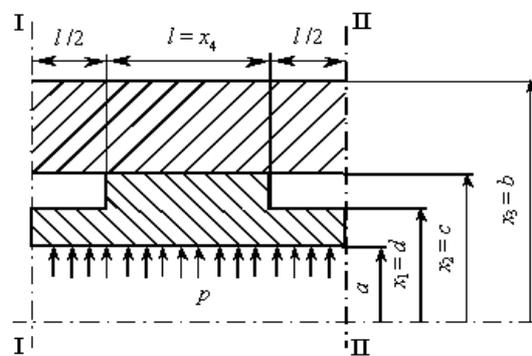


# ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ



◆ Издательство ТГТУ ◆

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Тамбовский государственный технический университет"

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМНЫХ И  
КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Методические указания



---

Тамбов  
Издательство ТГТУ  
2005

УДК 678.023.001.2(075)  
ББК Л710-5я73-1  
О62

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Р е ц е н з е н т ы:

Кандидат технических наук, профессор  
*А.А. Контев*

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
заместитель директора ОАО НИИРТМАШ  
*В.Н. Шашков*

062      Оптимизация режимных и конструктивных параметров технологического оборудования: Методические указания / Сост.: М.В. Соколов, А.С. Клинков, П.С. Беляев; Тамбов: ТГТУ, 2004. 32 с.

Методические указания предназначены для проведения лабораторных работ по курсу "Оптимизация режимных и конструктивных параметров технологического оборудования" студентами-магистрантами, обучающимися по направлению 150400 "Технологические машины и оборудование" по программе 150426 "Технологические процессы, машины и оборудование комплексной химической переработки растительных полимеров".

Изучение курса и проведение лабораторных работ студентами-магистрантами способствует успешному освоению разделов проектирования нового оборудования или модернизации действующего, необходимых при выполнении магистерской диссертации и в практической работе.

УДК 678.023.001.2(075)  
ББК Л710-5я73-1

© Тамбовский государственный  
технический университет  
(ТГТУ), 2005

Учебное издание

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Составители:

СОКОЛОВ Михаил Владимирович  
КЛИНКОВ Алексей Степанович  
БЕЛЯЕВ Павел Серафимович

Редактор Т.М. Федченко

Инженер по компьютерному макетированию И.В. Евсеева

Подписано к печати 18.11.2005

Формат 60 × 84 / 16. Бумага офсетная. Печать офсетная  
Гарнитура Times New Roman. Объем: 1,86 усл. печ. л.; 1,90 уч.-изд. л.  
Тираж 100 экз. С. 795<sup>М</sup>

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Цель работы:** изучить методы оптимизации конструктивных и технологических параметров процесса и оборудования переработки полимерных материалов на примере метода итерации и метода скользящего допуска (МСД), а также разработать блок-схему и программное обеспечение для построения линий уровня трех функций состояния при трех переменных управления.

### ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

#### 1.1 Методы оптимизации

Существует много методов оптимизации. Одним из методов нелинейного программирования является метод скользящего допуска (МСД). Этот метод нелинейного программирования в настоящее время достаточно хорошо исследован, отмечены преимущества данного метода и недостатки других. Поэтому, исходя из условия быстрейшего действия и удобства организации ограничений в виде равенств и неравенств используют метод скользящего допуска (МСД) [1].

Алгоритм МСД позволяет улучшить значение целевой функции как за счет информации в допустимых точках пространства решений, так и за счет информации при прохождении через некоторые точки лежащие вне допустимой области, но которые являются близкими к допустимым. В ходе оптимизационного поиска интервалы, в пределах которых точки можно считать почти достижимыми, постепенно сокращаются так, что в пределе учитываются только допустимые точки  $x$ .

С учетом такой стратегии оптимального поиска задачу оптимизации конструктивных и технологических параметров процесса и оборудования переработки полимерных материалов можно заменить более простой при единственном ограничении в виде неравенства, а именно задачей имеющей следующую структуру:

$$\text{минимизировать } f(x), x \in E^n, \quad (1.1)$$

$$\text{при ограничении } \Phi^{(k)} - T(x) \geq 0, \quad (1.2)$$

где  $E^n$  – заданная область изменения варьируемых параметров  $x$ ,  $\Phi^{(k)}$  – значение скользящего допуска на  $k$ -ом этапе поиска, определяемый соотношениями:

$$\Phi^{(k)} = \left\{ \begin{array}{l} \min \left[ \Phi^{(k-1)}, (m+1) / (r+1) \sum_{i=1}^{r+1} x_i^{(k)} - x_{r+2}^{(k)} \right], \\ \Phi^{(0)} = 2(m+1)t, \end{array} \right. \quad (1.3)$$

где  $t$  – величина шага вычисления,  $r = n - m$  – число степеней свободы целевой функции  $f(x)$ ,  $T(x)$  – положительно определенный функционал над множеством всех функций, задающих ограничения (как в виде равенств, так и в виде неравенств) определяемый соотношением

$$T(x) = \left[ \sum_{i=1}^m h_i^2(x) + \sum_{i=m+1}^p u_i g_i^2(x) \right], \quad (1.4)$$

где  $u_i$  – оператор Хевисайда, обладающий свойствами

$$u_i = 0 \text{ при } g_i(x) \geq 0 \text{ и } u_i = 1 \text{ при } g_i(x) < 0. \quad (1.5)$$

Общая схема работы алгоритма МСД состоит в следующем. По мере развития оптимизационного поиска значение  $\Phi^{(k)}$  уменьшается, что приводит к сужению области квазидопустимости. И процедура минимизации  $f(x)$  отделяется от этапов, служащих для выполнения ограничений (1.5).

Систему уравнений (1.1) можно решать относительно одного параметра  $x_i$  [остальные  $x_k$  ( $k \neq i$ ) фиксированы] с заданной точностью

$$|K_j^n(x_i) - 1| \leq \varepsilon,$$

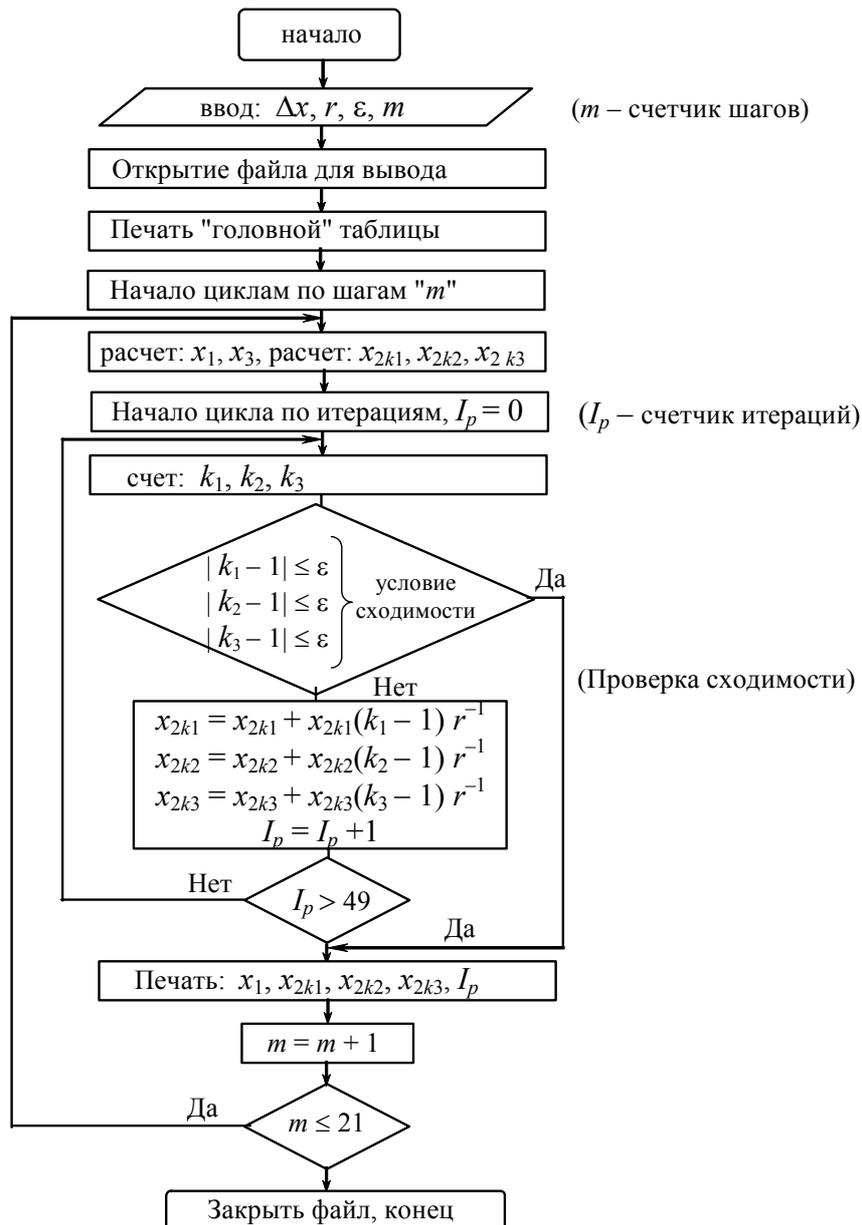
где  $\varepsilon$  – сколь угодно малое число. Для этого используют итерационный метод, основанный на формуле

$$x_i^{(p+1)} = x_i^{(p)} + x_i^{(p)} r^{-1} [K_j(x_i^{(p)}) - 1], \quad (1.6)$$

где  $p$  – номер итерации;  $r$  – параметр, определяющий сходимость итерационного процесса.

В первом приближении решение системы (1.1) позволяет определить параметры, с помощью программы "ITERA" (см. блок-схему рис. 1).

В окончательном виде решение системы (1.1) позволяет определить параметры, по методу скользящего допуска с помощью программы "Optimization" (см. блок-схему рис. 2).



**Рис. 1.1** Блок-схема алгоритма итерации решения системы трех нелинейных уравнений для трех параметров управления  $x_i$

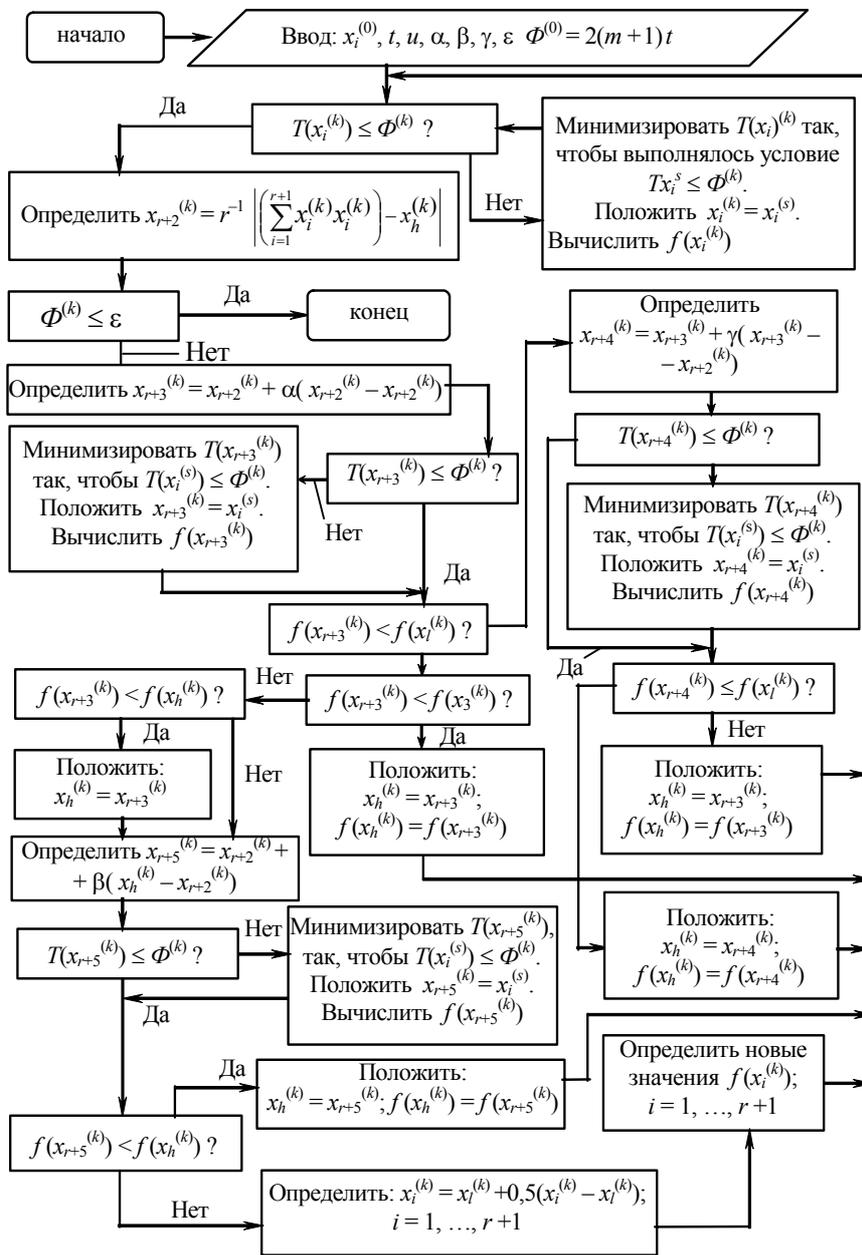
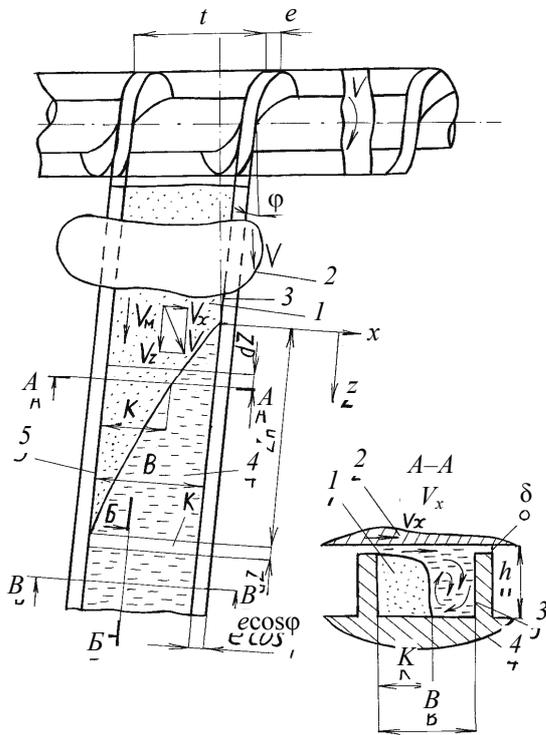


Рис. 1.2 Блок-схема алгоритма метода скользящего допуска (МСД)

## 1.2 Линии уровня функций состояния (на примере шнекового узла пластикации) [2]

При решении оптимизационной задачи при изотермическом и неизотермическом течении ньютоновских материалов рассматривалась плоская модель шнекового узла пластикации, реализующая условие двумерного течения для шнека с цилиндрическим сердечником (рис. 3).



**Рис. 1.3 Физическая модель работы шнековой машины**

Выбран следующий вектор переменных управления:

$$x_1 = \varphi_0; \quad x_2 = h; \quad x_3 = D; \quad x_4 = L; \quad x_5 = \omega_0.$$

Выбраны следующие функции состояния:

– перепад давления по длине шнека

$$f_1(x) = \Delta P_u = \frac{dP}{dz} l = \frac{dP}{dz} \frac{L}{\sin \varphi_0}; \quad (1.7)$$

– мощность затрачиваемая на процесс пластикации перерабатываемого материала

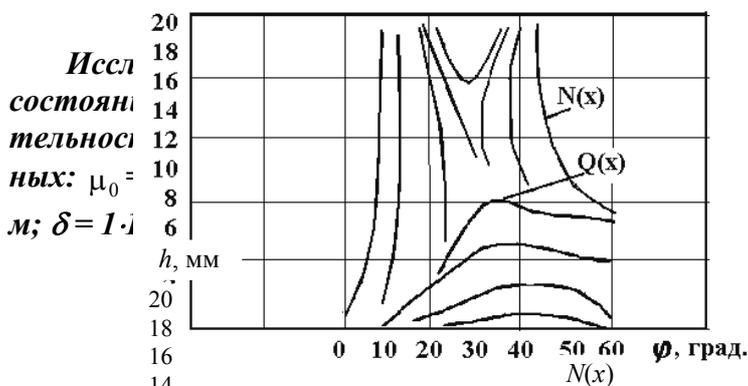
$$f_2(x) = Q(x) = a_1 x_2 \sin x_1 \cos x_1 - b_1 x_2^3 \sin^2 x_1; \quad (1.8)$$

– производительность шнековой машины

$$f_3(x) = N(x) = \frac{a_2 (1 + 3 \sin^2 x_1)}{x_2} + b_2 x_2 \sin x_1 \cos x_1, \quad (1.9)$$

где  $a_1 = \frac{\omega_0^2 \mu_0}{2} h, \text{ мм}$        $\pi D \Delta P$

$$\frac{\pi^2 D^2 \omega_0}{2} \Delta P_u.$$



линии  $\varphi = x_1$  и глубины канала  $h = x_2$  на функции функций состояния (рис. 4) (функция производительности для модельного материала при следующих данных:  $\omega_0 = 90$  об/мин);  $D = 0,08$  м;  $\Delta P = 20$  МПа;  $L = 0,8$

**Рис. 1.4** Линии уровней функции состояния  $Q(x)$  и  $N(x)$

**Порядок выполнения работы**

- 1 Изучить блок-схему алгоритма итерации решения системы трех нелинейных уравнений для трех параметров управления  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).
- 2 Изучить блок-схему алгоритма метода скользящего допуща (МСД).
- 3 Разработать блок-схему построения линий уровня трех функций состояния для трех параметров управления  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).
- 4 Получить у преподавателя задание  $\varphi, \circ$
- 5 Разработать программу построения линии уровня трех функций состояния для трех параметров управления  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).
- 6 Распечатать результаты работы программы построения линий уровня трех функций состояния для трех параметров управления  $x_i$  в виде графиков зависимости трех функций состояния от попарно сочетающихся параметров управления.

**Варианты задания**

№ п/п	$\mu_0, \text{Па}\cdot\text{с}_n$	$n$	$\omega_0^*, \text{с}^{-1}$	$H, \text{м}$	$D^*, \text{м}$	$\Delta P, \text{МПа}$	$L^*, \text{м}$	$\delta, \text{м}$	$e, \text{м}$
1	1000	0,1 0	0,1	0,00 3	0,025	5	0,25	0,000 5	0,00 2
2	1500	0,1 5	0,2	0,00 3	0,025	5	0,25	0,000 5	0,00 2
3	2000	0,1 7	0,3	0,00 4	0,032	10	0,45	0,001	0,00 3
4	2500	0,1 9	0,4	0,00 4	0,032	10	0,45	0,001	0,00 3
5	3000	0,2 0	0,5	0,00 5	0,045	15	0,63	0,001	0,00 4
6	3500	0,2 2	0,6	0,00 5	0,045	15	0,63	0,001	0,00 4
7	4000	0,2 4	0,7	0,00 7	0,063	15	0,90	0,001 5	0,00 6
8	4500	0,2 6	0,8	0,00 7	0,063	15	0,90	0,001 5	0,00 6
9	5000	0,2 8	0,9	0,01 0	0,090	20	1,25	0,002	0,00 9
10	6000	0,3 0	1,2	0,01 0	0,090	20	1,25	0,002	0,00 9

\* Параметры управления.

**Содержание отчета**

- 1 Блок-схема алгоритма итерации решения системы трех нелинейных уравнений для трех переменных.
- 2 Блок-схема алгоритма метода скользящего допуща (МСД).
- 3 Блок-схема построения линий уровня трех функций состояния для трех переменных.

- 4 Распечатка программы построения линий уровня трех функций состояния для трех переменных.
- 5 Распечатка графиков зависимости трех функций состояния от попарно сочетающихся параметров управления

### **Контрольные вопросы**

- 1 Основные понятия курса "Оптимизация режимных и конструктивных параметров технологического оборудования".
- 2 Что такое параметры управления и функции состояния.
- 3 Порядок работы блок-схемы алгоритма итерации решения системы трех нелинейных уравнений для трех переменных.
- 4 Порядок работы блок-схемы алгоритма метода скользящего допуска (МСД).
- 5 Порядок работы блок-схемы построения линий уровня трех функций состояния для трех переменных.

### **Лабораторная работа № 2**

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Цель работы:** разработать блок-схему алгоритма и программу расчета на прочность основных деталей прессового оборудования; разработать блок-схему алгоритма и программное обеспечение для построения линий уровня четырех функций состояния при трех переменных управления; освоение программы оптимизации конструкции колонного, рамного и челюстного типов.

### **ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

#### **1.1 Расчет на прочность и жесткость пресса колонного типа**

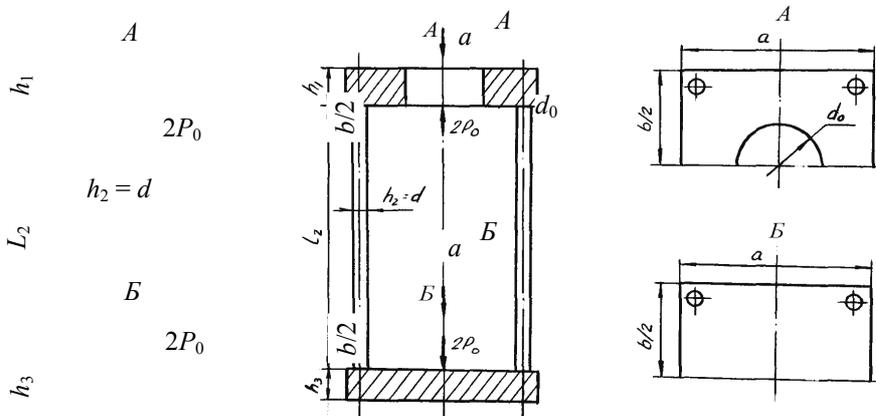
Исходные данные:  $2P_0$ ;  $a$ ;  $b$ ;  $d$ ;  $l_2$ ;  $[\sigma]_1 = [\sigma]_2 = [\sigma]_3$ ;  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu = 0,3$ ; материал плит и колонн Сталь 45Л, нагрузка – пульсирующая (рис. 2.1).

В качестве искомым проектных параметров пресса принимаем: толщину верхней плиты  $x_1 = h_1$ ; толщину нижней плиты  $x_3 = h_3$ ; диаметр колонн  $x_2 = d$ .

Ограничения на проектные параметры:  $a_1 \leq h_1 \leq b_1$ ;  $a_2 \leq h_2 \leq b_2$ ;  $a_3 \leq h_3 \leq b_3$ .

Для нахождения проектных параметров пресса запишем систему уравнений (2.1) для трех ограничений:

$$\left. \begin{aligned} K_1(x_1, x_2, x_3) - 1 &= 0 \\ K_2(x_1, x_2, x_3) - 1 &= 0 \\ K_3(x_1, x_2, x_3) - 1 &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$



**Рис. 2.1** Схема колонного пресса

#### **1.2 Расчет на прочность и жесткость пресса рамного типа**

$$\text{где } K_1 = \frac{\max \sigma_3^{(1)}}{[\sigma]} = \frac{P_0 \left[ \frac{3a}{(b-d_0)x_1^3} + \frac{3a}{bx_3^3} + \frac{32l_2}{\pi x_2^4} \right]}{\frac{12}{(b-d_0)x_1^3} + \frac{12}{bx_3^3} + \frac{64l_2}{\pi x_2^4 a}} \frac{6}{(b-d_0)[\sigma]x_1^2}; \quad (2.2)$$

$$K_2 = \frac{\max \sigma_3^{(2)}}{[\sigma]} = \frac{2P_0}{\pi x_2^2 [\sigma]} + \left\{ P_0 \frac{a}{2} - \frac{P_0 \left[ \frac{3a}{(b-d_0)x_1^3} + \frac{3a}{bx_3^3} + \frac{32l_2}{\pi x_2^4} \right]}{\frac{12}{(b-d_0)x_1^3} + \frac{12}{bx_3^3} + \frac{64l_2}{\pi x_2^4 a}} \right\} \frac{16}{[\sigma] \pi x_2^3}; \quad (2.3)$$

$$K_3 = \frac{\max \sigma_3^{(3)}}{[\sigma]} = \frac{P_0 \left[ \frac{3a}{(b-d_0)x_1^3} + \frac{3a}{bx_3^3} + \frac{32l_2}{x_2^4} \right]}{\frac{12}{(b-d_0)x_1^3} + \frac{12}{bx_3^3} + \frac{64l_2}{\pi x_2^4 a}} \frac{6}{b[\sigma]x_3^2}; \quad (2.4)$$

где  $\max \sigma_3^j$  – максимальные эквивалентные напряжения по IV гипотезе прочности в верхней, нижней плитах и колоннах пресса ( $j = 1, 2, 3$ ).

Объем (масса) конструкции пресса

$$\tilde{V}^*(x_1, x_2, x_3) = \tilde{x}_1^* ab - \frac{\pi d_0^2}{4} \tilde{x}_1^* + \pi \tilde{x}_2^* l_2 + \tilde{x}_3^* ab, \quad (2.5)$$

Исходные данные:  $2P$ ;  $l_1$ ;  $l_2$ ;  $l_3$ ;  $l_4$ ;  $l_5$ ;  $l_6$ ; материал рамы пресса сталь Ст3,  $E = 200\,000$  МПа;  $\mu = 0.3$ ;  $[\sigma]_1 = [\sigma]_2 = [\sigma]_3 = [\sigma] = 110$  МПа (цикл пульсирующий),  $q = \frac{P}{l_6}$  (рис. 2.2).

В качестве искоемых проектных параметров пресса принимаем: высоту сечения верхнего пояса  $h_1 = x_1$ ; высоту сечения нижнего пояса  $h_3 = x_3$ ; ширину сечения вертикальных стоек  $h_2 = x_2$ .

Система уравнений для ограничений прочности (2.6) для определения параметров  $x_1, x_2, x_3$  имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\max \sigma_1}{[\sigma]} - 1 &= 0 \\ \frac{\max \sigma_2}{[\sigma]} - 1 &= 0 \\ \frac{\max \sigma_3}{[\sigma]} - 1 &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.6)$$

где  $\max \sigma_1, \max \sigma_2, \max \sigma_3$  – максимальные напряжения соответственно в верхнем поясе, боковых стойках и нижнем поясе рамы пресса, определяемые из уравнений:

$$\max \sigma_1 = \frac{M_0}{0,0121 x_1^4} 0,516 x_1; \quad (2.7)$$

$$\max \sigma_2 = \frac{q l_6 l_4 + M_0 + N_0 l_1}{0,00081 x_2^4} 0,26 x_2 + \frac{q l_6}{0,08 x_2^2}; \quad (2.8)$$

$$\max \sigma_3 = \frac{q l_6 (l_5 + 0,5 l_6 - l_4)}{0,0108 x_3^4} 0,8 x_3. \quad (2.9)$$

Здесь  $M_0, N_0$  – изгибающий момент и нормальная сила в среднем сечении верхнего пояса рамы, определяемые по формулам:

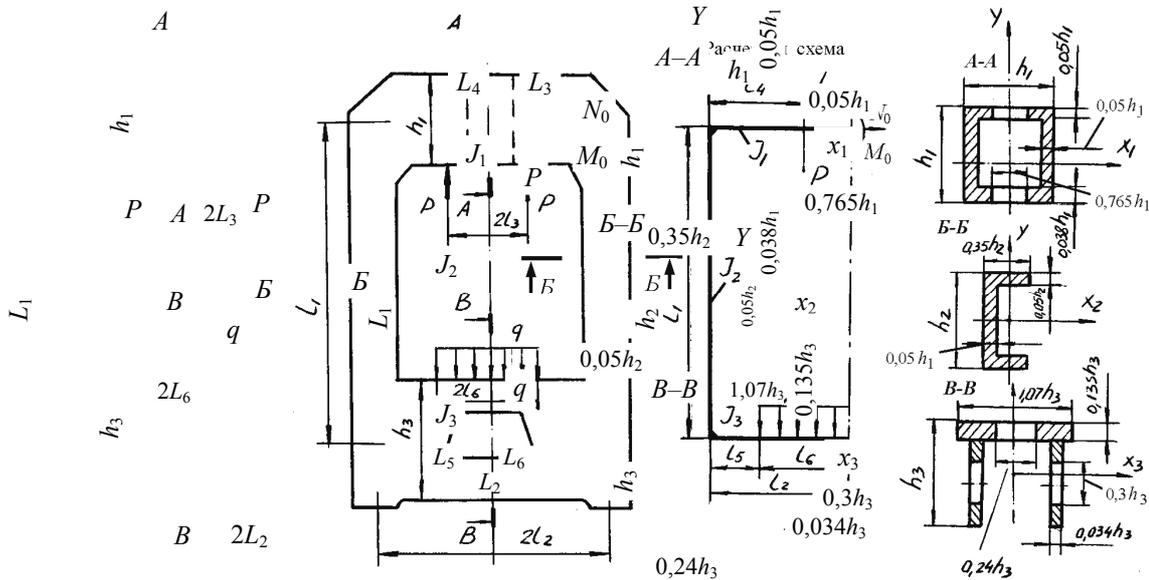
$$\begin{aligned}
M_0 &= \frac{-\left[\frac{ql_6l_4^2}{2J_1} + \frac{ql_6l_4l_1}{J_2} + \frac{ql_6}{6J_3}\left(\frac{3}{4}l_2^2 - l_6^2\right)\right]\left(\frac{l_1^3}{3J_2} + \frac{l_1^2l_2}{2J_3}\right) + \dots}{\left(\frac{l_1^2}{2J_1} + \frac{l_1l_2}{2J_3}\right) - \left(\frac{l_2}{2J_1} + \frac{l_1}{J_2} + \frac{l_2}{2J_3}\right)\left(\frac{l_1^3}{3J_2} + \frac{l_1^2l_2}{2J_3}\right)} \dots \rightarrow \\
&\dots \rightarrow \frac{\left[\frac{ql_6l_4l_1^2}{2J_2} + \frac{ql_6l_1}{6J_3}\left(\frac{3}{4}l_2^2 - l_6^2\right)\right]\left(\frac{l_1^2}{2J_2} + \frac{l_1l_2}{2J_3}\right)}{\dots} \dots \rightarrow \\
N_0 &= \frac{-\left[\frac{ql_6l_4l_1^2}{2J_2} + \frac{ql_6l_1}{6J_3}\left(\frac{3}{4}l_2^2 - l_6^2\right)\right]\left(\frac{l_2}{2J_1} + \frac{l_1}{J_2} + \frac{l_2}{2J_3}\right) + \dots}{\left(\frac{l_1^2}{2J_1} + \frac{l_1l_2}{2J_3}\right) - \left(\frac{l_2}{2J_1} + \frac{l_1}{J_2} + \frac{l_2}{2J_3}\right)\left(\frac{l_1^3}{3J_2} + \frac{l_1^2l_2}{2J_3}\right)} \dots \rightarrow \\
&\dots \rightarrow \frac{\left[\frac{ql_6l_4^2}{2J_1} + \frac{ql_6l_4l_1}{J_2} + \frac{ql_6}{6J_3}\left(\frac{3}{4}l_2^2 - l_6^2\right)\right]\left(\frac{l_1^2}{2J_2} + \frac{l_1l_2}{2J_3}\right)}{\dots} \dots \rightarrow
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

где  $J_1 = 0,0121 x_1^4$ ;  $J_2 = 0,00081 x_2^4$ ;  $J_3 = 0,0108 x_3^4$  – момент инерции сечений рамы пресса.

Объем конструкции

$$V^* = \tilde{F}_1^* l_2 + 2\tilde{F}_2^* l_1 + \tilde{F}_3^* l_2, \tag{2.12}$$

где  $\tilde{F}_1^* = 0,118 x_1^2$ ;  $\tilde{F}_2^* = 0,08 x_2^2$ ;  $\tilde{F}_3^* = 0,151 x_3^2$  – площади сечений элементов рамы пресса.



**Рис. 2.2** Расчетная схема рамного гидравлического пресса  
*Порядок выполнения работы*

1 Разработать блок-схему алгоритма расчета на прочность основных деталей прессового оборудования [3].

- 2 Разработать программу расчета на прочность основных деталей прессового оборудования.
- 3 Разработать блок-схему построения линий уровня четырех функций состояния для трех параметров управления  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Где функциями состояния являются эквивалентные напряжения (2.2 – 2.4 или 2.7 – 2.8) и объем конструкции основных деталей прессового оборудования (2.5, или 2.11).
- 4 Получить у преподавателя вариант задания.
- 5 Разработать программу построения линий уровня четырех функций состояния для трех параметров управления  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).
- 6 Распечатать результаты работы программы построения линий уровня четырех функций состояния для трех параметров управления  $x_i$  в виде графиков зависимости трех функций состояния от попарно сочетающихся параметров управления.
- 7 Освоить программу оптимизации конструкции заданного типа прессы и получить оптимальные значения параметров управления.

### **Варианты задания**

№ п/п	Тип прессы	Начальные значения параметров управления			$2P, \text{ МН}$	$L_1(a), \text{ м}$	$L_2, \text{ м}$	$L_3(b), \text{ м}$	$L_4(d_0), \text{ м}$	$L_5, \text{ м}$	$L_6, \text{ м}$
		$h_1, \text{ м}$	$h_2(d), \text{ м}$	$h_3, \text{ м}$							
1	Рамный	0,5	0,3	0,5	2,5	1,85	1,11	0,15	0,45	0,25	0,35
2	Рамный	0,6	0,4	0,6	2,5	1,95	1,15	0,20	0,50	0,30	0,40
3	Рамный	0,7	0,5	0,7	3,0	2,00	1,20	0,25	0,55	0,35	0,45
4	Рамный	0,19	0,4	0,32	6,3	2,45	1,40	0,35	0,65	0,45	0,55
5	Рамный	0,20	0,5	0,45	10	2,65	1,50	0,40	0,70	0,50	0,60
6	Колонный	0,22	0,1	0,22	2,5	1,15	2,00	1,00	0,50	–	–
7	Колонный	0,25	0,12	0,25	6,3	1,20	2,15	1,10	0,55	–	–
8	Колонный	0,35	0,14	0,35	6,3	1,40	2,20	1,20	0,60	–	–
9	Колонный	0,40	0,16	0,40	10	1,50	2,40	1,40	0,70	–	–
10	Колонный	0,45	0,18	0,45	10	1,60	2,60	1,60	0,80	–	–

Материал конструкции рамы – Ст 3, а колонн и плит прессы Сталь 45Л.

### **Содержание отчета**

- 1 Блок-схема построения линий уровня четырех функций состояния для трех переменных.
- 2 Распечатка программы построения линий уровня четырех функций состояния для трех переменных.
- 3 Распечатка графиков зависимости четырех функций состояния от попарно сочетающихся параметров управления.
- 4 Распечатка результатов расчета программы оптимизации прессового оборудования.

## Контрольные вопросы

- 1 Основные детали прессового оборудования несущие его конструкцию.
- 2 Выделите основные параметры управления и функции состояния при оптимизации прессового оборудования.
- 3 Порядок выбора варьируемых параметров при оптимизации прессового оборудования.
- 4 Выделите критерии оптимизации прессового оборудования.
- 5 Порядок работы блок-схемы построения линий уровня двух функций состояния для трех переменных.
- 6 Какой эффект достигнут в результате оптимизации конструкции заданного типа прессы?

### Лабораторная работа № 3

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА СМЕСИТЕЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

**Цель работы:** разработать блок-схему алгоритма и программу расчета на прочность материального цилиндра смесителя непрерывного действия; разработать блок-схему алгоритма и программное обеспечение для построения линий уровня трех функций состояния при трех переменных управления; освоение программы оптимизации конструкции материального цилиндра смесителя непрерывного действия.

### ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

#### 3.1 Расчет на прочность материального цилиндра смесителя непрерывного действия

Вопросы прочности подобного типа конструкции изложены в [6]. Поэтому ограничимся приведением расчетных формул для максимальных эквивалентных напряжений по IV-ой теории прочности соответственно для внутреннего и наружного цилиндров (рис. 3.1):

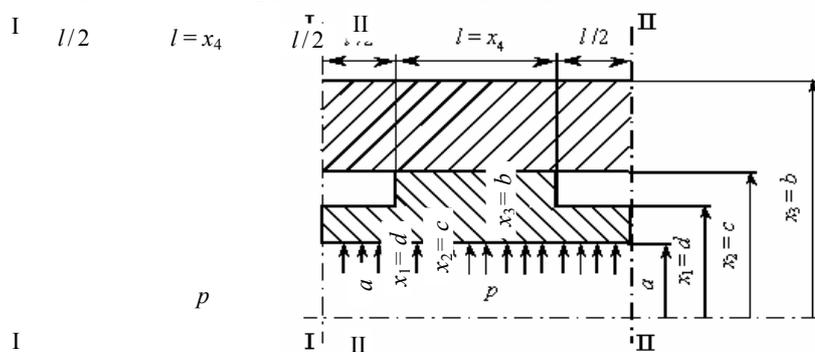


РИС. 3.1 КОНСТРУКЦИЯ ДВУХСЛОЙНОГО ЦИЛИНДРА С КАНАВКАМИ

$$\max \sigma_{\text{э1}} = p \left\{ \frac{1}{2} \left[ \left[ \left( \frac{a}{d-a} + \mu \frac{l^2}{2(d-a)^2} \right) - \frac{2a}{d} \frac{d}{2(d-a)} - \frac{l^2}{2(d-a)^2} \right]^2 + \left[ \frac{l^2}{2(d-a)^2} + 1 \right]^2 \right] + \left[ \left( \frac{a}{d-a} + \mu \frac{l^2}{2(d-a)^2} \right) - \frac{2a}{d} \frac{d}{2(d-a)} + 1 \right]^2 \right\}, \quad (3.1)$$

$$\max \sigma_{\Sigma 2} = p \sqrt{\frac{a^2}{c^2} \left[ \left( \frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - 1} \right)^2 + 1,8 \frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - 1} + 1,56 \right]}, \quad (3.2)$$

где  $\beta = \frac{b}{c}$ ;  $a$  – внутренний радиус внутреннего цилиндра, м;  $d$  – наружный радиус внутреннего цилиндра, м;  $c$  – внутренний радиус наружного цилиндра, м;  $b$  – наружный радиус наружного цилиндра, м;  $l$  – ширина кольцевой канавки, м;  $p$  – рабочее давление внутреннего цилиндра, МПа;  $\mu$  – коэффициент Пуассона для материала цилиндра.

Основная цель данного проектирования состоит в том, чтобы на основании расчетных формул (3.1) и (3.2) найти такие оптимальные геометрические параметры двухслойного цилиндра, которые наряду с прочностными характеристиками и эффективным отводом тепла обеспечивали бы минимальную массу конструкции (3.3).

$$M(\bar{x}) = \pi \rho \left[ 2(x_1^2 - a^2) + (x_2^2 - x_1^2) + 2(x_3^2 - x_2^2) \right]. \quad (3.3)$$

В связи с этим ставится задача: найти вектор параметров управления  $\bar{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ , который минимизирует целевую функцию, характеризующую расход материала (массы).

При этом должны выполняться ограничения по прочности для:

– внутреннего цилиндра

$$\max \sigma_{\Sigma 1} \leq [\sigma]_1; \quad (3.4)$$

– для наружного цилиндра  $\max$

$$\sigma_{\Sigma 2} \leq [\sigma]_2. \quad (3.5)$$

и геометрические ограничения по управляемым параметрам

$$a_i \leq x_i \leq b_i, \quad (i = 1, 2, 3, 4). \quad (3.6)$$

Здесь  $\max \sigma_{\Sigma 1}$ ,  $\max \sigma_{\Sigma 2}$  – максимальные эквивалентные напряжения соответственно для внутреннего и наружного цилиндров, определяемые по формулам (3.1) и (3.2);  $[\sigma]_1$ ,  $[\sigma]_2$  – допускаемые напряжения для материалов внутреннего и наружного цилиндров;  $M(x)$  – масса участка составного цилиндра единичной длины;  $x_i$  – геометрические размеры составного цилиндра;  $\rho$  – плотность материала цилиндров.

Для составного цилиндра со следующими исходными данными:  $a$ ;  $p$ ;  $[\sigma]_1$ ;  $[\sigma]_2$ ; материал цилиндров сталь;  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu = 0,3$ ;  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

### **Порядок выполнения работы**

1 Разработать блок-схему построения линий уровня трех функций состояния для трех параметров управления  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Где функциями состояния являются эквивалентные напряжения и объем конструкции материального цилиндра смесителя непрерывного действия.

2 Получить у преподавателя вариант задания.

3 Разработать программу построения линий уровня трех функций состояния для трех параметров управления  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

4 Распечатать результаты работы программы построения линий уровня трех функций состояния для трех параметров управления  $x_i$  в виде графиков зависимости трех функций состояния от попарно сочетающихся параметров управления.

5 Освоить программу оптимизации конструкции заданного типа прессы.

### **Варианты задания**

№ п/п	Начальные значения параметров управления	$P$ , МПа	$a$ , м	$[\sigma]_1$ , МПа	$[\sigma]_2$ , МПа
-------	--	-----------	---------	--------------------	--------------------

	$d, \text{ м}$	$c, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	$l, \text{ м}$	$a$		$a$	
1	0,03 6	0,042	0,047	0,02 0	120	0,032	450	380
2	0,02 8	0,037	0,042	0,01 5	100	0,025	500	400
3	0,02 2	0,025	0,032	0,01 2	90	0,018	480	420
4	0,01 9	0,025	0,029	0,01 0	110	0,016	460	400
5	0,02 0	0,027	0,032	0,00 8	100	0,018	440	370
6	0,02 2	0,029	0,034	0,00 6	80	0,020	420	350
7	0,02 5	0,032	0,037	0,01 2	140	0,020	400	330
8	0,03 5	0,042	0,045	0,01 4	120	0,030	430	360
9	0,04 0	0,046	0,052	0,01 6	130	0,033	460	390
1 0	0,04 5	0,054	0,059	0,01 8	150	0,040	470	400

### *Содержание отчета*

- 1 Блок-схема построения линий уровня трех функций состояния для трех переменных.
- 2 Распечатка программы построения линий уровня трех функций состояния для трех переменных.
- 3 Распечатка графиков зависимости трех функций состояния от попарно сочетающихся параметров управления.
- 4 Распечатка результатов расчета программы оптимизации материального цилиндра смесителя непрерывного действия.

### *Контрольные вопросы*

- 1 Основные детали смесителя непрерывного действия несущие его конструкцию.
- 2 Выделите основные параметры управления и функции состояния при оптимизации смесителя непрерывного действия.
- 3 Порядок выбора варьируемых параметров при оптимизации материального цилиндра смесителя непрерывного действия.
- 4 Выделите критерии оптимизации смесителя непрерывного действия.
- 5 Порядок работы блок-схемы построения линий уровня трех функций состояния для трех переменных.
- 6 Какой эффект достигнут в результате оптимизации конструкции заданного типа материального цилиндра смесителя непрерывного действия.

*Лабораторная работа № 4*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАНИНЫ ВАЛЬЦЕВ**

**Цель работы:** разработать блок-схему алгоритма и программу расчета на прочность станины вальцев; разработать блок-схему алгоритма и программное обеспечение для построения линий уровня четырех функций состояния при трех переменных управления; освоение программы оптимизации конструкции станины вальцев.

### ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

#### **3.1 Расчет на прочность станины вальцев**

Вопросы прочности подобного типа конструкции изложены в [8].

Лабораторные вальцы (рис. 4.1) представляют собой литую станину, состоящую из стойки корытного профиля и верхней траверсы, которая с натягом закладывается в пазы и крепится к стойке станины шпильками. Станина устанавливается на общей фундаментной плите. Материал станины чугун СЧ18 ( $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu = 0,3$ ;  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $[\sigma]_{\text{И}} = 41,0$  МПа,  $[\sigma]_{\text{Р}} = 25,0$  МПа).

Геометрические характеристики сечений станины вальцев:

Сечение А–А:

$$J_3 = \frac{(b_3 - d_3)H_3^3}{12};$$

$$W_3 = \frac{(b_3 - d_3)H_3^3}{6};$$

$$F_3 = H_3(b_3 - d_3).$$

Сечение Б–Б:

$$J_1 = \frac{(b_1 - d_1)H_1^3}{12};$$

$$W_1 = \frac{(b_1 - d_1)H_1^3}{6};$$

$$F_1 = H_1(b_1 - d_1).$$

Сечение В–В:

$$J_2 = \frac{(b_2 - d_2)H_2^3}{12};$$

$$W_2 = \frac{(b_2 - d_2)H_2^3}{6};$$

$$F_2 = H_2(b_2 - d_2),$$

где  $J_i$ ,  $W_i$ ,  $F_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – соответственно, моменты инерции, моменты сопротивления и площади сечений.

Согласно приведенной конструктивной схеме (рис. 4.1) станина вальцев представляет собой замкнутую самоуравновешенную стержневую конструкцию прямоугольной формы. При этом соединение траверсы со стойкой шарнирное. Расчетная схема станины лабораторных вальцев приведена на рис. 4.2.

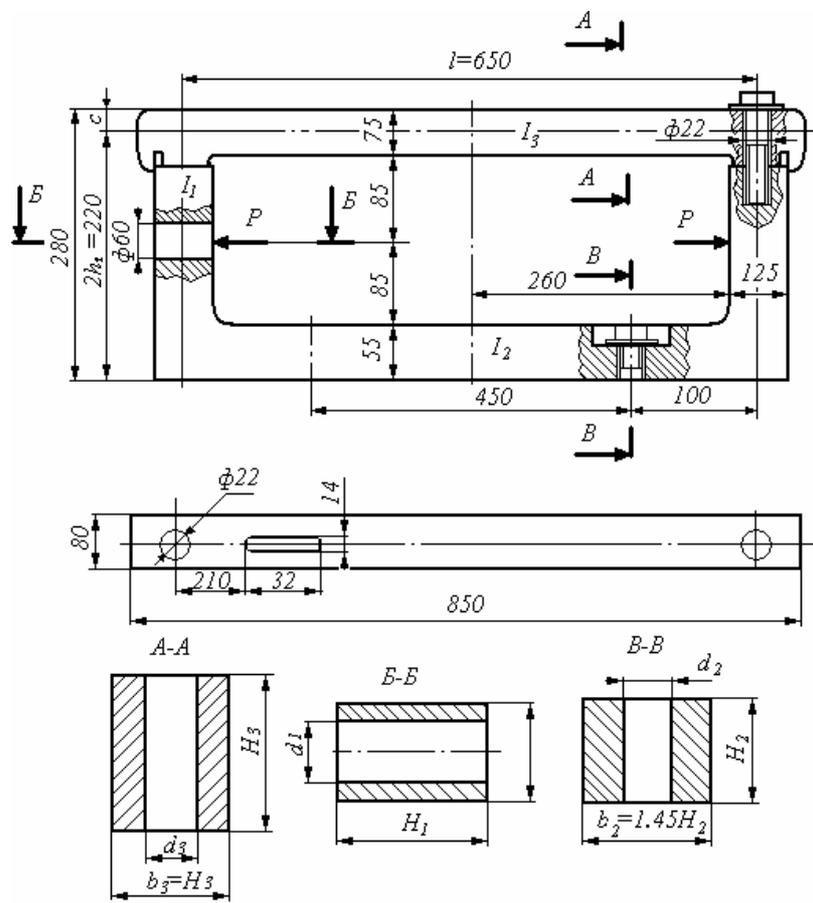


Рис. 4.1 Конструктивная схема лабораторных валцов

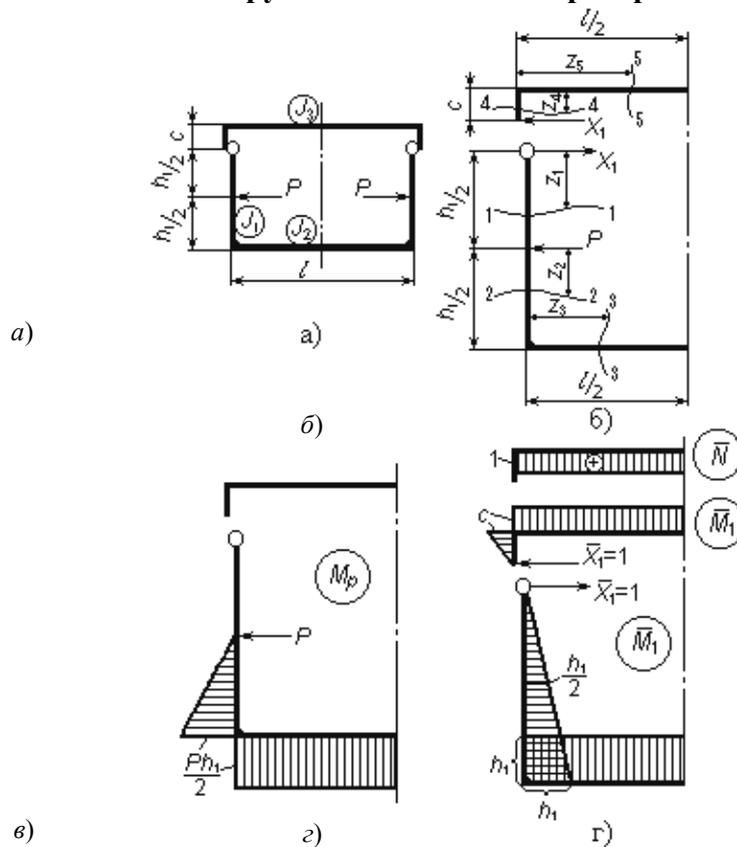


Рис. 4.2 Расчетная схема и эпюры моментов рамы

Образованная стержневая система (рис. 4.2, а) станины представляет собой статически неопределимую плоскую раму. В качестве основной системы принимаем симметричный вариант (рис. 4.2, б).

Вследствие симметрии приложенной нагрузки, конструкции рамы и наличия шарнира в месте соединения траверсы со стойкой, данная система один раз статически неопределима.

Система канонических уравнений в данном случае запишется как

$$\delta_{11}x_1 + \Delta_{1P} = 0. \quad (4.1)$$

Коэффициенты канонических уравнений  $\delta_{11}$  и  $\Delta_{1P}$  находятся путем перемножения эпюр моментов от единичных сил и заданной нагрузки (рис. 4.2, в, 4.2, з).

$$\delta_{11} = \frac{1}{3EJ_1} h_1^3 + \frac{1}{2EJ_2} h_1^2 l + \frac{1}{EF_3} \frac{l}{2};$$

$$\Delta_{1P} = -\frac{5Ph_1^3}{48EJ_1} - \frac{Ph_1^2 l}{4EJ_2}.$$

Подставляя  $\delta_{11}$  и  $\Delta_{1P}$  в (4.1), получим неизвестное усилие  $x_1$ :

$$x_1 = \frac{\frac{5Ph_1^3}{48EJ_1} + \frac{Ph_1^2 l}{4EJ_2}}{\frac{1}{3EJ_1} h_1^3 + \frac{1}{2EJ_2} h_1^2 l + \frac{1}{EF_3} \frac{l}{2}} \quad (4.2)$$

при  $EF_3 \rightarrow \infty$ , т.е. без учета растяжения траверсы

$$x_1 = \frac{1}{8} \frac{5J_2 Ph_1^3 + 12J_1 h_1^2 l}{2J_2 h_1^3 + 3J_1 h_1^2 l}. \quad (4.3)$$

Изгибающие моменты от заданной нагрузки и найденной силы  $x_1$  для участков рамы (рис. 4.2, в):

$$M_{И1} = -x_1 z_1; \quad 0 \leq z_1 \leq \frac{1}{2} h_1; \quad M_{И1} = 0; \quad z_1 = 0,5 h_1; \quad M_{И1} = -\frac{1}{2} x_1 h_1;$$

$$M_{И2} = -x_1 \left( \frac{h_1}{2} + z_2 \right) + P z_2; \quad 0 \leq z_2 \leq \frac{1}{2} h_1; \quad z_2 = 0; \quad M_{И2} = -\frac{1}{2} x_1 h_1;$$

$$z_2 = \frac{1}{2} h_1; \quad M_{И2} = \left( \frac{1}{2} P - x_1 \right) h_1;$$

$$M_{И3} = \left( \frac{1}{2} P - x_1 \right) h_1;$$

$$M_{И4} = x_1 z_4; \quad 0 \leq z_4 \leq c; \quad z_4 = 0; \quad M_{И4} = 0; \quad z_4 = c; \quad M_{И4} = c x_1;$$

$$M_{И5} = c x_1.$$

Напряжения в опасном сечении станины вальцев определяем по соотношению:

Сечение А-А:

$$\max \sigma_3^{A-A} = \frac{M_{И5}}{W_3} + \frac{x_1}{F_3} \leq [\sigma]_P, \quad (4.4)$$

где  $M_{И5} = x_1 c$ ;  $[\sigma]_P$  – допускаемое напряжение на изгиб для материала траверсы;

Сечение Б-Б:

$$\max \sigma_1^{B-B} = \frac{M_{И2 \max}}{W_1} \leq [\sigma]_И, \quad (4.5)$$

где  $M_{И2 \max} = \frac{1}{2} x_1 h_1$ ;  $[\sigma]_И$  – допускаемое напряжение на изгиб материала стойки;

Сечение В-В:

$$\max \sigma_2^{B-B} = \frac{M_{И3}}{W_2} \leq [\sigma]_И, \quad (4.6)$$

где  $M_{И3 \max} = \left( \frac{1}{2} P - x_1 \right) h_1$ .

Жесткость рамы вальцев определяется величиной абсолютного прогиба стойки станины в направлении действия распорного усилия  $P$ :

$$f_p = \frac{(2P - 5x_1)h_1^3}{24EJ_1} + \frac{(\frac{1}{2}P - x_1)h_1^2 l}{4EJ_2} + \frac{x_1 l}{EF_3} \leq [f], \quad (4.7)$$

где  $f_p$  – горизонтальное перемещение стойки рамы в направлении действия силы  $P$ ;  $[f]$  – допускаемый прогиб стойки станины;  $\frac{x_1 l}{EF_3}$  – составляющая перемещения в траверсе от продольной силы  $X_1$ .

Исходные данные для расчета станины вальцев:

$l = 0,65$  м;  $h_1 = 0,2$  м;  $H_1 = 0,125$  м;  $b_1 = 0,08$  м;  $d_1 = 0,06$  м;  $H_2 = 0,055$  м;  $b_2 = 0,08$  м;  $d_2 = 0,022$  м;  $H_3 = 0,08$  м;  $b_3 = 0,08$ ;  $d_3 = 0,022$  м;  $P = 0,4 \cdot 10^5$  Н;  $c = 0,0275$  мм.

### Порядок выполнения работы

1 Разработать блок-схему построения линий уровня пяти функций состояния для трех параметров управления  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Где функциями состояния являются эквивалентные напряжения, прогиб и объем конструкции станины вальцев.

2 Получить у преподавателя вариант задания.

3 Разработать программу построения линий уровня пяти функций состояния для трех параметров управления  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

4 Распечатать результаты работы программы построения линий уровня пяти функций состояния для трех параметров управления  $x_i$  в виде графиков зависимости трех функций состояния от попарно сочетающихся параметров управления.

5 Освоить программу оптимизации конструкции заданного типа станины вальцов.

### Варианты задания

№ п/п	P, М Н	Начальные значения параметров управления			l, м	h <sub>1</sub> , м	b <sub>1</sub> , м	b <sub>2</sub> , м	b <sub>3</sub> , м	d <sub>1</sub> , м	d <sub>2</sub> , м	d <sub>3</sub> , м
		H <sub>1</sub> , м	H <sub>2</sub> , м	H <sub>3</sub> , м								
1	0,04	0,12 5	0,05 5	0,08 0	0,6 5	0,2 0	0,0 80	0,0 8	0,0 8	0,0 6	0,0 22	0,0 22
2	0,03	0,12 2	0,05 3	0,07 8	0,6 2	0,1 8	0,0 77	0,0 77	0,0 77	0,0 57	0,0 20	0,0 20
3	0,03	0,12 0	0,05 0	0,07 6	0,6 0	0,1 6	0,0 77	0,0 77	0,0 77	0,0 57	0,0 22	0,0 22
4	0,04	0,12 7	0,05 7	0,08 2	0,6 7	0,2 2	0,0 84	0,0 84	0,0 84	0,0 62	0,0 24	0,0 24
5	0,03	0,11 5	0,04 8	0,07 4	0,5 8	0,1 4	0,0 72	0,0 72	0,0 72	0,0 55	0,0 18	0,0 18
6	0,05	0,13 0	0,06 0	0,09 0	0,7 0	0,2 5	0,0 85	0,0 85	0,0 85	0,0 65	0,0 25	0,0 25
7	0,04	0,13 0	0,06 0	0,09 0	0,5 0	0,2 2	0,0 75	0,0 75	0,0 75	0,0 57	0,0 18	0,0 18
8	0,02	0,12 0	0,04 5	0,07 4	0,5 5	0,2 4	0,0 74	0,0 74	0,0 74	0,0 56	0,0 17	0,0 17
9	0,04	0,15 0	0,06 5	0,08 5	0,5 2	0,2 0	0,0 72	0,0 72	0,0 72	0,0 54	0,0 16	0,0 16
10	0,07	0,17 0	0,07 0	0,09 0	0,7 0	0,2 5	0,0 95	0,0 95	0,0 95	0,0 70	0,0 26	0,0 26

## Содержание отчета

- 1 Блок-схема построения линий уровня пяти функций состояния для трех переменных.
- 2 Распечатка программы построения линий уровня пяти функций состояния для трех переменных.
- 3 Распечатка графиков зависимости пяти функций состояния от попарно сочетающихся параметров управления.
- 4 Распечатка результатов расчета программы оптимизации станины вальцев.

## Контрольные вопросы

- 1 Основные детали валкового оборудования несущие его конструкцию.
- 2 Выделите основные параметры управления и функции состояния при оптимизации смесителя непрерывного действия.
- 3 Порядок выбора варьируемых параметров при оптимизации валкового оборудования.
- 4 Выделите критерии оптимизации валкового оборудования.
- 5 Порядок работы блок-схемы построения линий уровня пяти функций состояния для трех переменных.
- 6 Какой эффект достигнут в результате оптимизации конструкции заданного типа станины вальцев.

## Лабораторная работа № 5

### ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСТРУЗИИ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ

**Цель работы:** разработать блок-схему алгоритма и программу расчета мощности, производительности шнековой машины, а также расчета на прочность и жесткость шнека; разработать блок-схему алгоритма и программное обеспечение для построения линий уровня трех функций состояния при пяти переменных управления; освоение программы оптимизации конструкции шнековых машин; определение таких технологических параметров и геометрических размеров шнекового узла пластикации, которые удовлетворяют условию минимизации технологической мощности и получения качественных изделий.

#### 5.1 Теоретические основы экструзии резиновых смесей

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу оптимизации, которая включает: уравнения позволяющие определить энергосиловые, технологические параметры и температурное поле по длине червяка; реологическое уравнение состояния; целевую функцию  $F$ ; алгоритм поиска экстремальных значений аргументов функции  $F$ ; алгоритм совместного решения математической модели и целевой функции [1].

Уравнения позволяющие определить энергосиловые и технологические параметры имеют следующий вид [2, 5, 6]:

– технологическая мощность

$$N = N_1 + N_2 + N_3, \text{ Вт}, \quad (5.1)$$

где  $N_1 = (B/h)(4V_x^2 + V_z^2) m_0 (V/h)^{n-1} z_d F_z$  – мощность диссипации, Вт;

$N_2 = (V_z/2)Bh\Delta P$ ; –

мощность затрачиваемая на преодоление перепада давления по длине червяка, Вт;  $F_z = \frac{1}{z_d} \int_0^{z_d} \exp \frac{E}{RT(z)} dz$  –

коэффициент учитывающий неизотермичность процесса;  $N_3 = V(V/\delta)^n m_0 \exp[E/(RT_{\text{ш}})] \epsilon \cos(\varphi) z_d$  – мощность затрачиваемая на трение в зазоре  $\delta$ , Вт;  $V_z = V \cos \varphi$ ;  $z_d = L/\sin \varphi$  – длина винтового канала, м;  $L$  – длина шнека, м;  $V = \omega D/2$  – окружная скорость шнека, м/с;  $\omega$  – угловая частота шнека,  $\text{с}^{-1}$ ;  $m_0$  – мера консистентности, Па ·  $\text{с}^n$ ;  $n$  – индекс течения,  $E$  – энергия активации, Дж;  $R$  – газовая постоянная перерабатываемого материала, Дж/(моль  $K$ );  $T$  – температура перерабатываемого материала, К,  $\Delta P$  – перепад давления по длине шнека, Па.

– производительность шнековой машины

$$Q = Q_1 - Q_2, \quad (5.2)$$

где  $Q_1 = V_z/(2Bh) F_g$  – производительность прямого потока;  $Q_2 = Bh^3 F_p \times \Delta P/[12(V/h)^{n-1} m_0 F_z z_d]$  – производительность обратного потока;  $e$  – ширина гребня витка, м;  $F_g$  и  $F_p$  – коэффициенты, учитывающие форму канала шнека (см. рис. 1.3).

1 Политропный процесс:

$$T(z) = T_{ц} + G \exp[E/(RT)] - (G \exp[E/(RT)] - T_{см.вх.} + T_{ц}) \exp(-Az), \quad (5.3)$$

где  $G = m_0 h^2 / (2K\lambda)(V/h)^{n+1}$ ;  $A = 2KaB/(Qh)$ ;  $a = \lambda/(\rho c)$ ;  $K = \alpha h/\lambda$ ;  $V_m = Q/Bh$ ,  $a$  – температуропроводность,  $m^2/c$ ;  $B$  – ширина винтового канала шнека, м;  $c$  – теплоемкость резиновой смеси, Дж/(кг·град);  $T_{ц}$ ,  $T_{см.вх.}$ ,  $T_{см.вых.}$  – температура материального цилиндра, резиновой смеси на входе и выходе, К;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от резиновой смеси к стенке материального цилиндра и шнека, Вт/( $m^2$ ·град);  $\lambda$  – теплопроводность резиновой смеси, Вт/(м·град);  $\rho$  – плотность резиновой смеси, кг/ $m^3$ ; трансцендентное уравнение для определения средней по длине зоны температуры  $T_{cp}$ :

$$T_{cp} = T_{ц} + G \exp\left(\frac{E}{RT_{cp}}\right) \left(1 + \frac{\exp(-Az_d) - 1}{Az_d}\right) + (T_{ц} - T_{см.вх.}) \left(\frac{\exp(-Az_d) - 1}{Az_d}\right). \quad (5.4)$$

В работе [4] авторами предлагается в качестве критерия качества резиновой смеси использовать критерий Бейли

$$J(t) = \int_0^{t^*} \frac{dt}{\tau[T(t)]} = \sum_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{dt}{\tau[T(t)]} = 1, \quad (5.5)$$

где  $\int_0^{t^*} \frac{dt}{\tau[T(t)]}$  – оценка теплового старения, термодеструкции полимеров или подвулканизация резиновых смесей;  $\tau[T(t)]$  – кривая, характеризующая подвулканизацию (время достижения "скорчинга" в условиях постоянства температуры);  $t^*$  – время достижения "скорчинга" при заданном процессе подвулканизации  $T(t)$ .

Математическая модель позволяет рассчитать большое количество переменных состояния ( $\bar{y}$ ) и их зависимость от переменных управления ( $\bar{x}$ ). Основными из этих параметров являются:  $x_1$  – угол наклона винтовой линии шнека ( $\varphi$ );  $x_2$  – глубина винтового канала шнека ( $h$ );  $x_3$  – наружный диаметр шнека ( $D$ );  $x_4$  – частота вращения шнека ( $\omega$ );  $x_5$  – рабочая длина шнека ( $L$ );  $y_1$  – температура материала на выходе из винтового канала шнека ( $T_{см. вых.}$ );  $y_2$  – перепад давления по длине шнека ( $\Delta P$ );  $y_3$  – технологическая мощность ( $N$ );  $y_4$  – производительность шнековой машины ( $Q$ ).

## 5.2 Выбор параметров управления

Выбор параметров управления осуществляется в результате теоретического анализа влияния технологических параметров процесса экструзии и конструктивных параметров шнекового оборудования на параметры состояния.

В качестве параметров состояния принимается технологическая мощность  $N$ , критерий подвулканизации  $JB$ , производительность шнековой машины  $Q$ .

Исходя из анализа линий уровней функций технологической мощности  $N$ , критерия качества  $JB$  и производительности шнековой машины  $Q$  [2], производится выбор параметров управления для исследования и оптимизации процесса и конструкции оборудования для переработки резиновой смеси при различных режимах экструзии.

## 5.3 Оптимизация процесса и оборудования экструзии

## резиновых смесей

Конкретная постановка задачи оптимизации процесса и оборудования экструзии резиновых смесей заключается в следующем: необходимо найти такие значения конструктивных и технологических параметров, чтобы критерий оптимизации (технологическая мощность) стремился к минимуму

$$[F = N(\varphi, h, D, \omega, L)] \rightarrow \min \quad (5.6)$$

при выполнении условий в виде ограничений (5.6 – 5.11):

– качество экструдата

$$R_1 = J(t) = \int_0^{t'} \frac{\partial t}{\tau[T(t)]} = \sum_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{\partial t}{\tau[T(t)]} \leq \varepsilon; \quad (5.7)$$

– прочность материала (жесткость, устойчивость) шнека

$$R_2(\varphi, h, D, \omega, L) \leq [\sigma]; \quad (5.8)$$

– производительность шнековой машины

$$Q_{\text{зад}} = Q(\varphi, h, D, \omega, L); \quad (5.9)$$

– температуру выхода экструдата

$$\left. \begin{aligned} & T_{\text{см. вых}}(\varphi, h, D, \omega, L) = T_{\text{зад}}; \quad (5.10) \\ & D' \leq D \leq D'; \\ & \varphi' \leq \varphi \leq \varphi'; \end{aligned} \right\}$$

$$Dk_h' \leq k_h D \leq Dk_h'; \quad (5.11)$$

$$\omega' \leq \omega \leq \omega';$$

$$Dk_L' \leq k_L D \leq Dk_L';$$

где  $\varphi', D, k_h', D', \omega', D, k_L'$  и  $\varphi, D, k_h, D', \omega, Dk_L'$  – левая и правая границы изменения конструктивных ( $\varphi, h, D, L$ ) и технологического ( $\omega$ ) параметров, соответственно;  $k_h', k_L', k_h, Dk_L', k_h, k_L$  – коэффициенты учитывающие левую, правую границы и начальные значения конструктивных параметров ( $h, L$ ), соответственно;  $\varepsilon, Q_{\text{зад}}, T_{\text{зад}}$  – заданные значения интеграла Бейли, производительности шнековой машины, температуры резиновой смеси на выходе, соответственно;  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение материала шнека (допускаемый прогиб, коэффициент запаса по устойчивости).

Для решения поставленной задачи (5.6) – (5.11) применялся метод скользящего допуска, реализуемый программой на языке Бейсик [6].

### Порядок выполнения работы

- 1 Получить вариант задания у преподавателя.
- 2 Рассчитать напорно-расходоу характеристика экструзионной головки:
  - 2.1 Рассчитать коэффициент геометрической формы элементарных каналов экструзионной головки и

суммарное его значение по формулам см. табл. 5.3.

2.2 Рассчитать скорость сдвига в элементарных каналах экструзионной головки по формулам см. табл. 5.3 при трех значениях заданной производительности.

2.3 Определить эффективную вязкость материала  $\mu_3^i$  по графической зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига (см. [6, рис. П. 1]).

2.4 Рассчитать перепад давления в каналах простейшей формы и суммарный перепад давления в головке при известных значениях производительности машины и коэффициенте геометрической формы головки для трех значений производительности  $Q$  по следующему соотношению:

$$\Delta P_i = \frac{Q \mu_3^i}{K_i}, \quad (5.12)$$

где  $Q$  – объемная производительность машины,  $\text{см}^3/\text{с}$ ;  $\mu$  – эффективная вязкость материала в канале простейшей формы,  $\text{кг с}/\text{см}^2$ .

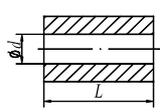
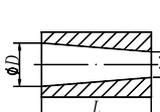
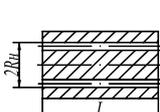
### 5.1 Результаты расчета экструзионной головки

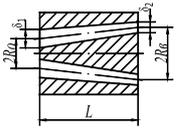
№ п/п	$K_{i,3}$ $\text{см}^3$	$S, \text{с}^{-1}$			$\mu_{\text{эф}}, \text{Па с}$			$\Delta P, \text{МПа}$		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1										
2										
3										
4										
5										
$\Sigma$	$\Sigma K$							$\Sigma \Delta P$	$\Sigma \Delta P$	$\Sigma \Delta P$

2.5 Занести результаты расчета в бланк отчета (табл. 5.1);

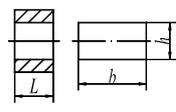
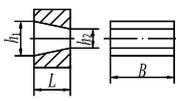
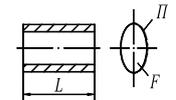
2.6 Построить напорно-расходную  $Q(\Delta P)$  характеристику экструзионной головки.

### 5.2 Расчетные схемы и формулы для определения коэффициента геометрической формы и скорости сдвига простейших каналов [8]

Вид канала	Расчетная схема	Коэффициент геометрической формы $K, \text{см}^3$	Скорость сдвига $S, \text{с}^{-1}$
1 Круглый цилиндрический		$K_{\text{ц}} = \frac{\pi d^4}{128L}$	$S = \frac{32Q}{\pi d^3}$
2 Круглый конический		$K_{\text{ц}} = \frac{3\pi d^3 D^3}{128L(D^2 + Dd + d^2)}$	$S = \frac{256Q}{\pi(D+d)^3}$
3 Круглый кольцевой		$K_0 = \frac{\pi}{8L} [R_{\text{н}}^4 - R_{\text{б}}^4 - \frac{(R_{\text{н}}^2 - R_{\text{б}}^2)^2}{2,31 \lg(R_{\text{н}}/R_{\text{б}})}]$	$S = \frac{5,58Q}{\pi(R_{\text{н}} + R_{\text{б}})} \times \frac{1}{(R_{\text{н}} - R_{\text{б}})^2}$

4 Ко- ниче- ский коль- цевой с ко- ниче- ской целью		$K_{\delta} = \frac{\pi(R_0\delta_2 - R_b\delta_1)}{6Lm}, \text{ где}$ $m = \frac{2,3(R_0 - R_b)}{(R_0\delta_2 - R_b\delta_1)} \lg \frac{R_0\delta_2}{R_b\delta_1} - \frac{(R_0 - R_b)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_0\delta_2 - R_b\delta_1)\delta_1\delta_2} \frac{(\delta_1^2 - \delta_2^2)}{2\delta_1^2\delta_2^2}$	$S = \frac{22,32Q}{\pi(R_0 + R_b)} \times \frac{1}{(\delta_1 + \delta_2)^2}$
---	---	--	--

Продолжение табл. 5.2

Вид канала	Расчетная схема	Коэффициент геометрической формы $K$ , см <sup>3</sup>	Скорость сдвига $S$ , с <sup>-1</sup>
5 Пло- ский ще- левой		$K_{\text{пл}} = \frac{bh^3}{12L}$	$S = \frac{5,58Q}{bh^2}$
6 Ще- левой кли- новый		$K_{\text{щк}} = \frac{bh_1^2h_2^2}{6L(h_1 + h_2)}$	$S = \frac{11,16Q}{b(h_1 + h_2)^2}$
7 С произ- воль- ным се- чени- ем		$K_{\text{щк}} = \frac{F^3}{6L\Pi^2}$	$S = \frac{2Q\Pi}{F^2}$

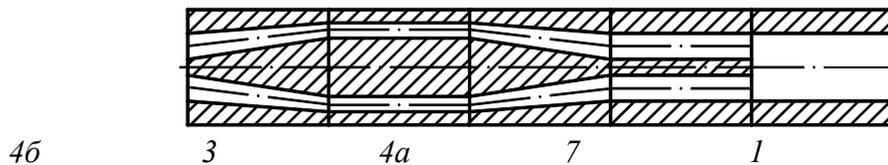


Рис. 5.1 Компонка формующих каналов экструзионной головки:

1 – ( $d = 0,032$  м;  $L = 0,02$  м); 7 – ( $\Pi = 0,022$  м;  $F = 0,55$  м<sup>2</sup>;  $L = 0,01$  м);

4а, 4б – ( $\delta_2 = 0,004$  м;  $R_0 = 0,011$  м;  $R_b = 0,014$  м;  $L = 0,01$  м);

3 – ( $R_b = 0,012$  м;  $R_n = 0,016$  м;  $L = 0,008$  м)

3 Рассчитать оптимальные значения варьируемых параметров ( $\varphi$ ,  $h$ ,  $D$ ,  $w$ ,  $L$ ).

3.1 Ввести в программу [6, 9] начальные значения варьируемых параметров ( $\varphi_0$ ,  $h_0$ ,  $D_0$ ,  $w_0$ ,  $L_0$ ) и исходные данные ( $\Delta P_i$ ,  $Q_i$ ,  $T_{\text{см.вх}}$ ,  $T_{\text{см.вых } i}$ ,  $T_{\text{ц}}$ ,  $[\sigma]$ ).

3.2 Занести результаты расчета в бланк отчета (табл. 5.3).

### 5.3 Результаты оптимизации процесса и оборудования

№ п/п	$Q$ , кг/ч	$\Delta P$ , МПа	$\varphi^*$ , град	$h^*$ , м	$D^*$ , м	$W^*$ , с <sup>-1</sup>	$L^*$ , м	$JB$ , %	$T_{\text{см.вых}}$ , °С	$N^*$ , кВт
1										
2										
3										

Варианты задания

№ п/п	Начальные значения параметров управления					$Q_1$ , кг/ ч	$Q_2$ , кг/ч	$Q_3$ , кг/ч	$T_{ц}$ , °С	$\Delta T$ , °С	$\delta_1$ , м	[ $\sigma$ ], МПа
	$\varphi_0$ , °	$h_0$ , м	$D_0$ , м	$w_0$ , с <sup>-1</sup>	$L_0$ , м							
1	17	0,00 4	0,03 2	1,4	0,35	22 0	240	260	75	15	0,00 5	325
2	18	0,00 5	0,04 0	1,0	0,40	20 0	220	240	80	20	0,00 4	320
3	20	0,00 6	0,07 6	0,8	0,45	18 0	200	220	85	25	0,00 3	300
4	19	0,00 7	0,08 2	0,9	0,50	16 0	180	200	65	30	0,00 2	280
5	21	0,00 8	0,07 4	0,7	0,45	14 0	160	180	60	35	0,00 5	285
6	20	0,00 7	0,09 0	0,6	0,65	12 0	140	160	55	40	0,00 4	290
7	16	0,00 6	0,09 0	0,5	0,55	10 0	120	140	50	45	0,00 3	295
8	15	0,00 5	0,07 4	0,2	0,90	80	100	120	45	50	0,00 2	275
9	18	0,00 5	0,08 5	0,1	0,95	60	80	100	55	55	0,00 5	270
10	19	0,00 4	0,09 0	0,2	0,85	40	60	80	45	60	0,00 4	260

Резиновая смесь НО – 68 со следующими параметрами:  $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda = 0,22 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$ ;  $c = 2300 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{град)}$  при неизотермическом режиме экструзии ( $m_0 = 600 \text{ кПа} \cdot \text{с}^n$ ;  $n = 0,2$ ; при  $T_{\text{см. вх}} = 50 \text{ °С}$ ).  $[JB] = 0,5 \%$ ,  $[f] = 0,0005 \text{ м}$ ,  $[\sigma]$  – допускаемые значения подвулканизации, прогиба и напряжение материала шнека.

### Содержание отчета

- 1 Блок-схема расчета напорно-расходовой характеристики для трех значений производительности.
- 2 Распечатка программы расчета напорно-расходовой характеристики для трех значений производительности и результатов расчета в виде графиков функций  $\Delta P(Q_i)$ .
- 3 Распечатка результатов расчета программы оптимизации процесса и оборудования экструзии резиновых смесей в виде графиков функций  $N^*(Q_i)$ ,  $\varphi^*(Q_i)$ ,  $h^*(Q_i)$ ,  $D^*(Q_i)$ ,  $w^*(Q_i)$ ,  $L^*(Q_i)$ .

### Контрольные вопросы

- 1 Сущность процесса экструзии. Конструкции шнековых машин.
- 2 Функциональные зоны канала шнека.
- 3 Зоны канала шнека при переработке резиновых смесей и реактопластов.
- 4 Совместная работа функциональных зон. Гидравлическое взаимодействие экструдера с головкой.
- 5 Движение перерабатываемого материала в зоне дозирования.
- 6 Мощность диссипации в зоне дозирования.
- 7 Влияние конструктивных параметров шнека и технологических параметров режима экструзии на производительность и технологическую мощность шнековой машины.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 480 с.

- 2 Соколов М.В. Исследование и оптимизация процесса и оборудования экструзии резиновых смесей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.02.13. Тамбов, 2001. 16 с.
- 3 Клинков А.С., Кочетов В.И., Жуков Н.П. Основы проектирования и расчета литьевого и прессового оборудования. Тамбов, 1999. 166 с.
- 4 Бекин Н.Г. Расчет технологических параметров и оборудования для переработки резиновых смесей в изделия. Л.: Химия, 1987. 272 с.
- 5 Басов Н.И., Казанков Ю.В., Любартович В.А. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов: Учеб. для вузов. М.: Химия, 1986. 488 с.
- 6 Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин: Монография / М.В. Соколов, А.С. Клинков, О.В. Ефремов, П.С. Беляев, В.Г. Однолько. М.: Издательство Машиностроение-1, 2004. 248 с.
- 7 Проектирование и расчет валковых машин для полимерных материалов / А.С. Клинков, В.И. Кочетов, М.В. Соколов, П.С. Беляев, В.Г. Однолько. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2005. 128 с.
- 8 Основы проектирования экструзионных машин предприятий полимерных материалов / П.С. Беляев, А.С. Клинков, О.Г. Маликов, В.Г. Однолько, М.В. Соколов Тамбов: ТГТУ, 2003. 144 с.
- 9 Св. № 2003611833. от 04.08.2003. Расчет оптимальных технологических и конструктивных параметров экструзии резиновых смесей с учетом минимизации технологической мощности и получения качественного экструдата (Оптимизация экструзионного оборудования) / М.В. Соколов, А.С. Клинков, В.И. Кочетов, П.С. Беляев.