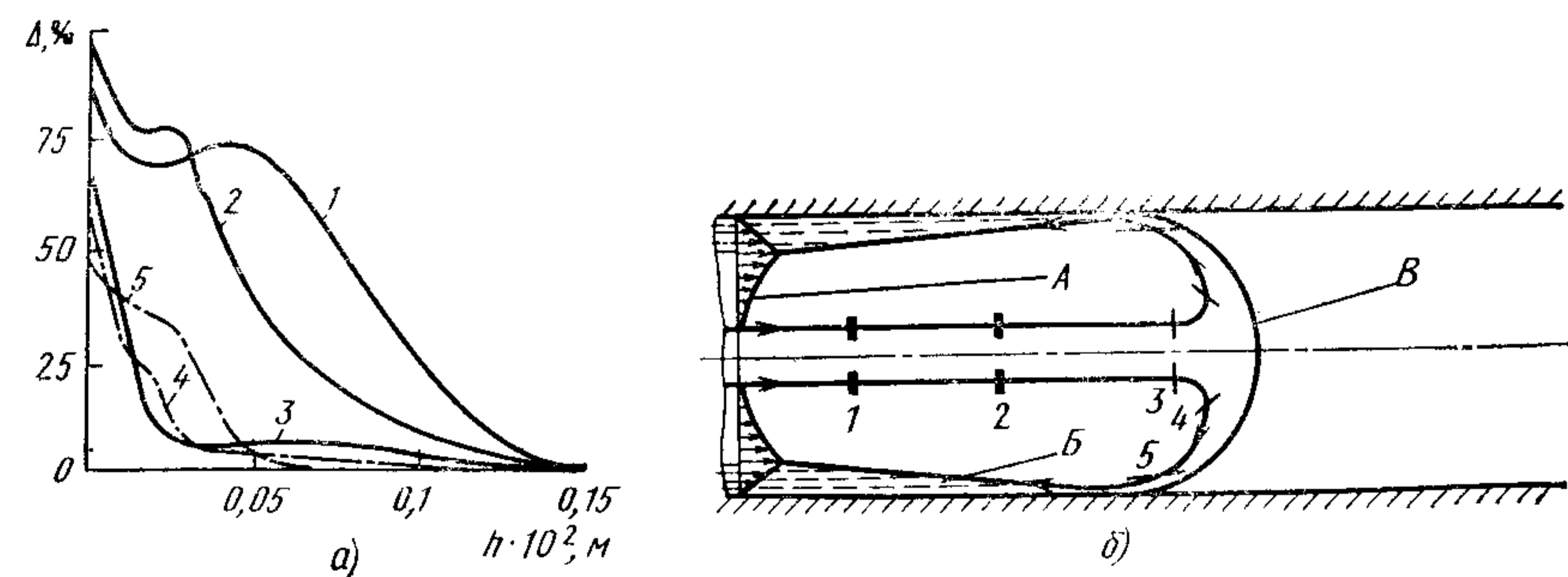


Рис. 4.21. Распределение ориентации и напряжения сдвига:

а — распределение ориентации в поперечном сечении литьевых изделий из полистирола ПС и поликарбоната ПК: 1, 2 — вдоль потока расплава ПС при линейной скорости течения  $V$ , равной  $3,5 \cdot 10^{-2}$  и  $18 \cdot 10^{-2}$  м/с; 3 — перпендикулярно к потоку расплава ПС; 4, 5 — вдоль потока расплава ПК при  $V$ , равной  $3,5 \cdot 10^{-2}$  и  $15 \cdot 10^{-2}$  м/с; б — распределение напряжения сдвига и схема движения полимера в литьевой форме: 1—5 — последовательное изменение формы частиц расплава; А — профиль напряжений сдвига; В — замерзший слой; В — продвигающийся фронт

полнении формы в этих слоях (рис. 4.21, б), и с более полным протеканием в них релаксационных процессов вследствие медленного охлаждения расплава. Перпендикулярно к направлению течения ориентация изделий при одноосном заполнении формы также имеет максимальное значение у поверхности и резко снижается к центру.

Сложный профиль распределения ориентации обусловлен не только различием в процессах, протекающих в разные периоды формирования, и изменением напряжения сдвига по высоте поперечного сечения канала при сдвиговом течении, но и продольным растяжением поверхностного слоя на границе фронта потока расплава (см. рис. 4.21, б). На фронте потока направление деформирования слоев полимера изменяется, они растягиваются и отбрасываются к стенкам формы, где ориентация фиксируется охлаждением. Аксиально-плоскостная ориентация поверхностного слоя возникает вследствие растяжения полимера на границе фронта потока, а аксиальная ориентация внутренних слоев — за счет сдвигового течения. Экстремальное значение ориентации полимера во внутренних слоях изделия можно объяснить максимумом скорости (напряжения) сдвига на границе затвердевшей оболочки и расплава.

Ориентация по длине изделия также распределяется неравномерно. Вблизи литника в направлении течения она резко уменьшается, что связано с радиальным расширением расплава на входе в форму и с уплотнением при подпитке. Далее наблюдается некоторое снижение ориентации по длине всего изделия, что вызвано уменьшением давления.

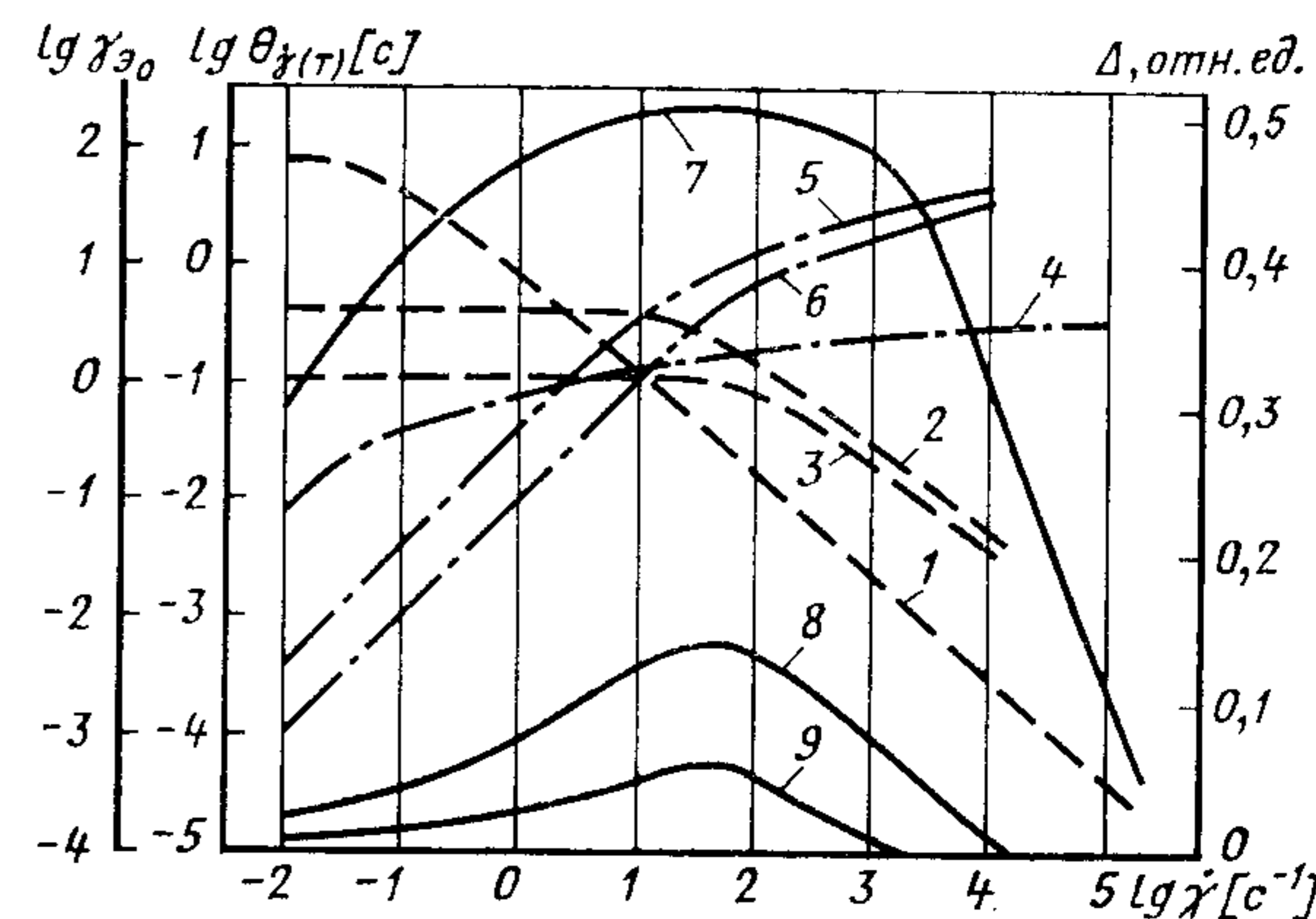
В случае двумерного течения, например, при заполнении диска через центрально расположенный литник течение более сложное. Характер распределения ориентации в поперечном сечении образца, вырезанного в направлении, перпендикулярном к течению, отличается от продольной ориентации. В параллельном течении направлении характер распределения ориентации в целом тот же, что и при одномерном течении. Относительная величина ориентации в поверхностном слое несколько меньше, чем в прилегающих к нему слоях, движущихся при заполнении формы по охлажденной оболочке. Это определяется меньшими скоростями деформации на фронте потока вследствие большой поверхности и постоянно уменьшающейся линейной скорости течения полимера.

В перпендикулярном направлении по отношению к направлению течения эпюра распределения поперечной ориентации отличается. Главное отличие — более высокие ориентации на поверхности. Это связано с тем, что расширение поверхности течения на фронте потока происходит в радиальном направлении перпендикулярно к направлению течения. Эти ориентации фиксируются в оболочке.

По радиусу ориентация полимера (продольная) так же непостоянна. Ее величина и характер распределения определяются режимом течения. Продольная ориентация уменьшается в области литника. Далее она несколько снижается по радиусу детали.

Средняя ориентация, возникающая при формировании полимеров, зависит от технологических параметров литья, свойств полимера

Рис. 4.22. Зависимость от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  времени релаксации  $\theta_{\dot{\gamma}}(T)$  (1—3), высокоэластической деформации  $\gamma_{\infty 0}$  (4—6) при  $T_0 = 190^\circ\text{C}$  (1, 4),  $250^\circ\text{C}$  (2, 5)  $280^\circ\text{C}$  (3, 6) и ориентации  $\Delta$  образцов из полистирола (7) и поликарбоната (8, 9), полученных при  $T_0 = 190^\circ\text{C}$  (7),  $250^\circ\text{C}$  (8),  $280^\circ\text{C}$  (9) и  $T_{\text{ф}} = 20^\circ\text{C}$  (7),  $70^\circ\text{C}$  (8),  $110^\circ\text{C}$  (9)



(высокоэластических, релаксационных, теплофизических) и размеров формы. Среднюю ориентацию  $\Delta$  аморфных полимеров, образующихся при формировании, можно рассчитать по уравнению

$$\Delta = \alpha_0 \alpha_{1(P)} (\Pi/S_{\text{из}})^{0,8} \gamma_{\infty 0}^{\alpha_2} \exp \left\{ - \left[ \alpha_3 \alpha_4 h^2 \lg \left( \frac{8}{\pi^2} \frac{T_0 - T_{\text{ф}}}{T_c - T_{\text{ф}}} \right) / (a \theta_{\dot{\gamma}}(T)) \right]^k \right\}, \quad (4.2)$$

где  $\alpha_0$  — размерный коэффициент  $(10^{-3} \text{ м})^{0,8}$ ;  $\alpha_{1(P)} = \alpha_5 + \alpha_6 P_{\text{л}}$  — коэффициент, зависящий от давления литья  $P_{\text{л}}$  (в МПа);  $\Pi$  и  $S_{\text{из}}$  — периметр и площадь поперечного сечения изделия;  $\gamma_{\infty 0} = \theta_{\dot{\gamma}}(T) \dot{\gamma}_{\text{эф}}$  — величина, принятая в качестве условной меры накапливаемой при заполнении формы высокоэластической деформации;  $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_5, \alpha_6$ , коэффициенты температуропроводности полимеров  $a$  и температуры стеклования  $T_c$  приведены в работе [9];  $\alpha_4 = \alpha_7 B/h$  — коэффициент, учитывающий двумерность температурного поля ( $\alpha_7 = 0,52$ ;  $B$  — ширина изделия);  $\theta_{\dot{\gamma}}(T)$  — характерное время релаксации при эффективной скорости сдвига заполнения полимером формы  $\dot{\gamma}_{\text{эф}}$  (расчет см. в работе [9]) и начальной температуры полимера  $T_0$  (расчет  $\theta_{\dot{\gamma}}(T)$  в зависимости от  $\dot{\gamma}_{\text{эф}}$  и  $T_0$  приведен в работе [9]).

В ньютоновской области, соответствующей низким скоростям сдвига  $\dot{\gamma}$ , повышение  $\dot{\gamma}$  не вызывает снижения времени релаксации  $\theta_{\dot{\gamma}}(T)$ , а накапливаемая при заполнении формы высокоэластическая деформация  $\gamma_{\infty 0}$  возрастает пропорционально  $\dot{\gamma}$  (рис. 4.22). В результате средняя ориентация  $\Delta$ , образующаяся при формировании, увеличивается. В переходной области от ньютоновского течения к области развитой аномалии вязкости повышение скорости сдвига вызывает снижение времени релаксации, а возрастание высокоэластической деформации  $\gamma_{\infty 0}$  ослабевает. Снижение времени релаксации начинает нивелировать возрастание высокоэластической деформации, в результате чего зависимость остаточной ориентации  $\Delta$ , образующейся при формировании, от скорости сдвига проходит через максимум. В области развитой аномалии вязкости, соответствующей средним и высоким скоростям сдвига  $\dot{\gamma}$ , повышение  $\dot{\gamma}$  вызывает все более резкое снижение времени релаксации, а возрастание высокоэластической деформации еще больше ослабевает. Снижение времени релаксации становится преобладающим фактором, и остаточная средняя ориентация  $\Delta$ , образующаяся при формировании, уменьшается

с повышением скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ . В технологической практике литья обычно реализуются скорости сдвига формирования  $\dot{\gamma}$ , соответствующие спадающей ветви зависимости средней ориентации  $\Delta$  от  $\dot{\gamma}$  (см. рис. 4.22). Поэтому повышение скорости заполнения формы (снижение времени заполнения  $t_3$ ) вызывает снижение средней ориентации литьевых изделий  $\Delta$  (рис. 4.23, а).

Повышение начальной температуры полимера  $T_0$  уменьшает время релаксации  $\theta_{\dot{\gamma}(T)}$  и понижает высокоэластическую деформацию  $\gamma_{\infty_0}$ , накапливаемую при заполнении формы. Повышение  $T_0$  увеличивает также разность между  $T_0$  и температурой стеклования  $T_c$ , т. е. возможную продолжительность протекания релаксации, накапливаемой при заполнении формы высокоэластической деформации (ориентации)  $\gamma_{\infty_0}$ . Все это приводит к тому, что с повышением начальной температуры полимера  $T_0$  уменьшается средняя ориентация  $\Delta$ , образующаяся при формировании (см. рис. 4.22, 4.23, б).

Повышение давления литья  $P_{л}$  уменьшает сегментальную подвижность макромолекул полимера, в результате чего время релаксации, накапливаемой при заполнении формы высокоэластической деформации, увеличивается, а скорость релаксации снижается. Повышение давления литья увеличивает также продолжительность подпитки и сохранения перепада давлений по длине формы, что приводит к увеличению деформации сдвига при охлаждении. Все это способствует тому, что с повышением давления литья, увеличивается средняя ориентация  $\Delta$ , образующаяся при формировании (рис. 4.23, в).

Повышение температуры формы  $T_{\phi}$  снижает скорость охлаждения полимера в форме вследствие уменьшения интенсивности теплообмена, обусловленного уменьшением разности между начальной температурой полимера  $T_0$  и температурой формы  $T_{\phi}$ . Чем меньше скорость охлаждения, тем полнее протекает релаксация накапливаемой при заполнении формы высокоэластической деформации  $\gamma_{\infty_0}$ . Поэтому с повышением температуры формы  $T_{\phi}$  средняя ориентация, образующаяся при формировании, уменьшается (см. рис. 4.23, г).

Время выдержки под давлением  $t_{впд}$  увеличивает продолжительность приложения давления. Увеличение  $t_{впд}$  в течение периода, когда в форму поступают новые порции полимера, т. е. до охлаждения литника, приводит к возрастанию остаточной ориентации  $\Delta$ , образующейся при формировании (рис. 4.23, д). Дальнейшее увеличение  $t_{впд}$  не оказывает влияния на остаточную ориентацию  $\Delta$ .

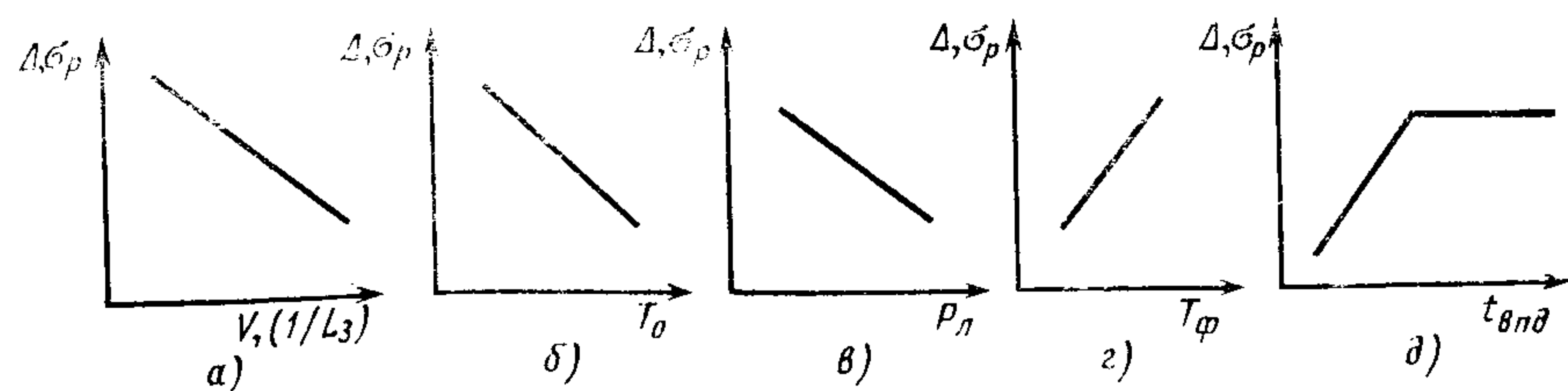


Рис. 4.23. Зависимость ориентации и разрушающего напряжения при растяжении от параметров литья

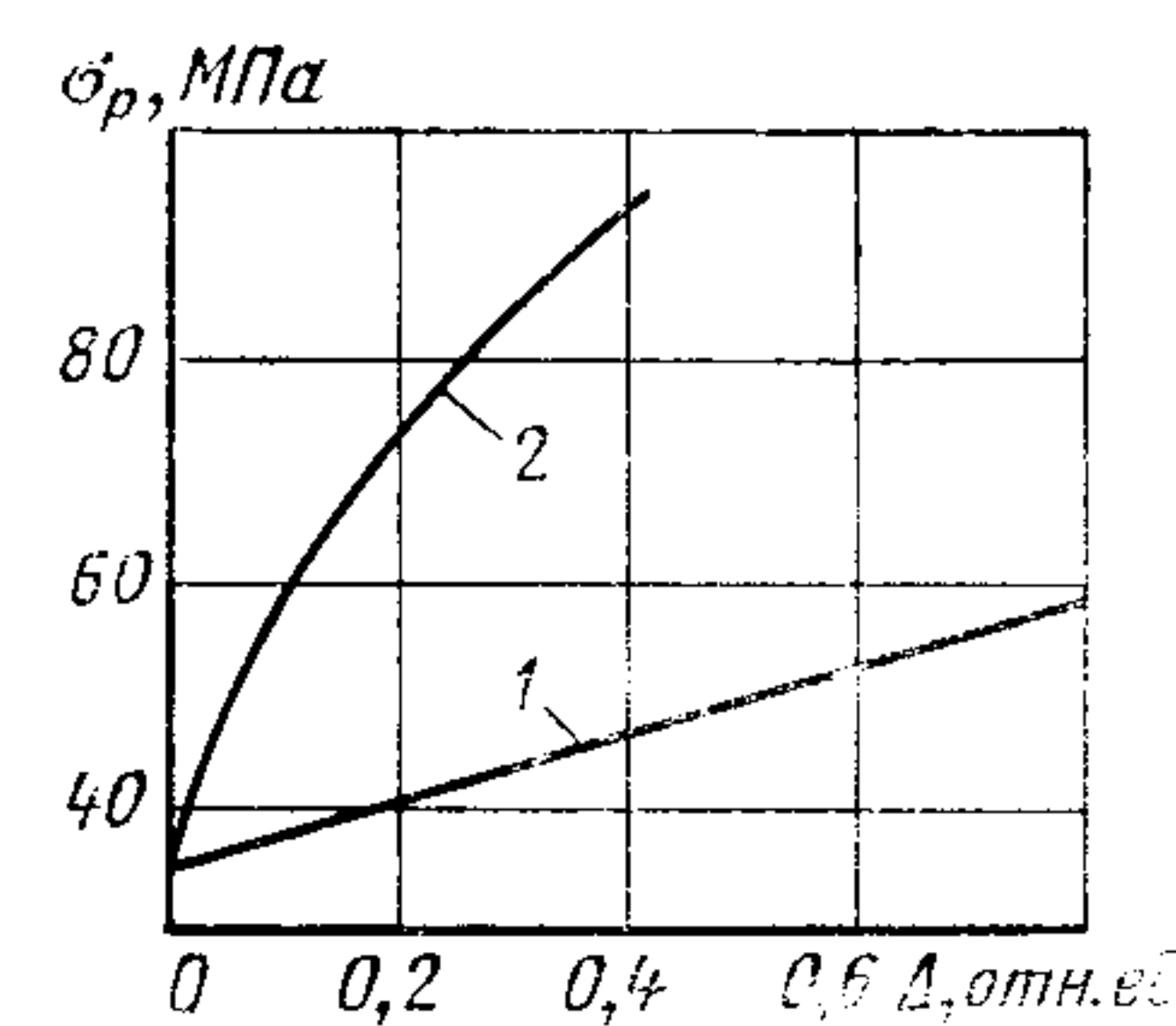


Рис. 4.24. Зависимость разрушающего напряжения литьевых изделий из полистирола 1 и поликарбоната 2 от средней ориентации

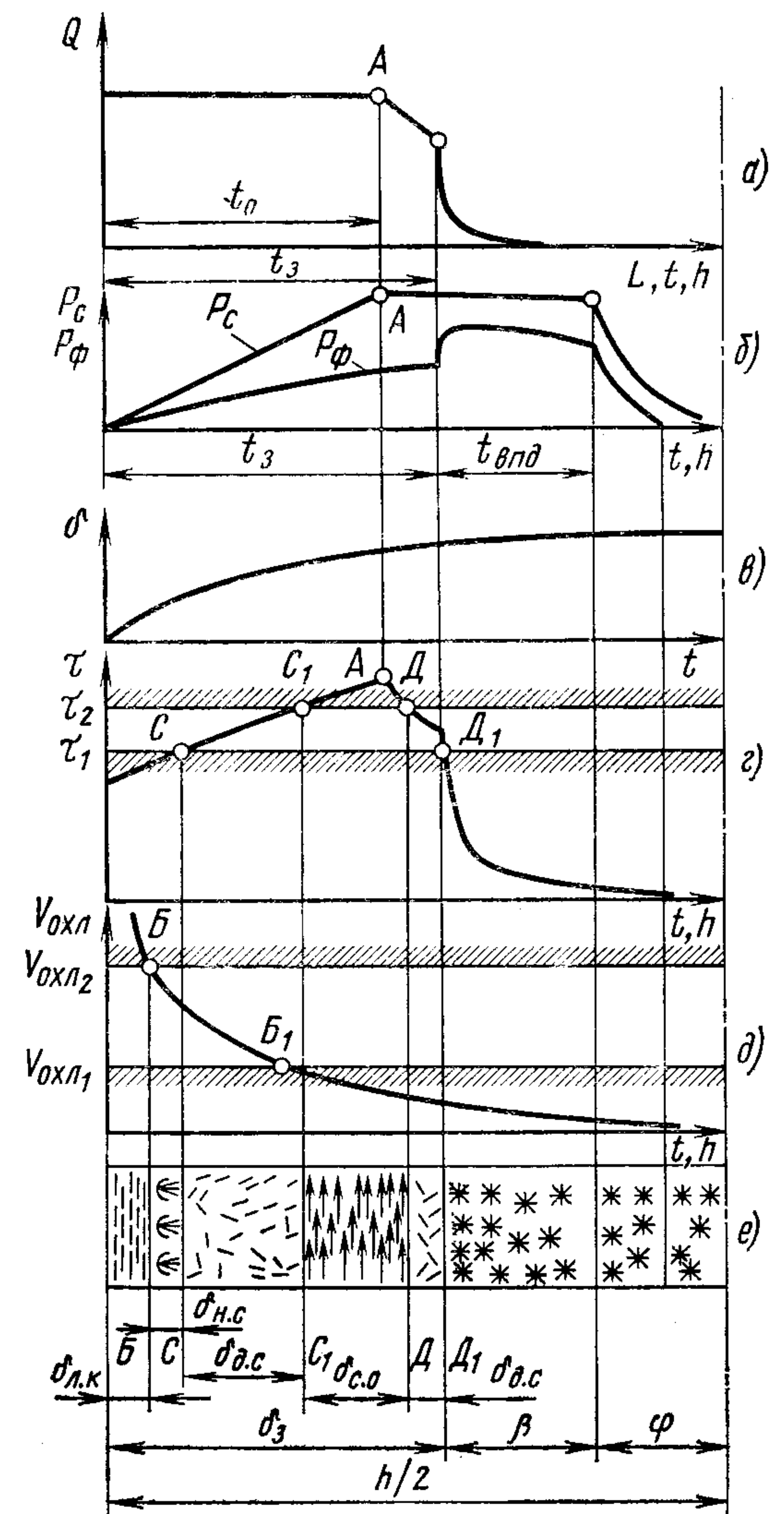


Рис. 4.25. Образование структуры полимеров при формировании с высокими напряжениями сдвига при заполнении формы

Средняя ориентация литьевых изделий из аморфных полимеров, которую можно оценить по тепловой усадке, определяет многие эксплуатационные показатели — механические, теплостойкость, стабильность размеров и др. Упорядочение структуры полимера при ориентации приводит к повышению его прочности в направлении течения. Поэтому разрушающее напряжение при растяжении  $\sigma_p$  в направлении ориентации повышается с увеличением средней ориентации полимера, возникающей при формировании (рис. 4.24).

С уменьшением объемной скорости заполнения формы  $Q$ , с понижением температуры полимера  $T_0$  и формы  $T_{\phi}$ , с увеличением давления литья  $P_{л}$  и времени выдержки под давлением  $t_{впд}$  средняя ориентация литьевых изделий  $\Delta$  увеличивается, что вызывает воз-

растание разрушающего напряжения при растяжении  $\sigma_p$  (см. рис. 4.23). Но, если прочность сопоставить со средней ориентацией, то независимо от того, при каких режимах формования (по скорости заполнения формы  $Q$ , температуре полимера  $T_0$  и формы  $T_\phi$ , давлению литья  $P_d$  и времени выдержки под давлением  $t_{впл}$ ) достигается ориентация  $\Delta$ , разрушающее напряжение при растяжении однозначно определяется ею (см. рис. 4.24).

Наряду с упрочнением полимера в направлении преимущественного расположения участков макромолекул ориентация приводит к ослаблению полимера в перпендикулярном направлении. Ориентация приводит также к образованию внутренних напряжений, что неблагоприятно сказывается на поведении изделий при эксплуатации. Неравномерно распределенные внутренние напряжения могут приводить к растрескиванию изделий (особенно под воздействием тепла, органических растворителей и агрессивных сред), образованию микротрещин (ухудшаются оптические свойства, появляются «серебрение» поверхности и помутнение изделий), короблению изделий (понижению температуры коробления) и снижению стабильности размеров изделий.

Уровень допустимой ориентации аморфных полимеров в изделиях выбирают в зависимости от условий их эксплуатации. Для изделий, нагруженных при эксплуатации в направлении ориентации полимера, ее повышение увеличивает их работоспособность. Но если при этом изделия работают в агрессивных средах, то повышение ориентации увеличивает склонность к растрескиванию, короблению и вызывает другие виды брака. В этом случае допустимое значение ориентации определяется альтернативно: в зависимости от преобладающего требования (прочность или стойкость к средам). Для изделий общего назначения, которые при эксплуатации подвергаются нагрузкам в различных направлениях, ориентация в продольном направлении не должна превышать определенного уровня, чтобы не ослаблять полимер в перпендикулярном направлении. Для полистирола и полиметилметакрилата этот уровень составляет 15—20 %, для поликарбоната, полисульфона, полиарилатов — 5—7 %.

Уравнение (4.2) позволяет определять параметры формования (скорость заполнения формы, давление литья), обеспечивающие требуемое значение ориентации полимера в изделиях в зависимости от условий их эксплуатации, а также в каждом конкретном случае формования деталей выбирать наилучший вариант корректировки параметров формования для регулирования уровня ориентации полимера в изделиях.

В отличие от аморфных полимеров, которые переходят в твердое состояние, не изменяя фазового состояния (аморфного), охлаждение кристаллизующихся полимеров при формовании сопровождается кристаллизацией, т. е. фазовым переходом.

Структура изделий из кристаллизующихся полимеров характеризуется определенной степенью кристалличности и неравномерным расположением кристаллических областей по сечению изделий.

Свойства кристаллизующихся полимеров в изделиях, полученных в разных условиях переработки, несмотря на морфологическую схожесть структуры различны. Это объясняется разными размерами сферолитов и образующих их ламелей и различиями во взаимном расположении ламелей в сферолитах.

Для изделий из кристаллизующихся полимеров, формуемых в неизотропных условиях (неизотермичность, неоднородность напряжений сдвига по высоте сечения изделий, неоднородность давления по длине полости формы) характерен еще один уровень надмолекулярной организации — слоевая структура, т. е. разные структуры полимера по сечению.

В общем случае форма может заполняться первоначально с постоянной объемной скоростью течения полимера  $Q$  на начальной длине  $L_0$  в течение времени  $t_0$ , а затем с убывающей скоростью течения на длине  $(L_\phi - L_0)$  в течение времени  $(t_3 - t_0)$ , где  $t_3$  — общее время заполнения формы длиной  $L_\phi$  (рис. 4.25, а). Давление на входе в сопло  $P_c$  при заполнении в режиме постоянной объемной скорости течения возрастает до максимального значения, а при последующем заполнении в режиме убывающей скорости течения сохраняет постоянное значение (рис. 4.25, б). Давление в форме  $P_\phi$  по окончании режима заполнения с постоянной скоростью течения возрастает, но с меньшей скоростью.

Толщина охлажденного неподвижного слоя  $\delta$ , не участвующего в течении, равна глубине продвижения фронта затвердевания. Толщина  $\delta$  в поперечном сечении полости формы постепенно возрастает по мере заполнения формы (удаления фронта потока от этого сечения) в результате увеличения продолжительности охлаждения (рис. 4.25, в). Увеличение толщины  $\delta$  приводит к уменьшению «живого» сечения полости формы, в котором течет расплав. Температура полимера в этом сечении снижается, что вызывает возрастание вязкости полимера. Все это приводит к тому, что напряжение сдвига  $\tau$ , реализуемое на границе расплав — охлажденный слой, в режиме постоянной объемной скорости течения возрастает по мере заполнения формы (рис. 4.25, г). В режиме убывающей скорости течения (после точки А) напряжение сдвига постепенно уменьшается.

После полного заполнения формы в течение времени  $t_3$  объемная скорость течения полимера в форме резко падает (см. рис. 4.25, а), что приводит к снижению напряжения сдвига  $\tau$  на границе расплав — охлажденный слой (см. рис. 4.25, г), а давление в форме  $P_\phi$  сначала резко возрастает, а затем принимает постоянное значение (см. рис. 4.25, б). В течение периода выдержки полимера в форме под внешним давлением давление на входе в сопло  $P_c$  и на входе в форму сохраняется постоянным, а в точках, удаленных от формы, может уменьшаться. Объемная скорость течения полимера  $Q$  и напряжение сдвига  $\tau$  при течении в этот период низкие.

После окончания выдержки полимера в форме под давлением, когда форма изолируется от инжекционного цилиндра в результате затвердевания литника или при отводе сопла от литника, в форму

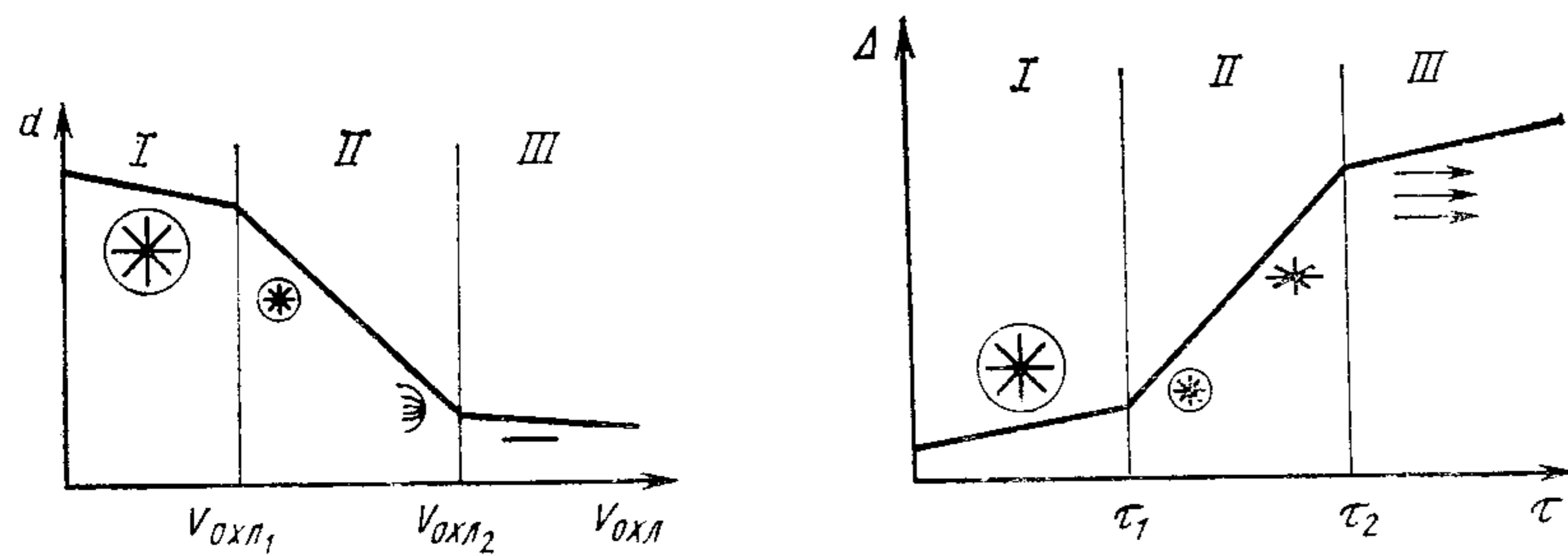


Рис. 4.26. Влияние скорости охлаждения  $V_{\text{охл}}$  при кристаллизации на форму и размеры структурных образований:

I — сферолиты; II — неразвитые сферолиты; III — ламелярные кристаллиты

Рис. 4.27. Влияние напряжения сдвига  $\tau$  на ориентацию  $\Delta$ :

I — изотропные сферолиты; II — деформированные сферолиты; III — сноповидные образования

не поступают новые порции расплава полимера и давление в форме падает (рис. 4.25, б).

Полимер поступает в форму из нагревательного цилиндра с начальной температурой  $T_0$ , которая выше температуры формы  $T_f$ . Полимер охлаждается в форме с момента поступления в нее в результате передачи теплоты к более холодным стенкам формы. Для литья под давлением характерны высокие скорости охлаждения. Скорость охлаждения полимера  $V_{\text{охл}} = dT/dt$  от начальной температуры  $T_0$  до температуры кристаллизации  $T_{\text{кр}}$  различна по высоте поперечного сечения изделия (рис. 4.25, д). Скорость охлаждения полимера в слоях, соприкасающихся со стенками формы, наибольшая. По направлению к центру изделия она уменьшается.

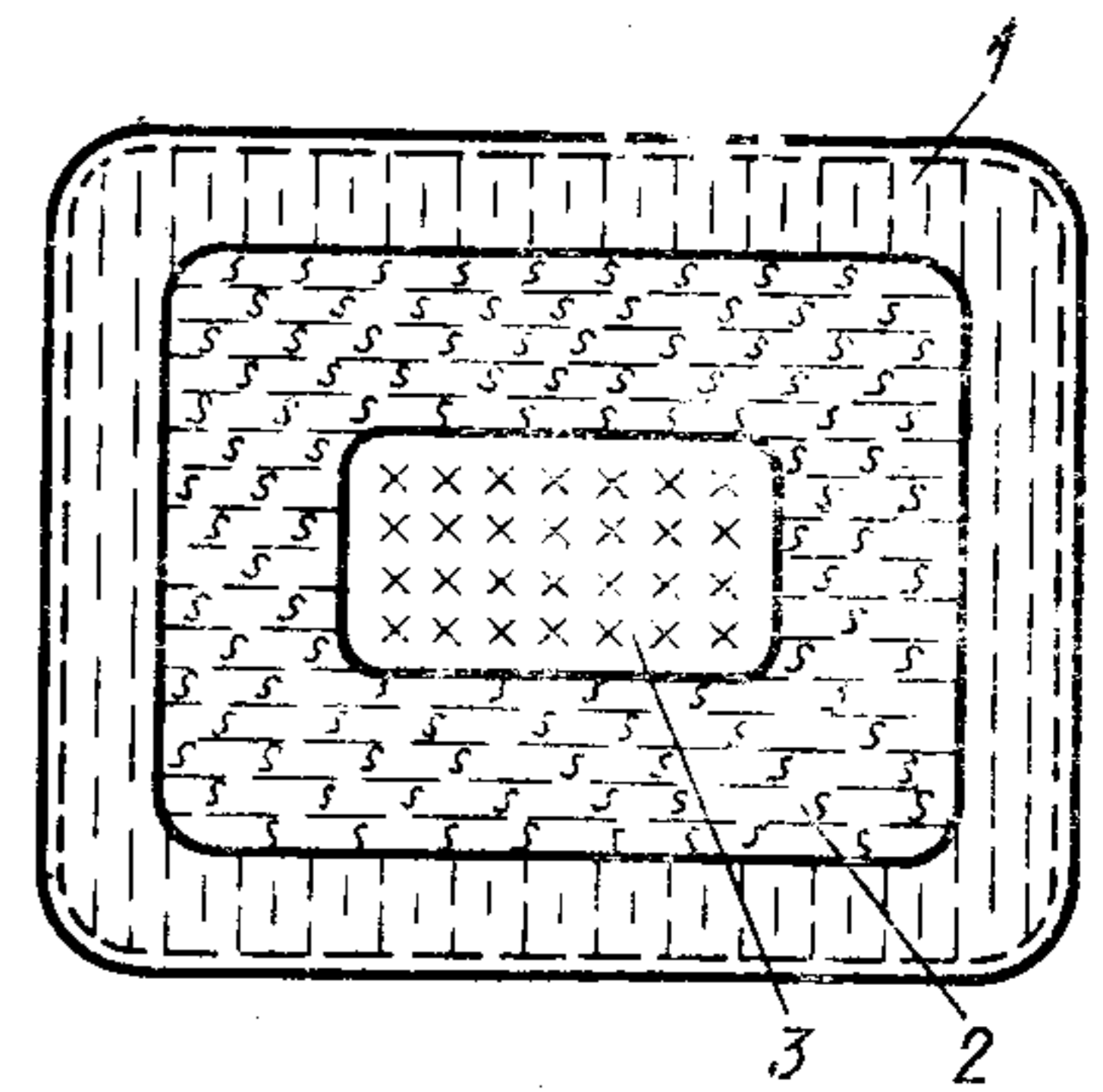
На структурообразование кристаллизующихся полимеров существенное влияние оказывают скорость охлаждения  $V_{\text{охл}}$  и напряжение сдвига  $\tau$ , реализуемые при формовании в процессе кристаллизации.

Зависимость размеров и формы структурных образований от скорости охлаждения можно условно разделить на три участка (рис. 4.26). При охлаждении с низкими скоростями  $V_{\text{охл}}$  — ниже  $V_{\text{охл}_1}$  (участок I) — в процессе кристаллизации успевают образоваться развитые сферолиты. При охлаждении с высокими скоростями  $V_{\text{охл}}$  — выше  $V_{\text{охл}_2}$  (участок III) — сферолиты не успевают развиться и кристаллизация сопровождается образованием только зачатков кристаллических форм (кристаллиты и ламелярные образования). При таких условиях кристаллизации в изделиях не наблюдается признаков структурных образований на оптическом уровне. При охлаждении со средними скоростями  $V_{\text{охл}}$ , лежащими в интервале  $V_{\text{охл}_1} - V_{\text{охл}_2}$  (участок II), формируются сферолиты с размерами, уменьшающимися с возрастанием скорости охлаждения  $V_{\text{охл}}$ .

Зависимость ориентации структурных образований полимера от напряжения сдвига  $\tau$ , реализуемого при формовании, также условно можно разделить на три участка (рис. 4.27). Сдвиговое

Рис. 4.28. Структурные слои в поперечном сечении литьевых изделий:

1 — поверхностная оболочка (заполнение); 2 — средний слой (выдержка под давлением); 3 — центр (охлаждение без давления)



течение полимера при охлаждении с низкими напряжениями сдвига — меньше  $\tau_1$  (участок I) — практически не оказывает влияния на формирование структуры и термодинамический фактор структурообразования имеет преобладающее значение. При таких условиях кристаллизации в отформованном полимере сохраняются симметричные сферолиты. При течении с высокими напряжениями сдвига  $\tau$  — выше  $\tau_2$  (участок III) — происходит сильная ориентация кристаллизующихся полимеров и ориентация при течении оказывает преобладающее влияние на образование структуры полимера. При таких условиях кристаллизации в полимере формируются ориентированные (вытянутые в направлении течения потока) сноповидные или стержневые образования. Сферолиты формироваться не могут. При формовании с напряжениями сдвига  $\tau$ , лежащими в интервале  $\tau_1 - \tau_2$  (участок II), отформованный полимер ориентирован. Формируемые структурные образования — сферолиты — деформированы. Степень ориентации (деформации) повышается с увеличением напряжения сдвига.

В сечении литьевого изделия можно выделить три макрослоя [7]: поверхностный слой  $\delta_3$ , средний слой  $\beta$  и центральный слой  $\phi$  (рис. 4.28). По длине изделия слои сохраняются, но их относительные размеры изменяются.

Несмотря на морфологическую сложность структуры литьевых изделий закономерности ее образования достаточно ясны. Слои формируются в трех основных периодах технологического процесса литья под давлением: в период заполнения формы  $\delta_3$ , в период нарастания и выдержки давления  $\beta$  и в период, когда давление на полимер спадает  $\phi$ . Первый, второй и третий слои изделий из кристаллизующихся полимеров различаются по морфологии.

Образование трех слоев, различающихся по надмолекулярной структуре, обусловлено сочетанием двух факторов. Первый фактор — существенное различие процессов, протекающих в разные периоды формования полимера, что сопровождается разными скоростями сдвига  $\dot{\gamma}$  и напряжениями сдвига  $\tau$  течения полимера в форме, разными интенсивностью (скоростями) охлаждения полимера и давлением в форме в разные периоды формования. Второй фактор — высокая чувствительность структуры кристаллизующихся полимеров к условиям кристаллизации по напряжению сдвига  $\tau$  течения, интенсивности охлаждения и давлению. При разных напряжениях сдвига  $\tau$  течения, скоростях охлаждения и давлениях формируются

различные по морфологии, размерам и форме структурные образования с разной степенью ориентации.

В период заполнения, характеризующийся высокими напряжениями сдвига  $\tau$  на границе расплав — охлажденный слой при течении полимера в форме, образуется поверхностный слой  $\delta_3$  (см. рис. 4.25, *г, е*). Он формируется при сравнительно высоких скоростях охлаждения (см. рис. 4.25, *д*), поэтому поверхностный слой изделий морфологически характеризуется неразвитыми кристаллическими образованиями с большой степенью ориентации. Толщина этого слоя равна глубине продвижения фронта охлаждения (затвердевания), характеризующегося температурой кристаллизации  $T_{кр}$ , за время заполнения формы.

В период нарастания давления до отключения литника от формы, когда напряжения сдвига  $\tau$  на границе расплав — охлажденный слой после падения объемной скорости течения полимера (по окончании заполнения формы) становятся низкими, формируется средний слой  $\beta$  (см. рис. 4.25, *г, е*). Средний слой, в котором протекает кристаллизация и формируется структура, охлаждается со значительно меньшей скоростью, чем та, при которой формировался поверхностный слой. Средний слой изделий содержит симметричные сферолиты, мало деформированные. Размер сферолитов увеличивается по направлению к центру изделий (по направлению снижения напряжения сдвига и скорости охлаждения). Глубина среднего слоя равна глубине продвижения фронта охлаждения при выдержке полимера в форме под давлением.

Центральный слой  $\phi$  образуется в период спада давления по всей длине формы, когда материал в литнике затвердел. Центральный слой  $\phi$  формируется при сравнительно низком давлении с малыми скоростями охлаждения, практически без приложения напряжений сдвига. Этот слой содержит симметричные недеформированные сферолиты больших размеров (размеры сферолитов по всему слою почти одинаковы) и может иметь пустоты.

Выделенные структурные слои изделий из кристаллизующихся полимеров также неоднородны и их можно подразделять на зоны (см. рис. 4.25).

Первая зона поверхностного слоя — наружная ( $\delta_{л.к}$ ) со слабо выраженной на оптическом уровне структурной организацией — состоит из кристаллитов или ламелярных образований. Эта зона образуется в результате очень быстрого охлаждения полимера со скоростью  $V_{охл}$ , превышающей предельную скорость  $V_{охл_2}$ . Ориентация кристаллитов в этой зоне возникает в результате деформации слоев полимера на фронте потока. При движении полимера в форме его слои на фронте потока поворачиваются, растягиваются и ориентируются. Ориентированные слои перемещаются к стенкам формы и соприкасаются с ними. Достигнутая ориентация фиксируется быстрым охлаждением. Чем больше скорость течения, тем больше ориентирован полимер на фронте потока и тем большая ориентация наблюдается в наружной зоне поверхностного слоя изделия. Повышение температуры полимера несколько снижает ориентацию

в наружной зоне в связи с ускорением релаксационных процессов. Основное влияние оказывает температура формы, определяющая градиент температуры в этой зоне. Остальные параметры существенного влияния на ориентацию полимера в этой зоне не оказывают.

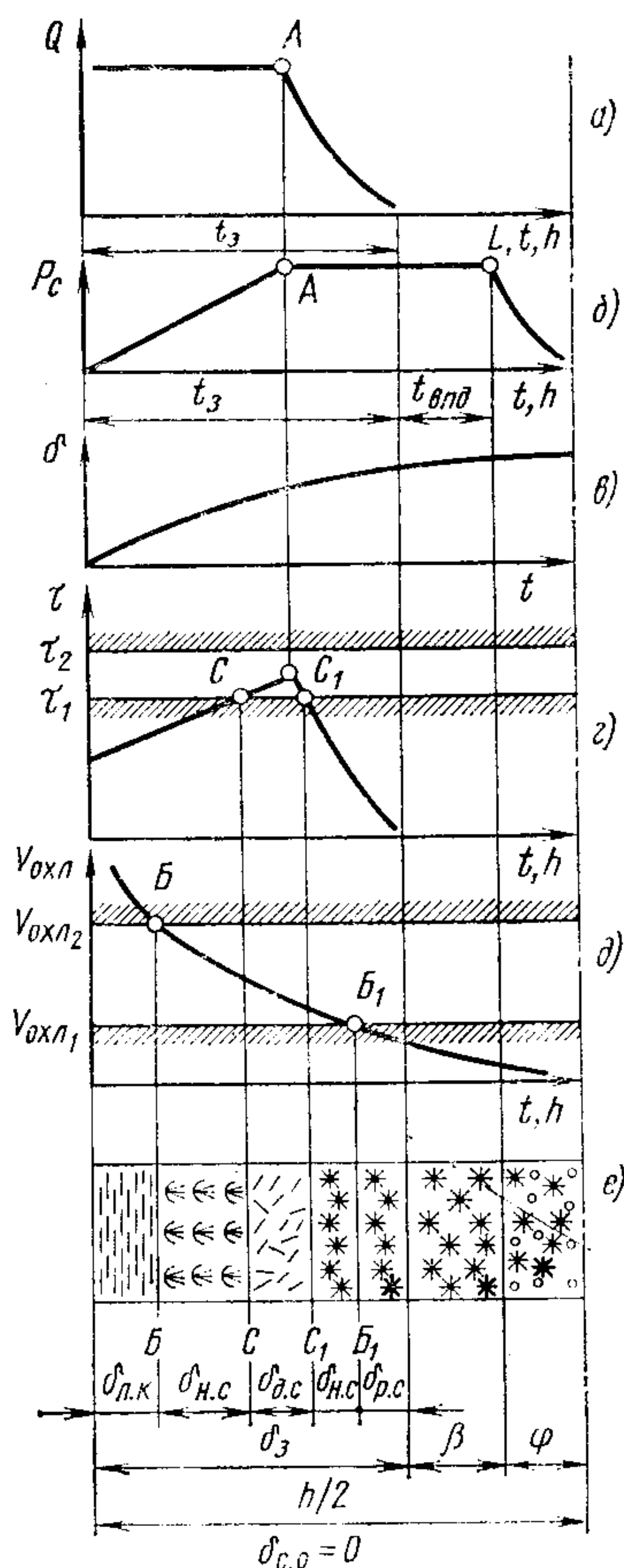
Следующая, вторая зона поверхностного слоя изделий из кристаллизующихся полимеров — зона неразвитых сферолитов  $\delta_{н.с}$ . Эта зона образуется при скорости охлаждения  $V_{охл}$  ниже  $V_{охл_2}$ . Структура полимера в этой зоне характеризуется неразвитыми сферолитами, которые в зависимости от напряжения сдвига, возникающего при заполнении формы, недеформированы (при  $\tau < \tau_1$ ) или ориентированы (при  $\tau > \tau_1$ ) вдоль направления течения. Лучи сферолитов (при  $\tau < \tau_1$ ) главным образом ориентированы навстречу тепловому потоку от поверхности изделия к его центру.

По мере заполнения формы напряжение сдвига растет и становится больше  $\tau_1$ , в результате образуется следующая внутренняя зона поверхностного слоя — зона деформированных сферолитов  $\delta_{д.с}$ . Эта зона образуется при среднем напряжении сдвига  $\tau$ , значения которого лежат в интервале между двумя предельными напряжениями сдвига ( $\tau_2 > \tau > \tau_1$ ). В зоне  $\delta_{д.с}$  формируются несимметричные деформированные сферолиты в результате ориентации их в направлении течения полимера.

Если при заполнении формы реализуются высокие напряжения сдвига (большая скорость впрыска, тонкостенные изделия), превышающие предельное значение  $\tau_2$ , в поверхностном слое формируется зона сноповидных образований  $\delta_{с.о}$ . В этой зоне полимер сильно деформирован. При охлаждении текущего расплава с напряжениями сдвига  $\tau > \tau_2$  зародышеобразование структурных форм происходит путем формирования центров кристаллизации на выпрямленных участках полимерных цепей. Это способствует ориентации полимера. Зона  $\delta_{с.о}$  формируется в процессе течения полимера. Поэтому деформированные слои не успевают изменить ориентированное состояние и перейти в равновесное. Ориентация фиксируется в этих слоях, и формируются сильно вытянутые сноповидные образования. При наличии в поверхностном слое зоны сноповидных образований  $\delta_{с.о}$  наибольшая ориентация содержится в этой зоне. Если при заполнении формы реализуются сравнительно невысокие напряжения сдвига (небольшая скорость впрыска, изделия средней толщины и толстостенные), не превышающие предельное значение  $\tau_2$ , в поверхностном слое не формируется зона сноповидных образований (рис. 4.29). В этом случае наибольшая ориентация содержится в первой зоне  $\delta_{л.к}$ .

Средний слой  $\beta$  изделий из кристаллизующихся полимеров в общем случае может состоять из двух зон, отличающихся по размерам сферолитов. Две зоны образуются при литье в холодную форму ( $T_{\phi} \ll T_{кр}$ ). При таком условии первая зона (ближе к поверхности изделия) среднего слоя охлаждается с более высокой скоростью, превышающей предельную скорость  $V_{охл_1}$ . Это приводит к формированию в ней неразвитых сферолитов. Вторая зона среднего слоя охлаждается с более низкой скоростью  $V_{охл}$  — меньше

Рис. 4.29. Образование структуры полимеров при формовании с низкими напряжениями сдвига при заполнении формы



предельной скорости  $V_{охл1}$ . Поэтому эта зона по структуре характеризуется развитыми сферолитными образованиями. Средний слой образуется в период подпитки, когда реализуется сравнительно низкая объемная скорость течения полимера и напряжение сдвига, как правило, не превышает предельного значения  $\tau_1$ . Поэтому полимер в этом слое слабо ориентирован и размер формируемых сферолитов определяется скоростью охлаждения. Средний слой изделий для многих полимеров состоит из одной зоны (см. рис. 4.25, e), образуемой при литье в подогретую форму. При таком условии, полимер по всей толщине среднего слоя охлаждается с низкой скоростью, соответствующей одной области — ниже предельной скорости  $V_{охл1}$ .

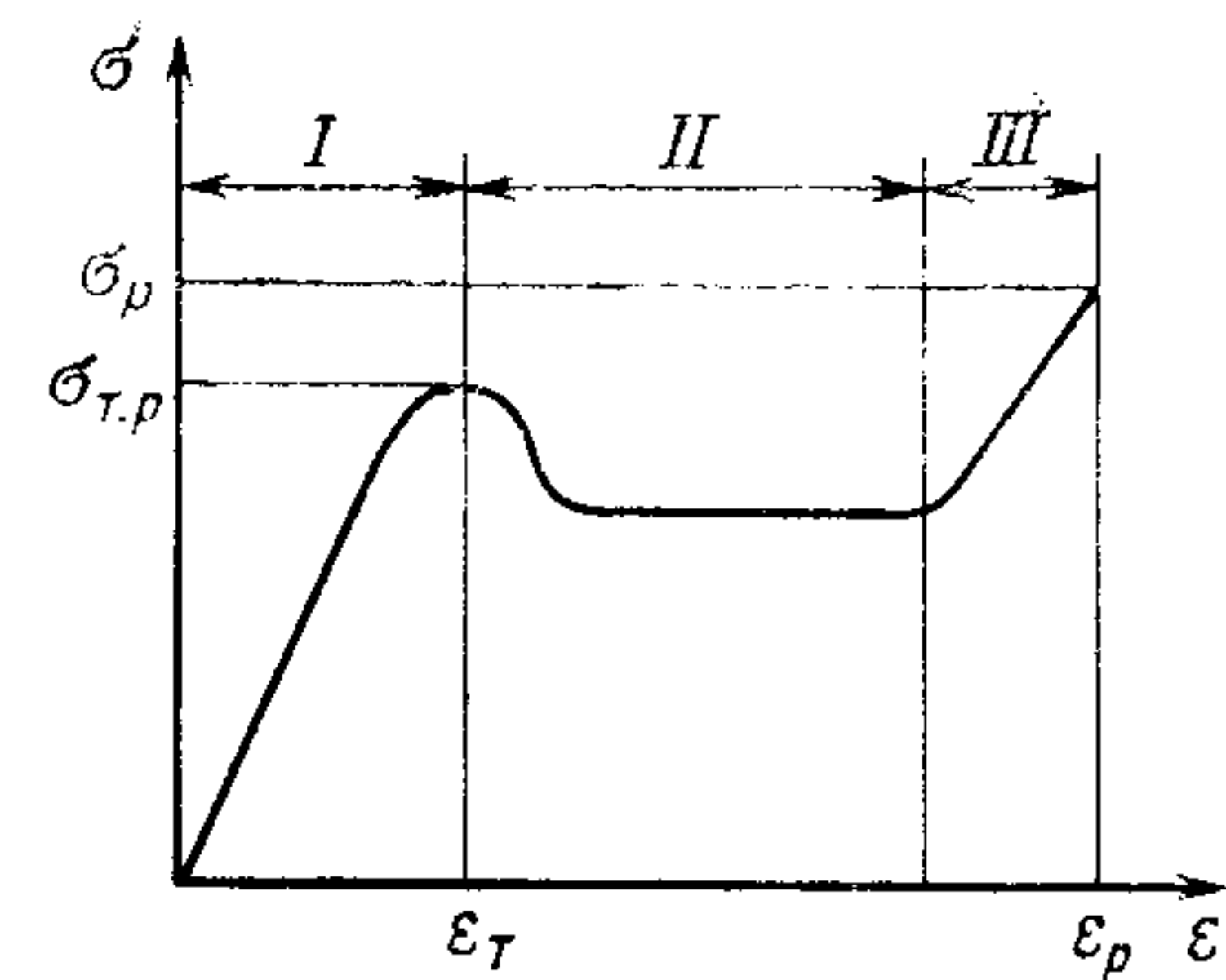
Если форма сначала заполняется в режиме постоянной объемной скорости течения  $Q$ , а затем в режиме убывающей скорости течения и в последнем режиме  $Q$  значительно снижается, то резкого перехода между слоями, образующимися в период за-

полнения формы  $\delta_3$  и в период нарастания давления  $\beta$  нет — граница перехода размыта (рис. 4.29, e).

Центральный слой  $\phi$  изделий из кристаллизующихся полимеров в общем случае также может состоять из двух зон. Вторая (внутренняя) зона содержит микропоры. Поскольку центральный слой образуется при охлаждении с низкой скоростью ( $< V_{охл1}$ ) практически без приложения напряжения сдвига, он состоит из развитых и неориентированных сферолитов. Образование одной или двух зон определяется условиями формования (режимом давления). Если давление в полимере уменьшится до нуля раньше того момента, как он полностью затвердеет, то в результате усадки расплава в условиях замкнутого объема образуется вторая зона микропор.

Механические свойства изделий из кристаллизующихся полимеров связаны со слоевой структурой, образующейся при их формовании. Выделенные слои отличаются по своим механическим показателям. Поэтому оценка реальных изделий по слоевой структуре однозначно характеризует их свойства. Выделенные зоны в среднем и центральном слоях (в каждом из слоев) по свойствам отличаются

Рис. 4.30. Диаграмма напряжение — деформация



мало, поэтому при рассмотрении влияния структуры на механические свойства изделий учитываются только поверхностный и внутренний слои.

В качестве критерия, характеризующего эксплуатационные свойства изделий из кристаллизующихся полимеров, принимаются отношения площади отдельных структурных слоев и зон к площади поперечного сечения детали.

Знание особенностей работы под нагрузкой изделий различной слоевой структуры позволяет прогнозировать их работоспособность в зависимости от структуры.

По структуре сечения все изделия можно разделить на три группы. К первой группе относятся изделия, у которых отношение площади внутреннего слоя  $S_\phi$  к площади их поперечного сечения  $S$  составляет  $S_\phi/S > 0,35$ , ко второй — изделия, у которых  $S_\phi/S < 0,25$ ; к третьей — изделия с промежуточными значениями  $S_\phi/S$ . Внутри каждой группы изделия по структуре зон поверхностного слоя можно подразделить на три подгруппы. Первая подгруппа включает изделия, у которых отношение площади зоны со сноподобными образованиями  $S_{с.о}$  к площади поперечного сечения детали  $S$  составляет  $S_{с.о}/S = 0$ , вторая — изделия, у которых  $0 < S_{с.о}/S < 0,25$ , и третья — изделия, у которых  $S_{с.о}/S \geq 0,25$ . При таком разделении можно прогнозировать работоспособность изделий каждой группы и подгруппы, указать, как работает каждый слой и причины разрушения изделий.

Кривую зависимости напряжения при растяжении  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$  полимеров можно разделить на три участка: I — развитие упругих деформаций и образование шейки; II — распространение шейки по всему образцу; III — деформирование ориентированной шейки и разрушение образца (рис. 4.30). Чем больше напряжение при пределе текучести  $\sigma_{т.р}$  и относительное удлинение при разрыве  $\epsilon_p$ , тем надежнее изделие в условиях эксплуатации. Поэтому при направленном создании структуры изделий из полимеров следует стремиться, чтобы предел текучести при растяжении и относительное удлинение при разрыве были наибольшими.

Если у изделий из кристаллизующихся полимеров центральный слой  $\phi$  занимает относительно большую площадь, т. е.  $S_\phi/S > 0,35$ , то их разрушение вне зависимости от размеров поверхностного слоя и среднего слоя происходит на втором участке диаграммы напряжение — деформация (рис. 4.31). Разрушение изделия происходит вследствие разрушения центрального слоя  $\phi$  по дефектам или микропорам. После разрушения слоя вся нагрузка ударно переходит на поверхностный слой и изделие разрушается целиком. С увеличением относительной площади ориентированной зоны сноподобных

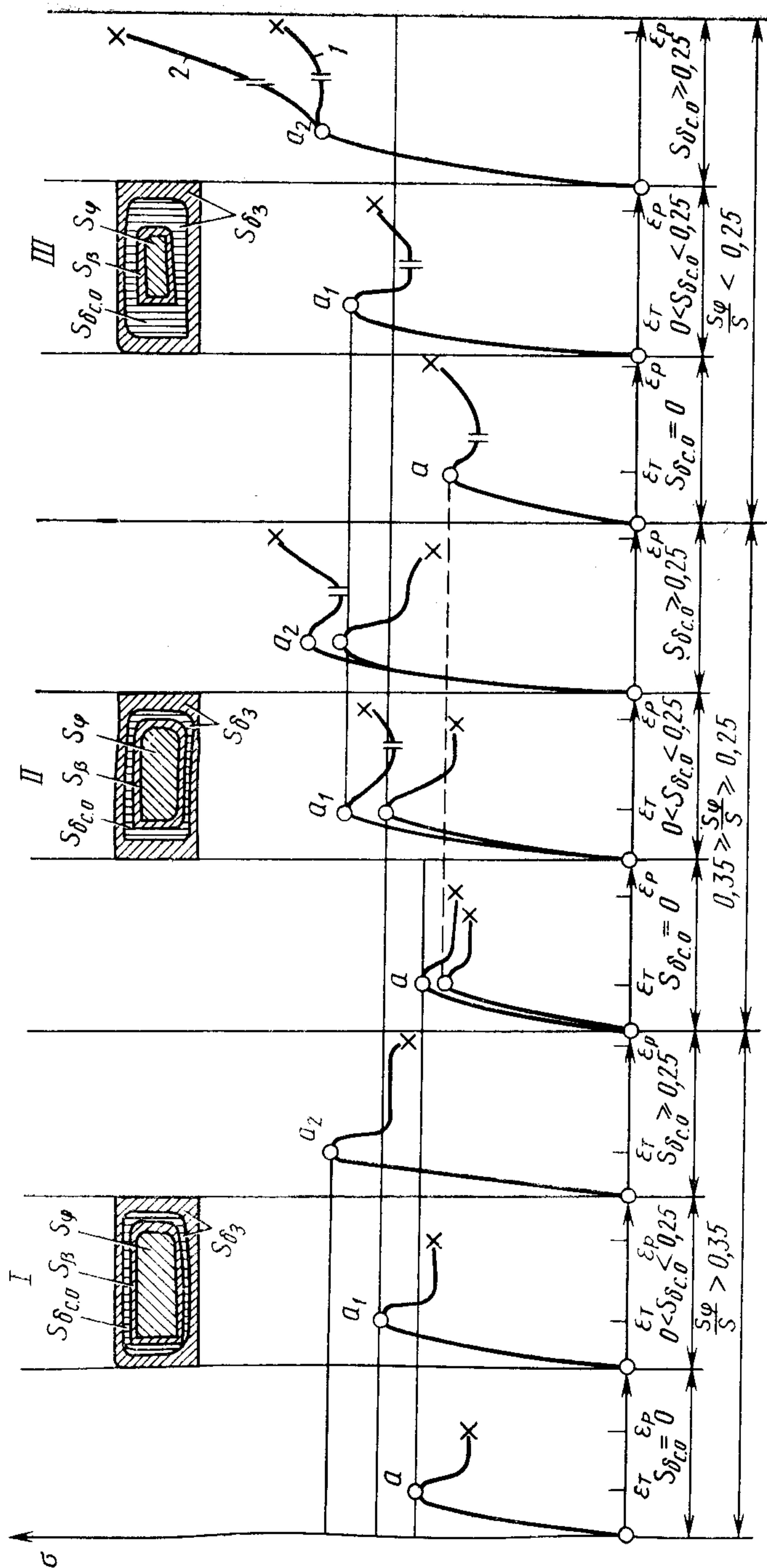


Рис. 4.31. Диаграммы напряжение — деформация и механика разрушения литьевых изделий

образований  $S_{\sigma_{c.o}}/S$  происходит упрочнение детали. Увеличиваются предел текучести при растяжении  $\sigma_{\epsilon T}$  и относительное удлинение при разрыве  $\epsilon_P$ . Это улучшает эксплуатационные свойства изделий.

При относительно малой площади центрального слоя  $\phi$  изделий из кристаллизующихся полимеров, т. е. при  $S_{\phi}/S < 0,25$ , механические показатели в основном зависят от структуры и размеров поверхностного слоя. По мере увеличения в поверхностном слое относительной площади зоны с ориентированными сноподобными образованиями  $S_{\sigma_{c.o}}/S$  предел текучести при растяжении  $\sigma_{\epsilon T}$  повышается, растет также и прочность — разрушающее напряжение при растяжении  $\sigma_P$ . Для изделий с зоной сноподобных образований и с относительной площадью этой зоны  $S_{\sigma_{c.o}}/S < 0,25$  основная нагрузка при деформировании в момент образования шейки приходится на поверхностный слой. В результате разрушения этого слоя образуются концентраторы напряжений, которые приводят к разрушению всего изделия. Если изделия отформованы из более эластичных полимеров, таких, как полиолефины, разрушение поверхностной оболочки не вызывает немедленного разрушения изделий (они продолжают деформироваться). Изделия в таком случае разрушаются на третьем участке кривой напряжение — деформация.

В случае, если при изготовлении изделий сформирована структура со сравнительно небольшим относительным размером центрального слоя  $S_{\phi}/S < 0,25$  и сравнительно большим относительным размером ориентированной зоны сноподобных образований  $S_{\sigma_{c.o}}/S > 0,28 \div 0,3$ , полимер имеет большой предел текучести при растяжении  $\sigma_{\epsilon T}$ , а разрывное напряжение  $\sigma_P$  увеличивается по сравнению с паспортным  $\sigma_P$  на полимер более чем в 1,5—2 раза (см. кривую 1 на рис. 4.31).

При очень большой относительной площади зоны сноподобных образований  $S_{\sigma_{c.o}}/S$ , приближающейся к 0,9—1, изделия характеризуются высокими напряжениями при пределе текучести  $\sigma_{\epsilon T}$ , большими разрывными напряжениями  $\sigma_P$  и высокой ударной прочностью. В этом случае на кривой напряжение — деформация практически отсутствует второй участок. Такая структура образуется при формовании тонкостенных изделий с высокой скоростью впрыска и при большой скорости охлаждения (см. кривую 2 на рис. 4.31).

Если при изготовлении изделий сформирована структура с промежуточным относительным размером центрального слоя, т. е.  $0,35 \geq S_{\phi}/S \geq 0,25$ , образец может разрушаться по первой (при  $S_{\phi}/S > 0,35$ ) или по третьей схеме (при  $S_{\phi}/S < 0,25$ ) (см. рис. 4.31). Это зависит от расположения дефектов и их размеров. Поэтому для структуры с такой относительной площадью центрального слоя характерна нестабильность механических свойств и характер разрушения литьевой детали часто несопоставим.

Технологические параметры формования оказывают влияние на структуру, размеры слоев и зон изделий из кристаллизующихся полимеров и в связи с этим влияют на их свойства. Требуемую структуру с определенными размерами слоев и зон в зависимости от усло-



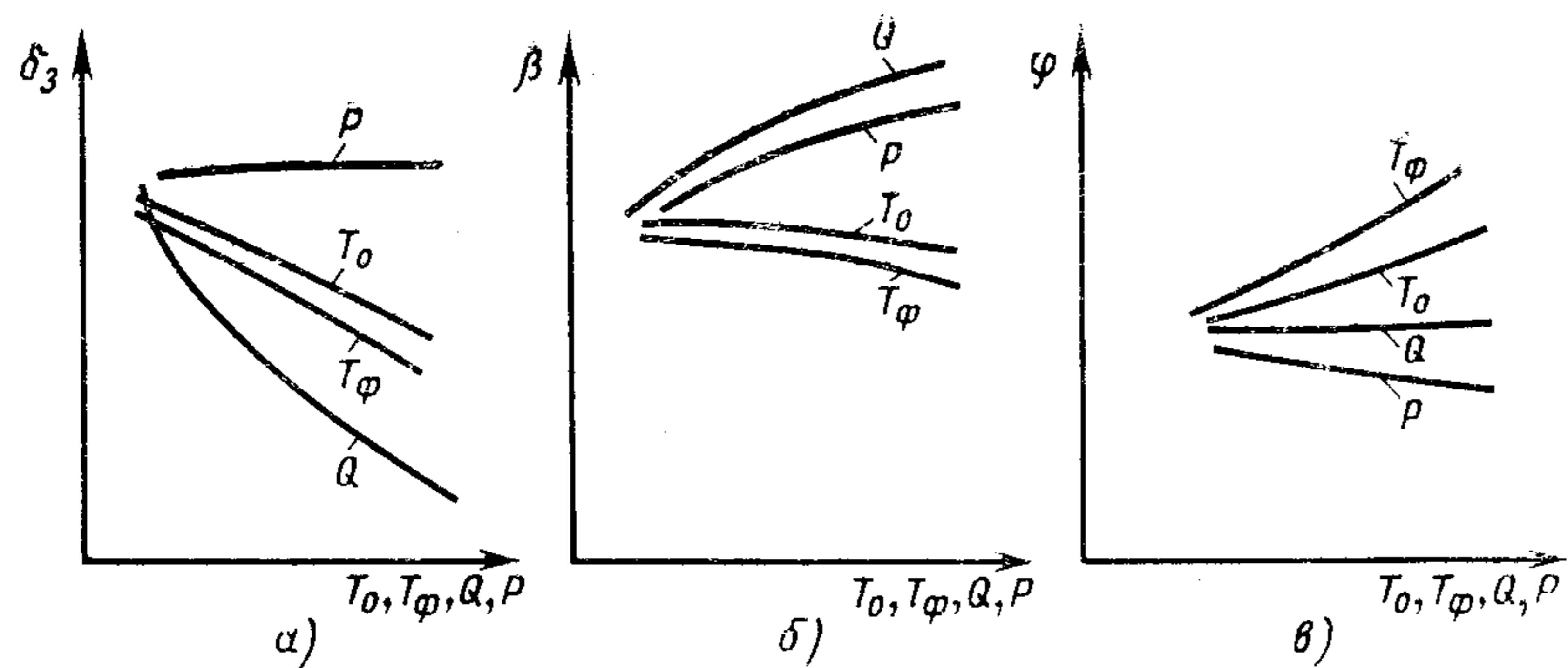


Рис. 4.32. Влияние температуры полимера  $T_0$ , формы  $T_{\phi}$ , объемной скорости течения  $Q$  и давления  $P$  на толщину слоя:  
 а — поверхностного  $\delta_3$ ; б — среднего; в — центрального  $\phi$

вий эксплуатации изделий можно получать, регулируя технологические параметры формования.

Толщина поверхностного слоя  $\delta_3$  зависит от температуры полимера  $T_0$ , температуры формы  $T_{\phi}$  и продолжительности ее заполнения  $t_3$  (или объемной скорости течения полимера  $Q$ ) (рис. 4.32, а). Увеличение температуры  $T_0$  и  $T_{\phi}$  уменьшает толщину пристенного слоя, а увеличение времени заполнения формы  $t_3$  (понижение  $Q$ ) увеличивает ее.

Толщина среднего слоя  $\beta$  уменьшается с повышением температуры полимера  $T_0$  и формы  $T_{\phi}$  и с уменьшением объемной скорости течения полимера (рис. 4.32, б). Повышение давления  $P$  и времени выдержки под давлением приводит к увеличению толщины среднего слоя.

Толщина центрального слоя  $\phi$  увеличивается с ростом температуры полимера и формы, практически не зависит от продолжительности заполнения формы (см. рис. 4.32, в). Величина давления оказывает на нее слабое влияние.

Толщина зон слоев изделий из кристаллизующихся полимеров так же чувствительна к технологическим параметрам формования. Так, толщина первой зоны поверхностного слоя — зоны ламелярных кристаллитов  $\delta_{л.к}$  — уменьшается с повышением температуры полимера  $T_0$  и формы  $T_{\phi}$  и практически не зависит от других параметров (рис. 4.33, а).

Толщина зоны сноповидных образований  $\delta_{с.о}$  поверхностного слоя изделий уменьшается при увеличении температуры полимера  $T_0$  и формы  $T_{\phi}$ , растет с увеличением времени заполнения формы  $t_3$  и слабо зависит от давления  $P$  (рис. 4.33, б).

Толщина зоны деформированных сферолитов  $\delta_{д.с}$  в поверхностном слое изделий по-разному зависит от режима формования (напряжения сдвига, изменение которого может привести к образованию разного числа зон поверхностного слоя). Если поверхностный слой не содержит зону сноповидных образований, толщина зоны деформированных сферолитов  $\delta_{д.с}$  уменьшается с повышением тем-

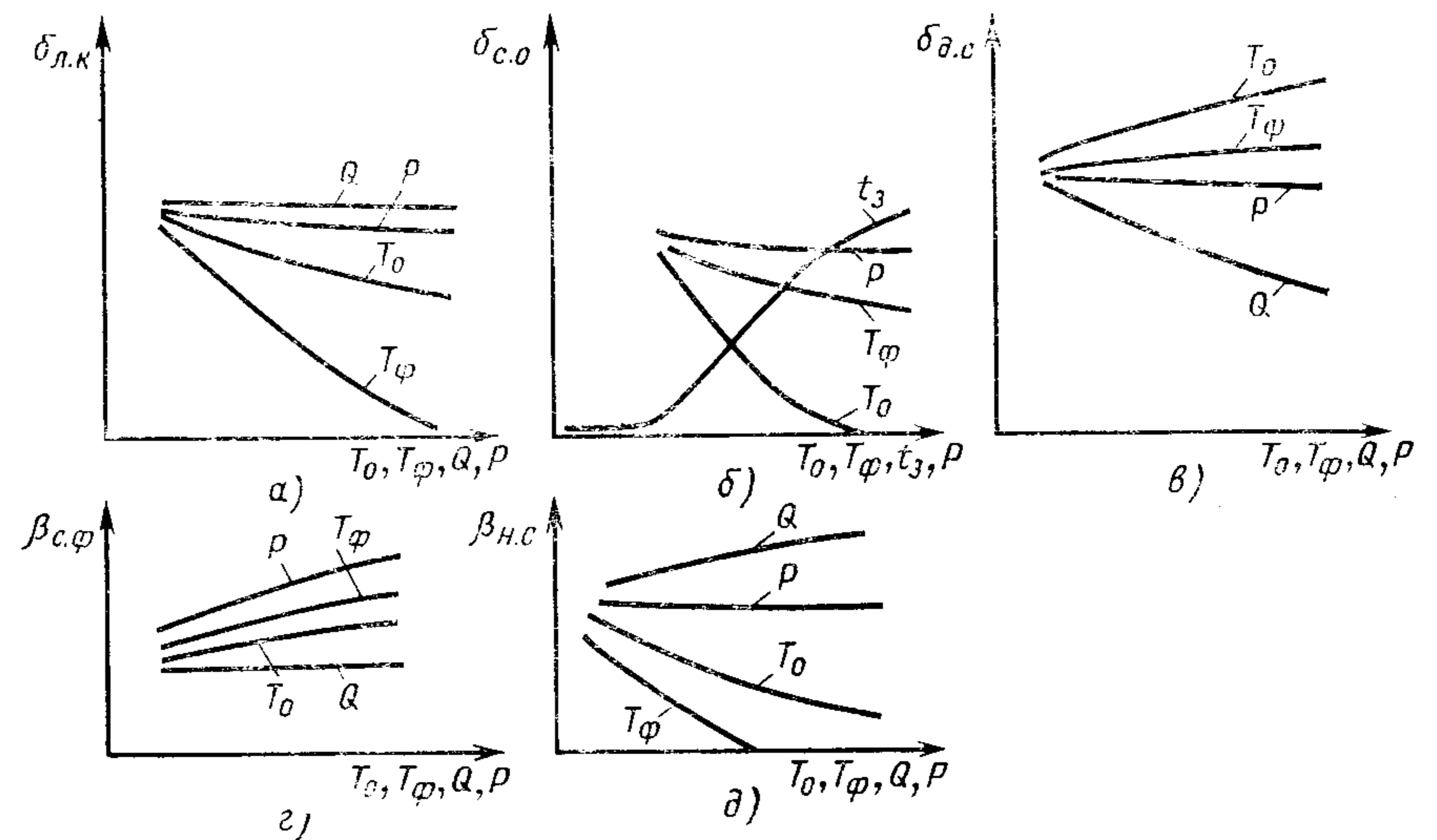


Рис. 4.33. Влияние температуры полимера  $T_0$ , формы  $T_{\phi}$ , объемной скорости течения  $Q$ , времени заполнения формы  $t_3$  и давления  $P$  на толщину:  
 а — наружной зоны ламелярных кристаллитов  $\delta_{л.к}$ ; б — зоны сноповидных образований  $\delta_{с.о}$  поверхностного слоя; в — зоны деформированных сферолитов  $\delta_{д.с}$  (поверхностного слоя); г — зоны сферолитов  $\beta_{н.с}$  (среднего слоя)

пературы полимера  $T_0$  и формы  $T_{\phi}$  и с уменьшением продолжительности ее заполнения  $t_3$ . Если поверхностный слой содержит зону сноповидных образований, то толщина зоны деформированных сферолитов  $\delta_{д.с}$  слабее зависит от технологических параметров и имеет тенденцию к увеличению с ростом температуры полимера  $T_0$  и формы  $T_{\phi}$  (рис. 4.33, в).

Толщина внутренней зоны среднего слоя  $\beta_{с.ф}$  изделий увеличивается с повышением давления  $P$ , температуры полимера  $T_0$  и формы  $T_{\phi}$  и практически не зависит от скорости впрыска (рис. 4.33, г). Повышение температуры полимера  $T_0$  и формы  $T_{\phi}$ , а также увеличение продолжительности ее заполнения вызывают снижение толщины наружной зоны неразвитых сферолитов  $\beta_{н.с}$  среднего слоя изделий (рис. 4.33, д). Давление оказывает на нее слабое влияние.

Качество литевых деталей можно оценивать по следующим критериям: внешнему виду, механическим показателям, точности размеров. Качество деталей по каждому из этих показателей достигается созданием соответствующей структуры. Характеристики структуры, обеспечивающей соответствующее качество, и направленное изменение параметров формования для получения требуемой структуры изделий приведены в работе [9].

Разработка алгоритма автоматического управления качеством литевых изделий основывается на математических зависимостях толщины отдельных структурных слоев ( $\delta_3$ ,  $\beta$ ,  $\phi$ ) и их морфологических зон ( $\delta_{л.к}$ ,  $\delta_{н.с}$ ,  $\delta_{д.с}$ ,  $\delta_{с.о}$ ) от параметров процесса литья,

Формулы для расчета толщины структурных слоев и зон в сечении литевых изделий

Толщина	Расчетная формула	
Поверхностного слоя $\delta_3$	$\delta_3 = 3,36 \sqrt{\bar{a}t_3} (1 - \sqrt{1 - \bar{\theta}})$ ; $Fo \leq 0,089$ $\delta_3 = 0,5h [1 - \sqrt{1 - 0,78\bar{\theta} \exp(3Fo)}]$ ; $Fo > 0,089$	
Среднего слоя $\beta$	$\beta = 0,5h [1 - \sqrt{1 - 0,78\bar{\theta} \exp(3Fo_1)}] - \delta_3$	
Центрального слоя $\varphi$	$\varphi = h - 2(\delta_3 + \beta)$	
Зоны поверхностного слоя	наружной зоны ламелярных кристаллитов $\delta_{л.к}$	$\delta_{л.к} = 3,36 \sqrt{\bar{a}/V_{охл_2}} \times \sqrt{(1 - \sqrt{1 - \bar{\theta}})^3 \sqrt{1 - \bar{\theta}} (T_0 - T_{\phi})}$
	зоны неразвитых сферолитов $\delta_{н.с}$	$\delta_{н.с} = \delta_3 - (\delta_{л.к} + \delta_{д.с})$ или $\delta_{н.с} = \delta_3 - (\delta_{л.к} + \delta_{с.о})$
	зоны деформированных сферолитов $\delta_{д.с}$	$\delta_{д.с} = \delta_3 - \xi_{д.с}$ ; $\xi_{д.с} = 0,5h - (3V\eta_{\tilde{\nu}}(\tilde{T})/\tau_1)$
	зоны сноповидных образований $\delta_{с.о}$	$\delta_{с.о} = \delta_3 - \xi_{с.о}$ ; $\xi_{с.о} = 0,5h - (3V\eta_{\tilde{\nu}}(\tilde{T})/\tau_2)$
Эффективная скорость охлаждения расплава при кристаллизации $V_{охл}$	$V_{охл} = dT/dt = 3,36^2 \bar{a} [1 - \sqrt{1 - \bar{\theta}}]^3 \sqrt{1 - \bar{\theta}} (T_0 - T_{\phi})/\xi_i^2$	

- Примечания: 1. Время **заполнения** формы  $t_3$ .  
2. Относительная температура  $\bar{\theta} = (T_{кр} - T_{\phi})/(T_0 - T_{\phi})$ , где  $T_{кр}$  — начальная температура кристаллизации.  
3. Эффективный коэффициент температуропроводности  $\bar{a} = a/K_L$ ,  $K_L = 3L_{кр}/[\rho C_p (T_0 - T_{\phi})]$ , где  $a$  и  $C_p$  — коэффициенты температуропроводности и удельной теплоемкости расплава полимера.  $L_{кр}$  — удельная теплота кристаллизации.  
4. Критерий Фурье  $Fo = \bar{a}t_3/(h/2)^2$ ,  $Fo_1 = \bar{a}(t_3 + t_{впд})/(h/2)^2$ .  
5. Скорость движения фронта потока  $V$ .  
6. Расчет вязкости  $\eta_{\tilde{\nu}}(\tilde{T})$  при скорости сдвига  $\tilde{\nu}$  и среднеобъемной температуре потока расплава  $\tilde{T}$  по известному значению ПТР, или молекулярной массы  $\bar{M}$ , или ньютоновской вязкости  $\eta_N(T^*)$ , или эффективной вязкости  $\eta_{\tilde{\nu}}^*(T^*)$  полимера приведен в работе [9]; при этом  $\tilde{\nu}$  задают равной  $\tilde{\nu}$ ,  $T = \tilde{T}$ . Температуру  $\tilde{T}$  рассчитывают по уравнению (6а)–(6з) [табл. 1.3], при этом  $T_{\delta} = T_{кр}$ ,  $t = t_3$ . Скорость сдвига  $\tilde{\nu}$  на границе расплав — твердая оболочка  $\dot{\gamma} = 2(2n + 1)V/[n(h - 2\xi_i)]$ .  
7. Толщина  $i$ -го слоя  $\xi_i$ .  
8. Значения  $T_{кр}$ ,  $a$ ,  $C_p$ ,  $L_{кр}$  приведены в работе [9].

размеров изделий и свойств полимеров (теплофизических, реологических и параметров кристаллизации). Эти зависимости получаются на основе решения математических уравнений, описывающих литевые процессы (см. п. 1.2.5). Движение фронта затвердевания можно заменить движением фронта температуры кристаллизации  $T_{кр}$ . Толщина поверхностной оболочки  $\delta_3$  равна глубине продвижения фронта температуры кристаллизации  $T_{кр}$  в течение периода заполнения формы, толщина среднего слоя  $\beta$  — глубине продвижения этого фронта в течение периода выдержки полимера под давлением (табл. 4.2).

Эффективные значения предела текучести  $\sigma_{т.эф}$  и модуля упругости  $E_{эф}$  при растяжении литевого изделия, состоящего из нескольких структурных слоев (по аналогии с другими слоистыми конструкциями), можно определить по формуле:

$$\sigma_{т.эф} = \sum_{i=1}^n \sigma_{т.эф_i} S_i/S_{из}; \quad E_{эф} = \sum_{i=1}^n E_i S_i/S_{из},$$

где  $\sigma_{т.эф_i}$ ,  $E_i$ ,  $S_i$  — напряжение, модуль упругости и площадь структурного слоя.

Варьирование технологических параметров литья в диапазоне возможных режимов переработки главным образом изменяет относительные площади структурных слоев и зон, а их морфологическое строение, доля ориентированных кристаллитов и механические свойства изменяются в меньшей степени. Поэтому прочностные и деформационные показатели структурных слоев и зон ( $\sigma_{т_i}$ ,  $\sigma_{р_i}$ ,  $\epsilon_{р_i}$ ,  $E_i$ ,  $a_{уд_i}$  — ударная вязкость) можно принимать постоянными.

Для расчета технологических параметров литья, гарантирующих получение изделий с заданной структурой, которая обеспечивает требуемые показатели качества, задают исходные данные: теплофизические свойства —  $a$  [9]; параметры кристаллизации —  $T_{кр}$ ,  $L_{кр}$ ,  $V_{охл_1}$ ,  $V_{охл_2}$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  [9]; вязкостные свойства — см. табл. 2.3, [9]; ПТР перерабатываемой партии полимера; размеры изделия — средняя толщина  $h$  и длина  $l$  (путь течения расплава от литника). Один из вариантов определения технологических параметров литья следующий:

1) на основе анализа условий эксплуатации изделия выбирают его оптимальную структуру — относительные размеры морфологических слоев и зон [9]; 2) выбирают время заполнения формы  $t_3$  в реализуемом на машине интервале  $t_{3min}$  —  $t_{3max}$ ; 3) рассчитывают толщину поверхностного слоя  $\delta_3$  (по табл. 4.2); 4) рассчитывают максимальную скорость сдвига при заполнении  $\dot{\gamma}_{max}$ ;

$$\dot{\gamma}_{max} = 2(2n + 1)hl/[nt_3(h - 2\delta_3)^2]. \quad (4.3)$$

5) выбирают напряжение сдвига  $\tau^*$ , при котором должна заполняться форма,  $\tau^*$  на 10—20 % ниже (выше)  $\tau_1$  или  $\tau_2$  в зависимости от требуемой структуры поверхностной оболочки; 6) рассчитывают среднеобъемную температуру расплава  $\tilde{T}$ , при которой достигается требуемое  $\tau^*$  [9]; 7) по  $\tilde{T}$  рассчитывают (4.4) температуру полимера  $T_0$ , при которой получается заданная толщина  $\delta_3$ ,

$$T_0 = \{\tilde{T} [3(0,5h - 3,36 \sqrt{\bar{a}t_3})] - T_{кр} (3,36 \sqrt{\bar{a}t_3} - \delta_3)\} / (1,5h - 6,72 \sqrt{\bar{a}t_3} + \delta_3). \quad (4.4)$$

8) по  $T_0$  рассчитывают (4.5) температуру формы  $T_{\phi}$ , при которой получается заданная толщина  $\delta_3$ ,

$$T_{\phi} = T_0 - \{(T_0 - T_{кр}) / [1 - \delta_3 / (3,36 \sqrt{\bar{a}t_3})]^2\}. \quad (4.5)$$

9) рассчитывают размеры морфологических слоев и зон (см. табл. 4.2); 10) сравнивают рассчитанные и выбранные размеры морфологических слоев и зон: если рассчитанные значения меньше выбранных,  $t_3$  уменьшают на 10—20 %, если больше — увеличивают, и вновь проводят расчет по п. 1—9; подбором времени заполнения  $t_3$  добиваются совпадения рассчитанных и выбранных значений в пределах 10—20 %; 11) рассчитывают давление литья  $P_{л.}$ , обеспечивающее заполнение формы в режиме постоянной скорости течения (2.7); 12) выбирают режим формования — обычный или со сбросом давления — и рассчитывают его параметры [9]; 13) рассчитывают (4.6) продолжительность выдержки полимера в форме под давлением

$$t_{внд} = h^2 \ln \{ [1 - (1 - 2(\beta + \delta_3)h^{-1})] (T_{кр} - T_{\phi}) / [0,78(T_0 - T_{\phi})] \} / (12\bar{a}). \quad (4.6)$$

14) рассчитывают размеры литника, обеспечивающие требуемую  $t_{внд}$  (2.38); 15) рассчитывают продолжительность охлаждения изделия в форме (2.19).

Основные технологические параметры переработки литьем под давлением промышленных полимеров приведены в работе [9].

#### 4.4. РЕЖИМЫ ЛИТЬЯ

Системы регулирования основных технологических параметров переработки и продолжительности отдельных операций цикла литья (см. п. 4.2) позволяют реализовать на литьевой машине различные режимы литья, что обеспечивает более полное использование технических возможностей машин и получение изделий широкого ассортимента и требуемого качества с наименьшими затратами.

Системы регулирования позволяют реализовать также различные режимы перемещения инжекционного узла машины в цикле: 1) может быть прижат к литниковой втулке формы в течение всего цикла (при работе с точечными литниками); 2) может отводиться по окончании выдержки полимера в форме под внешним давлением (при работе с самозапирающимися соплами, при переработке реактопластов и др.); 3) может отводиться от формы по окончании пластикации (при работе с открытыми соплами).

Системы регулирования позволяют реализовать различные режимы создания давления формования (рис. 4.34). Обычный режим (рис. 4.34, а) без сброса давления используют для переработки полимеров с небольшой вязкостью в сравнительно толстостенные изделия небольшой площади через обычные литники. При этом в форме развивается невысокое давление с небольшим перепадом значений по ее длине. Для уменьшения в изделиях внутренних напряжений и получения равнотолщинных по длине изделий с изотропными свойствами, а также в случае необходимости формования при определенном давлении используют режим формования со сбросом давления (рис. 4.34, б): после нарастания в форме наибольшего давления  $P_2$  оно через определенный интервал времени уменьшается до необходимого регулируемого значения  $P_3$ . При отливке изделий большой площади, когда усилия, возникающие в форме, могут превысить усилие запираения, целесообразно сбрасывать давление в момент заполнения формы (рис. 4.34, в). В этом случае также уменьшаются внутренние напряжения в изделиях.

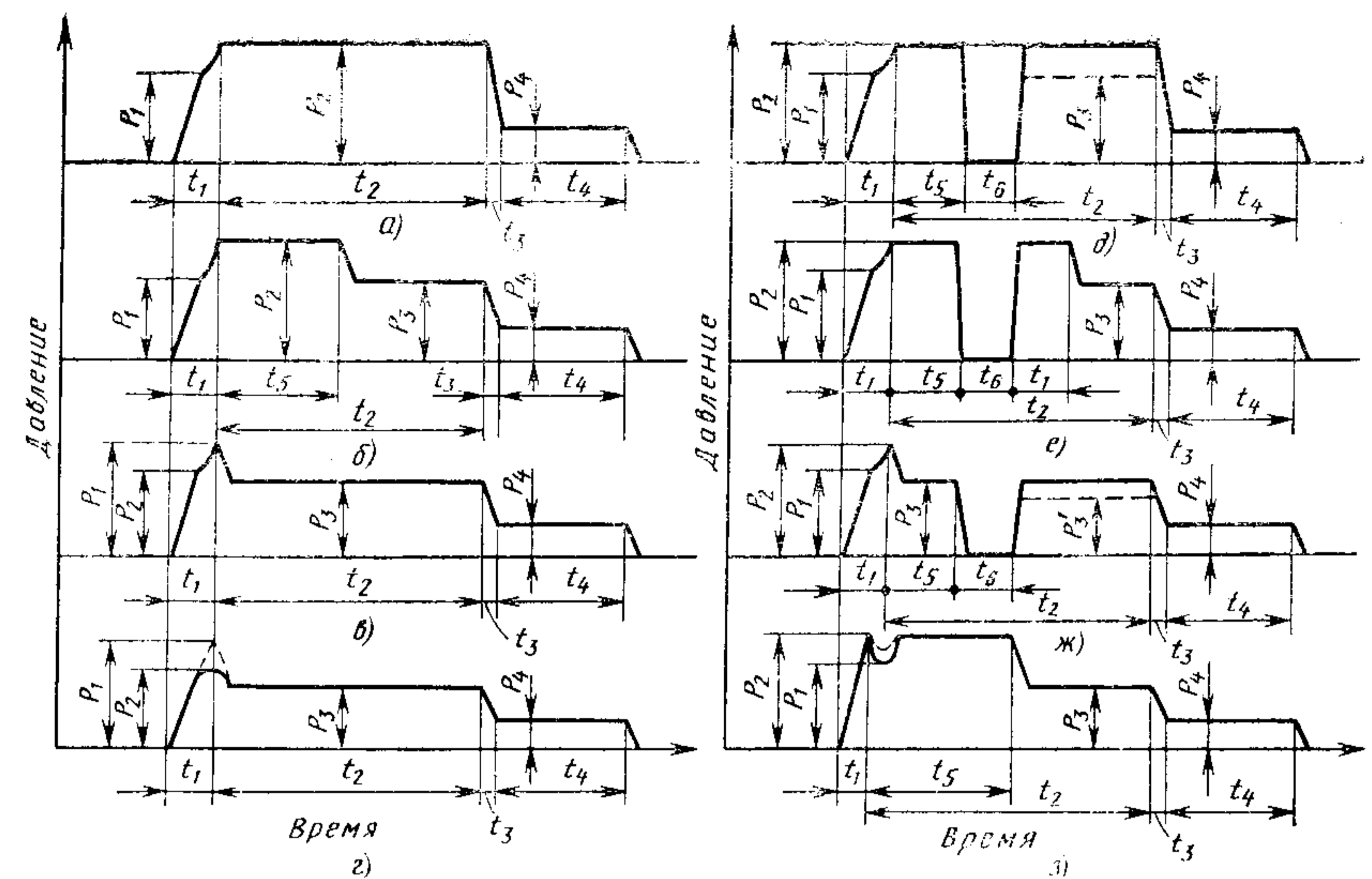


Рис. 4.34. Режимы формования без сброса (а) и со сбросом давления (б—з):  $t_1, t_2, t_3, t_4$  — продолжительность впрыска, выдержки под давлением, уменьшения давления, пластикации;  $t_5-t_7$  — продолжительность поддержания задаваемого режима создания давления;  $P_1, P_3, P_4$  — давление заполнения формы, формования, пластикации;  $P_2$  — наибольшее давление в форме

Соответствующей настройкой можно добиться снятия усилия до момента полного заполнения формы (рис. 4.34, г), что приводит к еще большему снижению усилий, возникающих в форме. В режиме (рис. 4.34, д) после нарастания давления до  $P_2$  оно через интервал времени  $t_5$  полностью снимается и через интервал  $t_6$  восстанавливается до первоначального  $P_2$  или меньшего  $P_3$  значения. Давление  $P_3$  можно устанавливать по истечении времени  $t_6$  или через некоторый задаваемый интервал  $t_7$  (4.34, е). Можно организовать режим (рис. 4.34, ж), в котором давление  $P_2$  снижается после заполнения формы до определенного регулируемого значения  $P_3$ , далее через интервал времени  $t_5$  уменьшается до нуля и через промежуток времени  $t_6$  восстанавливается до того же  $P_3$  или до другого значения  $P'_3$ . На рис. 4.34, з показано изменение давления при работе литьевой машины с предварительным сжатием расплава.

Системы регулирования позволяют реализовать различные интрузионные режимы работы литьевой машины (рис. 4.35), в которых форма заполняется при низком давлении (до 25 МПа) вращающимся шнеком или при различных комбинациях вращательного и поступательного движения шнека. Эти режимы применяют при переработке термостабильных полимеров или при изготовлении крупногабаритных толстостенных изделий. Объем отливки в интрузионных режимах может превышать номинальный в 2—3 раза. В режиме (рис. 4.35, а) шнек, находясь в переднем положении, вращается в течение времени  $t_1$  и заполняет форму. После этого шнек отходит назад для набора необходимой порции расплава ( $t_2$ ), а затем впрыскивает ее в форму ( $t_3$ ) и выдерживает полимер в форме с за-

данным усилием в течение времени  $t_4$ . В тех случаях, когда при изготовлении толстостенных изделий за один поступательный ход шнека не удается полностью компенсировать усадку, полимер в форму можно подавать несколько раз (рис. 4.35, б). Во избежание преждевременного охлаждения полимера в литниках (продолжительность заполнения может составлять 80 с и более) в начале цикла в форму впрыскивают небольшую порцию расплавленного полимера для получения на стенках литника и формы тонкой изолирующей пленки.

Режимы интрузии чаще применяют при изготовлении изделий с отношением длины пути расплава к толщине не более 70. Когда это отношение больше и для заполнения формы требуется высокое давление, применяют режим (рис. 4.35, з). В начале цикла шнек отведен назад и перед ним находится расплав. Форма заполняется вращающимся шнеком в течение времени  $t_1$ . Далее шнек движется вперед и впрыскивает полимер в форму ( $t_3$ ) с усилием, необходимым для полного заполнения формы. По окончании подпрессовки ( $t_4$ ) происходит пластикация ( $t_2$ ): шнек отходит в первоначальное положение для накопления определенной порции расплава, необходимой для впрыска в следующем цикле.

Режим (рис. 4.35, д) применяют, когда требуются высокие давление и скорость заполнения формы, а объем отливки за один ход

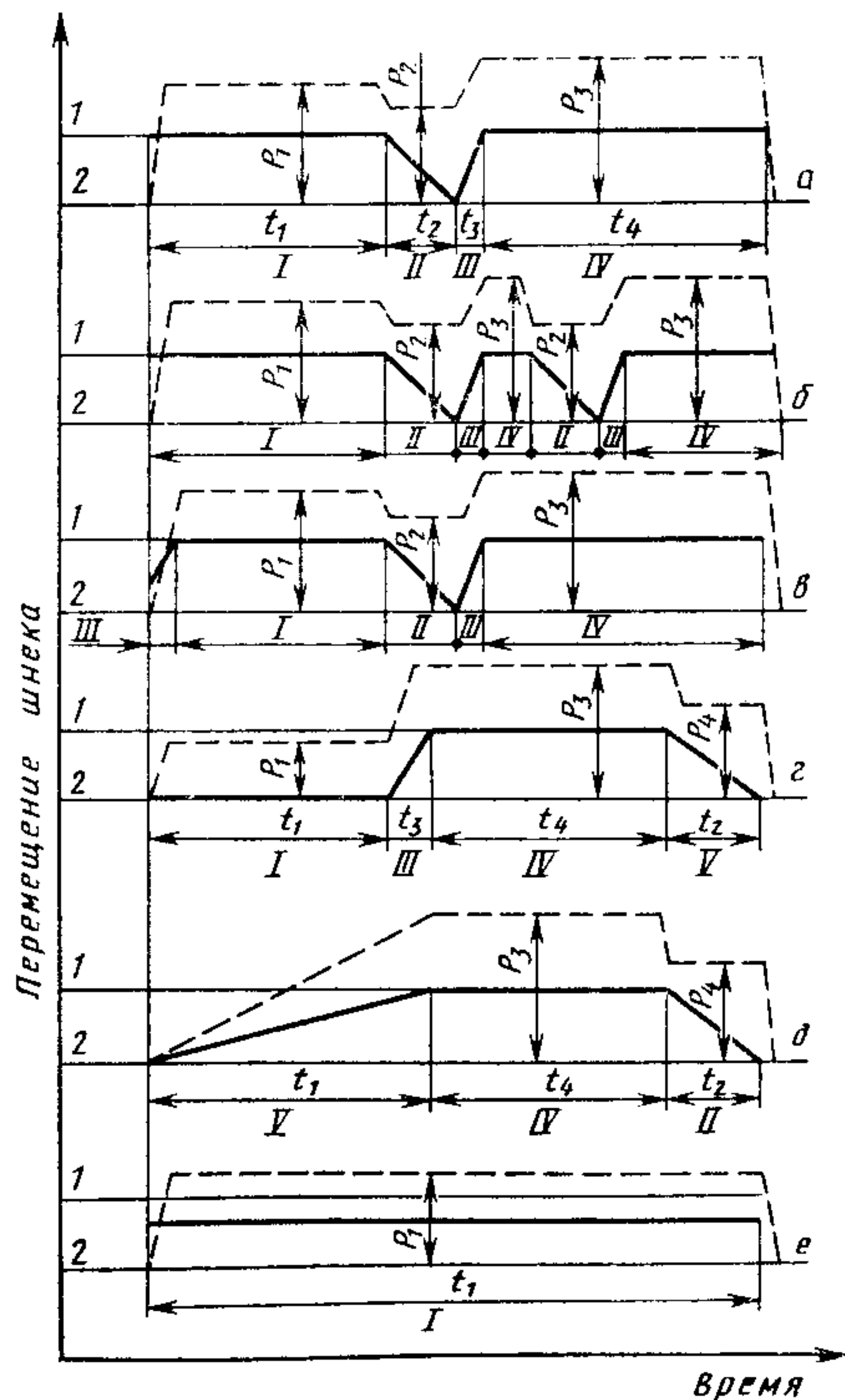


Рис. 4.35. Режимы интрузии:  
I, II, III, IV, V — шнек вращается, движется назад, движется вперед, неподвижен, вращается и движется; 1 и 2 — конец и начало хода шнека;  $P_1$  и  $P_3$  — давление заполнения и формования;  $P_2$  и  $P_4$  — давление пластикации; — — — — — перемещение шнека; — — — — — режим прикладываемого давления

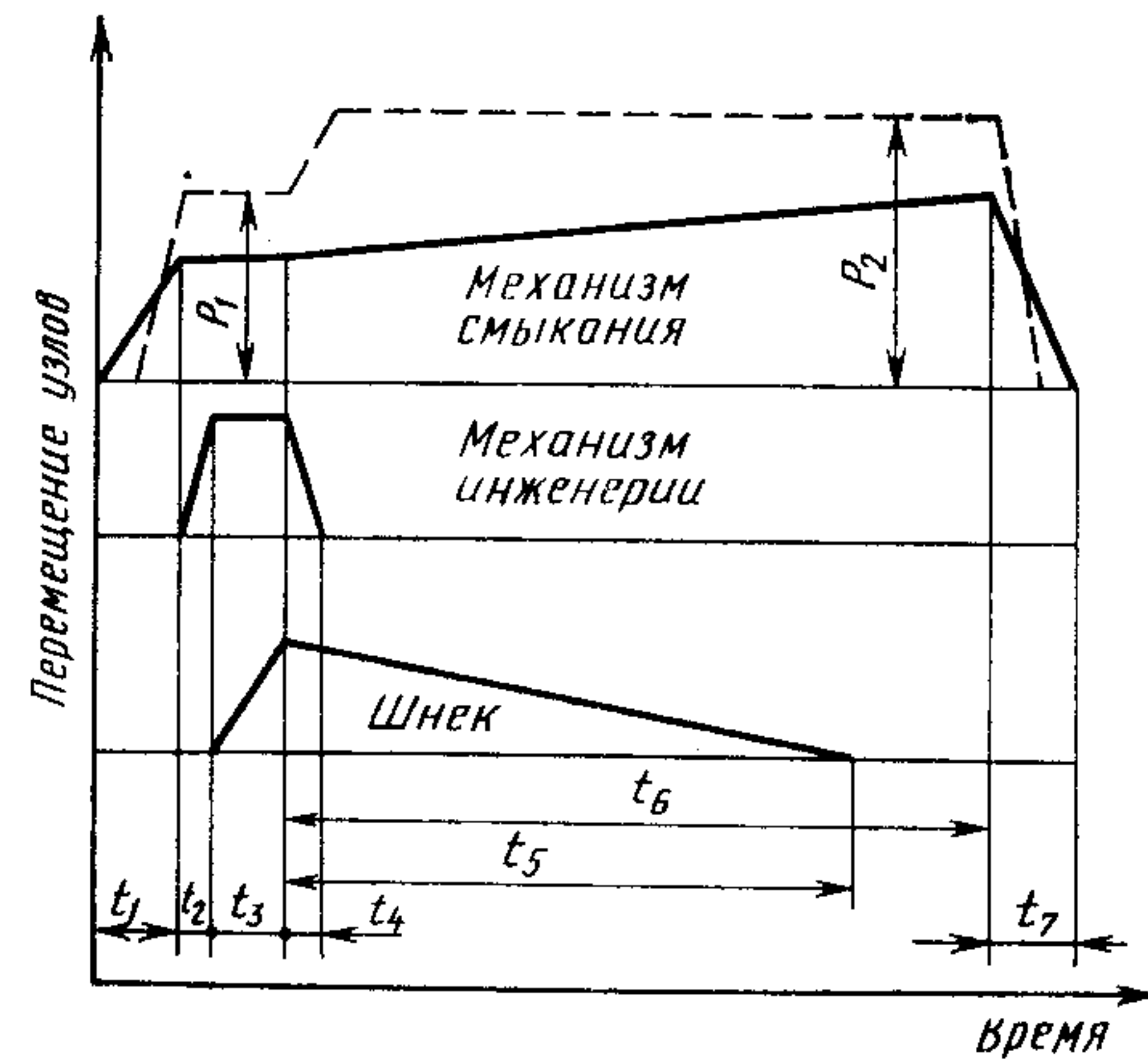


Рис. 4.36. Режим инъекционного прессования:

$t_1$  и  $t_7$  — продолжительность смыкания и размыкания формы;  $t_2$  и  $t_4$  — продолжительность подвода и отвода инъекционного узла;  $t_3$ ,  $t_5$ ,  $t_6$  — продолжительность впрыска, пластикации, охлаждения изделия в форме;  $P_1$  и  $P_2$  — давление смыкания и формования

шнека превышает номинальный до 40%. Форма заполняется при одновременном вращательном и поступательном движениях шнека ( $t_1$ ). После этого шнек удерживается ( $t_4$ ) в переднем положении с заданным усилием. При этом шнек может вращаться или быть неподвижным. Режим экструзии (рис. 4.35, е) можно применять при изготовлении толстостенных изделий, не требующих высоких давлений литья. В этом режиме заполнение формы и выдержка под давлением производятся вращающимся шнеком без осевого его перемещения.

Системы регулирования позволяют организовать режимы со ступенчатым изменением объемной скорости впрыска (см. рис. 4.13 и 4.14) для реализации постоянной скорости течения фронта потока расплава при заполнении формы с разным поперечным сечением для получения изделий с изотропными свойствами по длине и для изменения (регулирования) давления формования и его распределения по длине формы.

Системы регулирования позволяют организовать режим инъекционного прессования (рис. 4.36), в котором после предварительного смыкания полуформ прессовый узел дополнительно перемещается для компенсации усадки полимера в форме.

Литьевые машины в зависимости от назначения имеют разные режимы литья. Машины, предназначенные для переработки термопластов и комплектации специализированных цехов, целесообразно оснащать тремя режимами перемещения инъекционного узла, тремя режимами создания давления (рис. 4.34, а—в), одним интрузионным режимом (рис. 4.35, а) и режимом со ступенчатым изменением объемной скорости впрыска. Машины, предназначенные для небольших литьевых участков, кроме этих режимов дополнительно (при необходимости) оснащаются еще несколькими интрузионными режимами. Литьевые машины с объемом впрыска за цикл  $1000 \text{ см}^3$  и выше целесообразно оснащать четырьмя режимами создания давления (рис. 4.34, а—г) и несколькими интрузионными режимами.

Литьевые машины, предназначенные для переработки полимеров в лабораторных условиях и на малых литьевых участках, целесообразно оснащать всеми режимами перемещения инъекционного узла, несколькими режимами создания давления, несколькими интрузионными режимами и режимом со ступенчатым изменением объемной скорости впрыска. Режимы инъекционного прессования и предварительного сжатия расплава машины оснащают по специальному требованию.

#### 4.5. СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО КОНТРОЛЯ ГРУППЫ ЛИТЬЕВЫХ МАШИН

В условиях массового производства литьевых изделий из большого числа полимеров эффективность производства, высокое качество изделий и надежность работы литьевых машин обеспечивают системы централизованного контроля и регистрации работы группы машин. Основу таких систем составляют системы автоматического контроля и управления отдельными литьевыми машинами.

ВРЕМЯ .....										
ГРУППА МАШИН ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС:										
ПУЛЬТ КОНТРОЛЯ										
КОД МАШИНЫ	МØ1	МØ2	МØ3	МØ4	МØ5	МØ6	МØ7	МØ8	МØ9	МØ10
КОД ФОРМЫ	Ф17	Ф19	Ф53	Ф22	Ф23	Ф14	Ф11	Ф38	Ф37	Ф99
Ø1	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Ø2	.....	.....	.....	.....	.....	*	.....	.....	.....	.....
Ø3	.....	.....	*	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Ø4	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Ø5	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	*
Ø6	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Ø7	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Ø8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Ø9	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
10	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
11	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
12	.....	.....	.....	.....	.....	.....	*	.....	.....	.....
13	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
14	.....	*	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
15	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
16	.....	.....	*	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
17	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
18	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	*	.....	.....
19	ØØØ	175	325	19Ø	ØØØ	128	ØØØ	16Ø	43Ø	26Ø

Рис. 4.37. Информационное табло центрального пульта контроля. Цифры по вертикали:

1 — длительность операций цикла; 2 — щит электрических и электронных приборов контроля; 3 — потребление энергии электродвигателями; 4 — сопротивления нагревателей пластикационного цилиндра; 5 — приборы контроля гидравлической системы; 6 — максимальное усилие запираания; 7 — минимальное усилие запираания; 8 — уровень полимера в бункере; 9 — «подушка» полимера по окончании впрыска; 10 — давление в форме; 11 — давление в гидроцилиндре впрыска; 12 — низкое давление при смыкании; 13 — давление при пластикации; 14 — температура полимера; 15 — температура формы; 16 — скорость перемещения шнека; 17 — давление литья; 18 — частота вращения шнека; 19 — итого полезных циклов

На центральный пульт системы контроля поступает информация о работе каждой машины литейного участка или цеха. Эта информация подается от устройств контроля, установленных на каждой машине. При отклонении некоторого контролируемого параметра машины от заданного или при аварийном состоянии какой-либо машины на информационном табло появляется сигнал, регистрирующий это. Все поступающие данные одновременно фиксируются печатным устройством. Оператор центрального пульта анализирует

ВРЕМЯ .....				
МАШИНА 1Ø				
ФОРМА Ф99				
Ø5 ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ				
ТЕМПЕРАТУРА МАСЛА				°C
МИН		МАКС		ЗАМ.
3Ø		4Ø		45
МАШИНА В ДЕЙСТВИИ				
КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ				
				АВАР СИГН
				*
				*

Рис. 4.38. Табло с информацией о состоянии гидравлической системы: пример аварийной сигнализации при превышении температуры масла выше максимального значения (зам. — замеренная)

полученную информацию и сообщает обслуживающему персоналу о необходимости наладки отдельных контролируемых параметров машин или об аварийном состоянии машин, предупреждает также о возможности наступления критических условий работы или снижения качественных показателей изделий.

В централизованную систему входят устройства для приема поступающих сигналов о работе каждой машины с преобразованием их в цифровую форму, центральный блок с запоминающим устройством, экран с видеоинформацией, клавиатура, быстрое печатающее устройство. В связи с большим числом сигналов, поступающих с каждой машины, и большим количеством контролируемых машин, а также в связи с тем, что от системы требуется высокая надежность, предусматривают наличие повторителей устройств для приема сигналов от каждой отдельной машины, чтобы они в случае необходимости могли работать автономно.

Централизованная система может выполнять следующие функции: подавать предупредительный сигнал при нарушении цикла и выявлять причины, вызывающие эти нарушения, сопоставлять действительные параметры работы машин с заданными на протяжении нескольких циклов, чтобы выявлять и предупреждать возможные изменения параметров или нарушения работы машин, преобразовывать сигналы в цифровые данные и показывать их на экране видеоинформации, печатать все данные, поступающие в течение рабочей смены от каждой машины, и затем печатать краткую итоговую информацию для дальнейшего анализа работы машины. На этой стадии к системе не предъявляют требования по регулированию параметров машин, так как его выполняют автоматические системы управления отдельными машинами.

При работе системы на центральном экране появляется схема (рис. 4.37) с изображением номеров, кодирующих машины и формы (по горизонтали) и опознавательных знаков контролируемых параметров (по вертикали). Когда на какой-либо машине происходит авария или контролируемый параметр выходит за заданные пределы,

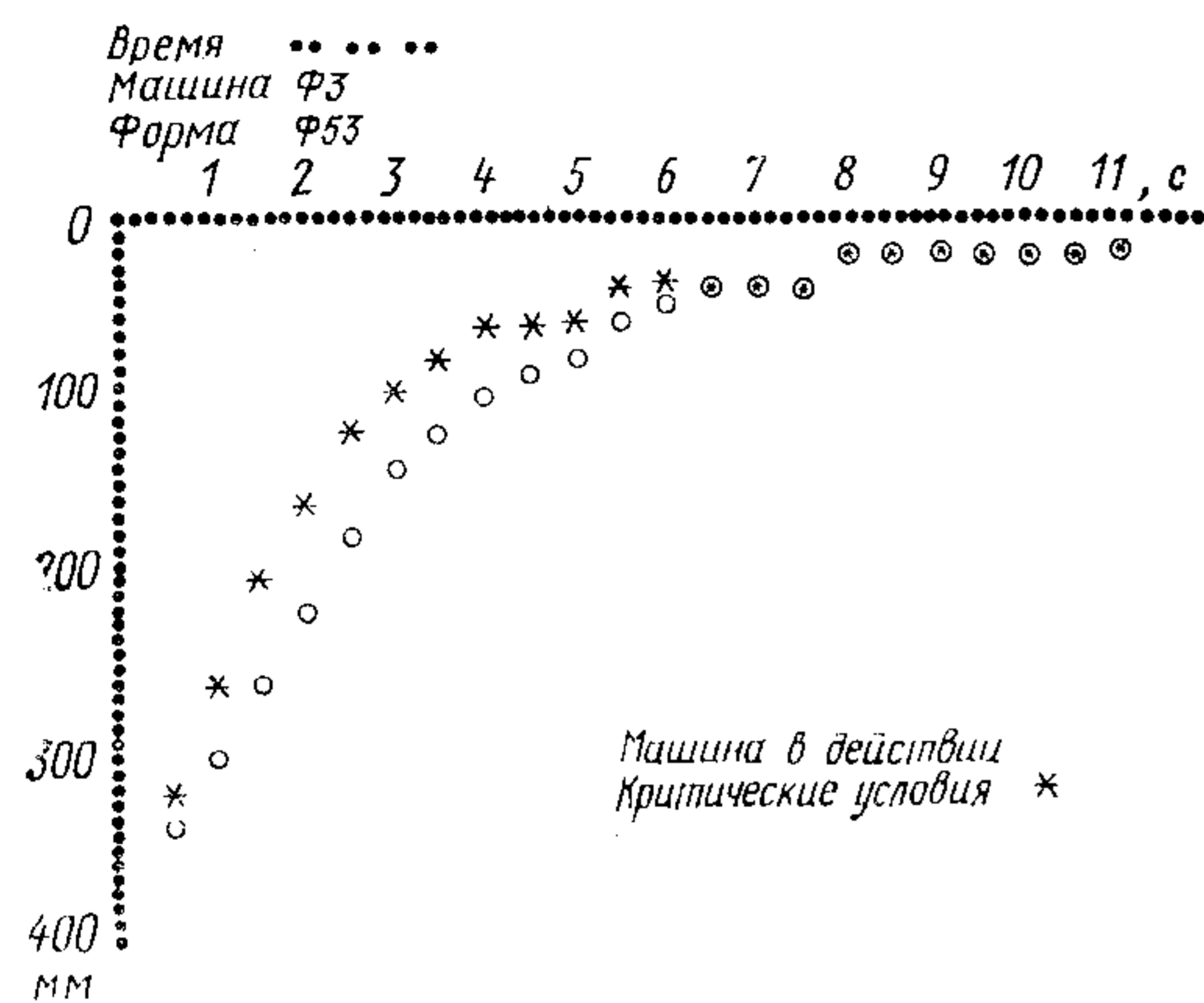


Рис. 4.39. Табло с информацией о скорости перемещения шнека — пути перемещения шнека, в зависимости от затраченного времени:  $\circ$  — действительная скорость, \* — оптимальная (заданная) скорость

шествующей неполадки, печатающее устройство с помощью запоминающего блока записывает информацию об этом состоянии.

Некоторые параметры контролируются в определенный момент цикла, за ходом изменения других, например температуры, давления формования, скорости перемещения поршня, можно следить в течение всего цикла (рис. 4.39). При этом кривые изменения измеренных значений сопоставляются с заданными кривыми, при которых изделия получают требуемого качества. Можно запросить информацию о значениях контролируемого параметра в предшествующих циклах (рис. 4.40). В конце смены делают анализ собранных данных,

ВРЕМЯ .....					
МАШИНА	80				
ФОРМА	Ф38				
12 — СМЫКАНИЕ ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ	МПа				
	МИН	МАКС	ЗАМ	АВАР	СИГН
ПОСЛЕДНИЙ ЦИКЛ	3	4	4,5		*
ПРЕДЫДУЩИЙ ЦИКЛ	3	4	3,8		
—1	3	4	3,5		
—2	3	4	3,9		
—3	3	4	3,4		
—4	3	4			
МАШИНА В ДЕЙСТВИИ					
КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ	*				

Рис. 4.40. Табло с информацией о смыкании при низком давлении: пример аварийной сигнализации в последнем цикле

на экране появляется звездочка напротив машины и параметра. По этому первичному сигналу оператор нажимом на специальную клавишу запрашивает экран о действительном значении параметра, который вышел за заданные пределы, о значениях этих пределов (рис. 4.38) и сигнализирует о неполадке наладчикам. Одновременно печатающее устройство записывает все, что показывается на экране видеoinформации. Если при этом возникло другое аварийное состояние, которое не может заметить оператор в связи с выявлением причин пред-

на основе которых производят предупредительный ремонт машин, когда обнаруживается статистическая повторяемость в неполадках. Пульт обработки данных позволяет корректировать пределы, в которых может изменяться контролируемый параметр, если в этом выявилась необходимость.

Статистические данные о работе машины (начало и конец работы, наименование изделия и его масса, перерабатываемый полимер, гнездность, продолжительность цикла, количество выполненных циклов и изготовленных изделий, эффективное время работы машины и время простоя) запоминаются и могут выдаваться на экран видеoinформации для контроля и статистики.

#### 4.6. ГИДРОПРИВОД ЛИТЬЕВОЙ МАШИНЫ С СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Различные механизмы литейной машины выполняют операции в цикле литья с помощью гидропривода (рис. 4.41). При подаче рабочей жидкости в поршневую полость гидроцилиндра 1 шток 2 под действием развиваемого в полости давления приводит в движение гидромеханический механизм смыкания 3. При поступлении рабочей жидкости в поршневую полость гидроцилиндра 4 шток 5 обеспечивает выталкивание сформованного изделия. Шнек 7 приводится во вращение гидродвигателем 9. Инжекционный цилиндр 6 перемещается к форме (сопло прижимается к литниковой втулке) штоком 11 под действием давления, развиваемого в штоковой полости гидроцилиндра 10 при поступлении в нее рабочей жидкости. При подаче рабочей жидкости в поршневую полость гидроцилиндра 13 шток 12

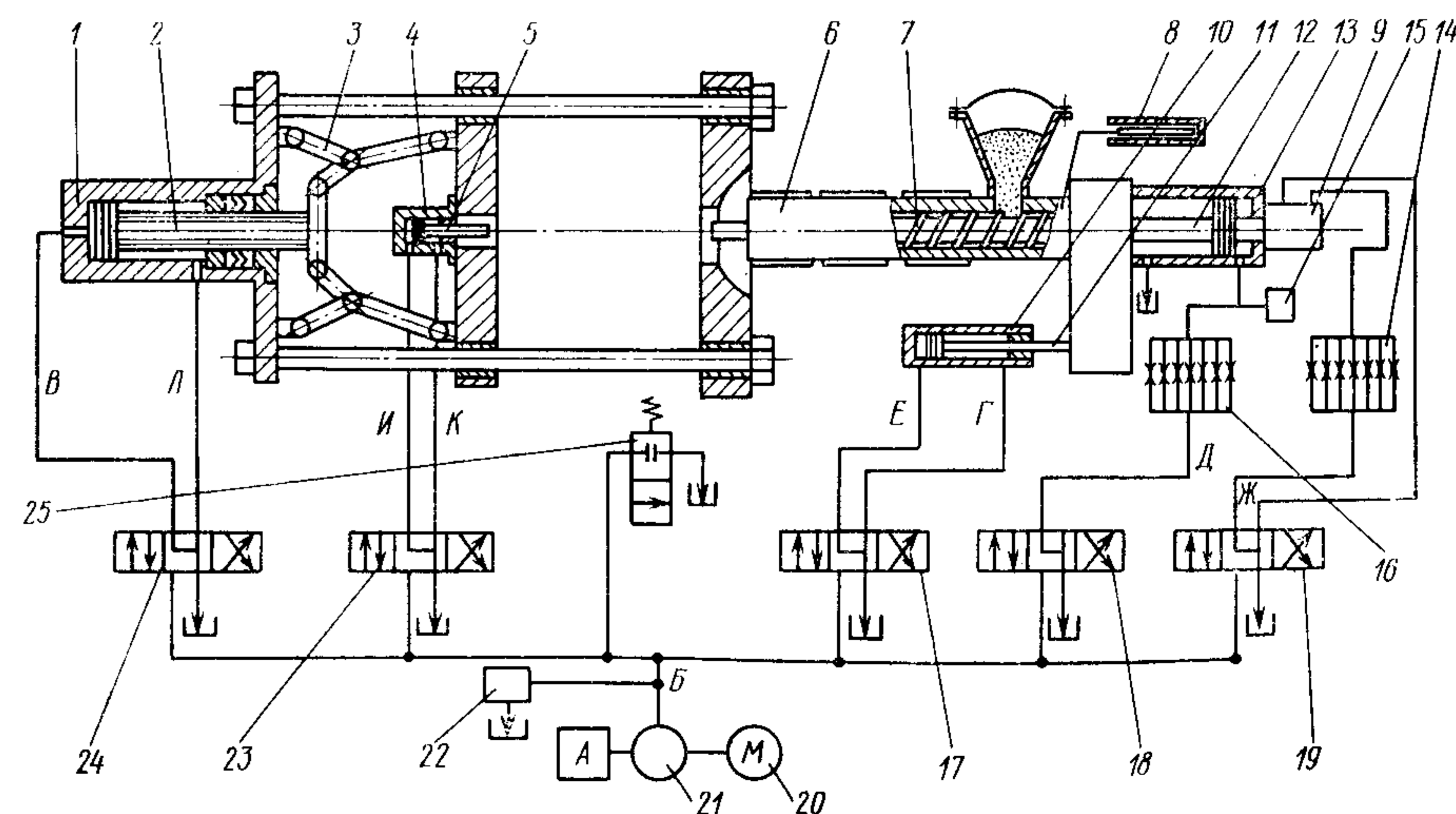


Рис. 4.41. Принципиальная схема гидропривода машины с системой автоматического управления

движется вперед и перемещает шнек 7, в результате чего полимер поступает в форму. От развиваемого в гидроцилиндре 13 давления зависит давление, прикладываемое к полимеру в форме в течение периода выдержки под давлением. Движение шнека при впрыске регистрируется устройством 8. Электродвигатель 20 приводит в движение насос 21, который через фильтр А засасывает рабочую жидкость и подает ее в магистраль Б. Максимальное давление в системе регулирует клапан 22. Если блокировка 25 не приведена в действие, жидкость поступает на слив и давление в магистрали Б не создается.

Цикл литья начинается с включения золотника 24. Рабочая жидкость через этот золотник по линии В поступает в поршневую полость цилиндра 1, и шток 2 запирает механизм смыкания 3. Включение золотника 17 открывает линию Г, и рабочая жидкость поступает в штоковую полость цилиндра 10, в результате чего шток 11 перемещает инжекционный цилиндр 6 к форме и сопло прижимается к литниковой втулке. Далее включается золотник 18, рабочая жидкость по линии Д подается в поршневую полость цилиндра 13, и перемещение штока 12 сообщает движение шнеку 7 — полимер впрыскивается в форму.

Следящий механизм 8 контролирует действительную скорость перемещения шнека, сравнивает ее с заданной и в зависимости от знака и значения рассогласования через совокупность автоматически включающихся дросселей 16 корректирует ее. По окончании заполнения формы, которое регистрируется по изменению скорости увеличения давления формования, посредством клапана давления 15 организуется режим создания давления. По окончании выдержки полимера под внешним давлением подается команда на золотник 17 и рабочая жидкость по линии Е поступает в поршневую полость цилиндра 10, а по линии Г из штоковой полости этого цилиндра идет на слив. Инжекционный цилиндр 6 отводится от формы.

Далее подается команда на золотники 18 и 19. Поршневая полость цилиндра 13 соединяется со сливом, а через золотник 19 по линии Ж рабочая жидкость поступает в гидродвигатель 9, который сообщает вращение шнеку 7. При вращении набирается порция расплава к впрыску, и шнек отходит назад. Следящий механизм 8 контролирует скорость перемещения шнека, сравнивает ее действительное значение с заданным и в зависимости от знака и значения рассогласования через систему дросселей 14 корректирует скорость.

По окончании набора порции полимера золотник 19 выключается. После охлаждения полимера в форме подается команда на золотник 24 и рабочая жидкость из поршневой полости цилиндра 1 по линии В поступает на слив, а по линии Л — в его штоковую полость. Механизм смыкания раскрывается. Далее при включении золотника 23 рабочая жидкость по линии И поступает в поршневую полость цилиндра 4 и шток 5 сбрасывает изделие. При переключении золотника 23 жидкость по линии К поступает в штоковую полость цилиндра 4, шток 5 возвращается в исходное положение.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1  
Технические характеристики отечественных однопозиционных машин для литья под давлением полимеров

Параметр	ДБ 3121-16	ДБ 3124-32	ДБ 3127-63	Д 3130-125 Д 3130-95 Д 3130-170	Д 3132-250 Д 3132-190 Д 3132-340	Д 3134-500 Д 3134-380 Д 3134-670	Д 3136-1000 Д 3136-750 Д 3136-1320	Д 3138-2000	Д 3140-4000 Д 3140-5300
Номинальный объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6, \text{ м}^3$	16	32	63	125 95 170	250 190 340	500 380 670	1000 750 1320	2000	4000 5300
Номинальное давление литья, МПа	112	112	132	132 180 100	132 180 100	132 180 100	132 180 100	132	132 100
Объемная скорость впрыска $Q_{впр} \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$	30	47	60	78 78 78	150 120 210	192 146 —	400 230 400	—	655 800
Диаметр шнека $D \cdot 10^3, \text{ м}$	22	26	36	40 36 45	50 45 60	60 50 70	80 70 90	100	115 130
Частота вращения шнека, об/мин	20—240	20—240	20—400	20—200 20—240 20—240	20—320 40—400 40—400	10—220 10—220 10—150	10—180 10—180 10—180	10—166	10—120 10—120
Наибольшая пластичная способность по полистиролу (теоретическая), кг/ч	18	31	38	75 80 90	85 87 95	114 87 154	200 155 255	—	530 600
Номинальное усилие за- пирания формы, кН	125	250	500	1000	1600	2500	4000	6300	10000

Параметр	ДБ 3121-16	ДБ 3124-32	ДБ 3127-63	Д 3130-125 Д 3130-95 Д 3130-170	Д 3132-250 Д 3132-190 Д 3132-340	Д 3134-500 Д 3134-380 Д 3134-670	Д 3136-1000 Д 3136-750 Д 3136-1320	Д 3138-2000	Д 3140-4000 Д 3140-3300
Ход подвижной плиты $H_x \cdot 10^3$ , м	160	200	250	320	400	500	630	850	1120
Высота устанавливаемого инструмента* $H_{\Phi} \cdot 10^3$ , м	160; 110	200; 125	250; 140	320; 160	400; 200	500; 250	630; 320	800; 400	1000; 500
Расстояние между колоннами в свету** $a \cdot 10^3$ , м	200; 150	250; 200	320; 250	400; 320	500; 400	500; 500	630; 630	800; 800	1000; 1000
Наибольший ход шнека $H_{ш} \cdot 10^3$ , м	55	75	90	160	180	250	250	—	480
Суммарная мощность, кВт:									
электродвигателей	5,5	7,5	17	18,5—18,7	40—40,2	43—44,5	43—43,2	81	125
электронагревателей	1,6	2,4	5,5	5,5	5—9,6	10,5—12,9	12,3—19,1	27,2	36
Длина $\times$ ширина $\times$ высота, м	$2,29 \times 1,1 \times 1,6$	$2,62 \times 1,1 \times 1,67$	$3,65 \times 0,825 \times 1,75$	$5 \times 1,042 \times (1,8 \div 2,15)$	$(5,16 \div 5,53) \times 1,1 \times 1,98$	$6,14 \times 1,48 \times (2,22 \div 2,5)$	$(7,62 \div 7,9) \times 1,74 \times 2,61$	$9,8 \times 2,68 \times 2,59$	$11,17 \times 2,6 \times 2,52$
Масса машины с гидроборудованием, т	1,2	1,473	3	4,8—6,7	8,54—9	11,8—13,5	21,5	33,1	50,9—51

\* Первая цифра — наибольшая высота инструмента, вторая — наименьшая.

\*\* Первая цифра — горизонтальное расстояние между колоннами, вторая — вертикальное.

## Приложение 2

## Критерии подобия

Параметр	Формулы для расчета критериев подобия	Расчет параметров единичных машин определенного ряда по входному параметру		Критерии подобия						
		Формулы для расчета параметров	Расчетные значения параметров							
Объем впрыска за цикл $v \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup>	$\Phi$	8	16	32	63	125	250	500	1000	2
Толщина детали $h \cdot 10^3$ , м	$K_h$	2,14	2,44	2,78	3,17	3,61	4,12	4,7	5,35	1,14
Площадь литья $S \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup>	$K_S = \Phi / K_h$	37,4	65,5	115	200	351	614	1074	1880	1,75
Высота детали $H \cdot 10^3$ , м	$K_H = (\Phi / K_h)^{1/2}$	54,5	71,9	95	125	166	218	288	381	1,32
Ход подвижной плиты $H_x \cdot 10^3$ , м	$K_{H_x} = K_H$	106	140	185	244	322	425	561	740	1,32
Максимальное расстояние между плитами $H_{пл} \cdot 10^3$ , м	$K_{H_{пл}} = K_H$	212	280	369	488	644	850	1121	1480	1,32
	$K_{H_{\Phi}} = K_H$	106	140	185	244	322	425	561	740	1,32
Высота формы $H_{\Phi} \cdot 10^3$ , м	—	36,4	48	63,4	83,7	111	146	193	254	1,32
		100	110	125	140	160	200	250	320	320
Время впрыска $t_{впр}$ , с	$K_t = K_h^2$	0,4	0,52	0,68	0,88	1,14	1,49	1,93	2,5	1,3



Параметр	Формулы для расчета критериев подобия	Расчет параметров единичных машин определенного ряда по входному параметру										Критерий подобия
		Расчетные значения параметров										
		Формулы для расчета параметров										
Давление литья $P_d$ , МПа	$K_P = \varphi^{(1+n)/2} \times K_h^{-(7n+3)/2}$	80	89,6	100	112	126	141	158	177	1,12		
Усилие заклипания формы $F$ , кН	$K_F \approx K_S^*$ $K_F \approx K_S K_P^{**}$	93,5	164	286	501	877	1535	2686	4700	1,75		
Усилие раскрытия формы $F_p$ , кН	$K_{F_p} \approx K_S$	9,4	16,4	28,6	50,1	87,7	154	269	470	1,75		
Пластикционная способность $q_{пл}$ , кг/ч	$K_q = \varphi / K_h^2$	9,6	14,8	22,8	39,8	69,7	103	165	255	1,54		
Быстроходность $B$ , циклов/ч	$K_B = 1 / K_h^2$	—	18	31	38	75	85	114	200			
Жесткость $C \cdot 10^{-6}$ , Н/м	$K_C = K_S / K_h$	1950	1502	1156	890	685	528	406	313	0,77		

Примечания: 1. Верхние цифры расчетные, нижние по ГОСТ 10767-71.  
2.  $\alpha = 0,19$ ;  $K_1 = 1,99 \cdot 10^{-2}$ ;  $K_2 = 5,09 \cdot 10^1$ ;  $K_3 = 6,34$ ;  $K_4 = 1,23 \cdot 10^1$ ;  $K_5 = 2,46 \cdot 10^1$ ;  $K_6 = 4,24$ ;  $K_7 = 3,47 \cdot 10^1$ ;  $K_8 = 1,27 \cdot 10^2$ ;  $K_9 = 1,27 \cdot 10^2$ ;  $K_{10} = 1,6 \cdot 10^4$ ;  $K_{11} = 2,25 \cdot 10^1$ ;  $K_{12} = 5,67 \cdot 10^2$ .

\* Для литьевых машин со сбросом давления.  
\*\* Для литьевых машин без сброса давления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Басов Н. И. Исследование процессов и оборудования для литья под давлением: Автореферат докт. дис. Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1973. 36 с.
- Виноградов Г. В., Малкин А. Я. Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 438 с.
- Гурвич С. Г., Ильяшенко Г. А., Мочман Ш. Е. Расчет и конструирование машин для переработки пластических материалов. М.: Машиностроение, 1970. 296 с.
- Завгородний В. К., Калинин Э. Л., Марам Е. И. Литьевые машины для термопластов и реактопластов. М.: Машиностроение, 1968. 374 с.
- Казанков Ю. В. Закономерности периодической шнековой пластикации и литьевого формования полимеров: Методы расчета и совершенствование конструкций оборудования: Автореферат докт. дис. М.: МИХМ, 1980. 36 с.
- Калинчев Э. Л. Технологические основы автоматического управления литьевыми процессами при переработке пластмасс: Обзор. М.: НИИТЭхим, 1973. 40 с.
- Калинчев Э. Л., Кацевман М. Л. Автоматизация технологического процесса изготовления изделий на литьевых машинах: Обзор. М.: НИИМаш, 1979. 72 с.
- Калинчев Э. Л., Кричевер А. И. Автоматизированные литьевые машины и системы управления ими: Обзор. М.: НИИМаш, 1980. 48 с.
- Калинчев Э. Л., Саковцева М. Б. Свойства и переработка термопластов: Справочное пособие. Л.: Химия, 1983. 288 с.
- Кругляченко Г. Н., Кричевер И. С., Найгуз Н. И. Термопласты. М.: Машиностроение, 1966. 280 с.
- Лапшин В. В. Основы переработки термопластов литьем под давлением. М.: Химия, 1974. 270 с.
- Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
- Саковцева М. Б. Исследование реологических свойств поликарбоната, полиацеталий, полиамида-12 и расчет процессов течения при формовании литьем под давлением: Автореферат канд. дис. М.: НИИПМ, НПО «Пластмассы», 1978. 23 с.
- Симонов-Емельянов И. Д. Расчет параметров процесса литья под давлением с использованием инжекционной характеристики литьевой машины. — Пластические массы, 1981, № 3, с. 39.
- Торнер Р. В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов). М.: Химия, 1977. 464 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3	2.7. Расчет параметров оснастки . . . . .	134
Условные обозначения . . . . .	4	<i>Глава 3. Расчет и конструирование инжекционных и прессовых узлов литьевых машин . . . . .</i>	
<i>Глава 1. Технологические процессы литья пластмасс под давлением и их математическое описание . . . . .</i>	5	3.1. Классификация инжекционных узлов . . . . .	146
1.1. Назначение литьевого оборудования . . . . .	5	3.2. Расчет инжекционных узлов . . . . .	150
1.2. Процессы формования и их математическое описание		3.3. Конструирование инжекционных цилиндров, сопел и шнеков для переработки различных полимеров . . . . .	156
1.2.1. Изменение давления в процессе формования . . . . .	12	3.4. Расчет геометрических параметров и размеров шнеков . . . . .	166
1.2.2. Период заполнения формы . . . . .	15	3.5. Новые конструкции инжекционных узлов . . . . .	179
1.2.3. Период нарастания давления . . . . .	34	3.6. Классификация прессовых узлов . . . . .	183
1.2.4. Период спада давления . . . . .	50	3.7. Расчет узлов запираания . . . . .	185
1.2.5. Математическое описание процессов формования . . . . .	55	3.8. Устройства для наладки и эксплуатации прессовых узлов . . . . .	192
1.3. Процессы пластикации полимеров в шнековых инжекционных узлах . . . . .	80	<i>Глава 4. Разработка систем управления литьевыми машинами . . . . .</i>	
<i>Глава 2. Параметры литьевых машин и их расчет . . . . .</i>	89	4.1. Классификация систем управления . . . . .	198
2.1. Параметры литьевых машин . . . . .	89	4.2. Системы автоматического регулирования технологических параметров литья и продолжительности операций цикла . . . . .	201
2.2. Математические методы расчета и оптимизации параметров литьевых машин, критерии подобия параметров . . . . .	99	4.3. Самонастраивающиеся системы управления . . . . .	219
2.3. Выбор типоразмера литьевой машины для изготовления изделий . . . . .	126	4.4. Режимы литья . . . . .	242
2.4. Выбор количества литьевых машин для организации производства . . . . .	128	4.5. Системы централизованного контроля группы литьевых машин . . . . .	245
2.5. Производительность совокупности литьевых машин . . . . .	129	4.6. Гидропривод литьевой машины с системой автоматического управления . . . . .	249
2.6. Сравнение машин по параметрам . . . . .	131	Приложения . . . . .	251
		Список литературы . . . . .	255