

Министерство образования и науки Российской Федерации
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Тамбовский государственный технический университет"**

**А.С. КЛИНКОВ, М.В. СОКОЛОВ,
В.И. КОЧЕТОВ, В.Г. ОДНОЛЬКО**

ИНЖЕНЕРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСТРУЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Утверждено Учёным советом университета
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлениям подготовки
бакалавров и магистров 261700, 151900



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВПО "ТГТУ"
2012

УДК 621.929.3
ББК Л71
И622

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО "ТГТУ"
Н.П. Жуков

Кандидат технических наук
заместитель директора ОАО "НИИРТМаш"
В.Н. Шашков

И622 Инженерная оптимизация экструзионного оборудования:
учебное пособие / А.С. Клинков, М.В. Соколов, В.И. Кочетов,
В.Г. Однолько. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2012. –
80 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-1081-0.

Рассмотрены современное состояние и перспективы развития расчёта и оптимизации конструктивных параметров экструзионного оборудования для переработки полимерных материалов в изделия и детали. Особое внимание уделено постановке и решению задач минимизации массы основных тяжело нагруженных деталей применяемого оборудования.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 261700 "Технология полиграфического и упаковочного производства", 151900 "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств", при выполнении курсовых проектов и магистерских диссертаций по разработке конструкций минимальной массы прессового и литейного оборудования.

УДК 621.929.3
ББК Л71

ISBN 978-5-8265-1081-0

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тамбовский государственный технический университет" (ФГБОУ ВПО "ТГТУ"), 2012

ВВЕДЕНИЕ

В условиях рыночной экономики предприятие по переработке полимерных материалов сможет оставаться конкурентоспособным лишь в том случае, если будет использовать современные технологии производства, прогрессивное оборудование минимальной металлоёмкости и затрачивать на производство минимальное количество энергоресурсов.

Перевооружение производства и приобретение зарубежных технологий предусматривает привлечение существенных инвестиций. Более целесообразным, по нашему мнению, в сложившихся экономических условиях для обеспечения импортозамещения будет модернизация существующего оборудования путём замены его основных рабочих узлов и деталей на новые, спроектированные на основе современных методов расчёта, учитывающих минимизацию их массы и качество конечного продукта.

Базовым оборудованием для получения различных длинномерных изделий, определяющих технологическую мощность предприятия и качество полученных изделий, является экструзионное оборудование: червячные машины, червячные прессы, экструдеры, инжекционные части литевых машин. Основными элементами этих машин являются: обогреваемый (охлаждаемый) материальный цилиндр; червяк, вращающийся относительно своей оси, создавая высокое давление профилирования перерабатываемого материала.

Материальные цилиндры и другие несущие узлы экструзионного оборудования должны обладать достаточными прочностными характеристиками и выдерживать расчётные силовые нагрузки.

В учебном пособии представлены новые методы расчёта, приведены алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие производить автоматизированный расчёт и проектирование конструкций элементов экструзионного оборудования. С их помощью можно рассчитать конструктивные параметры основных тяжело нагруженных деталей при условии минимальной их массы и ограничениях на прочность материала (жёсткость, устойчивость конструкции).

Разработанные авторами методики основываются на базовых теориях прочности и более точных расчётных моделях, построенных для процесса оптимизации конструкций основных тяжело нагруженных элементов экструзионного оборудования.

1. МИНИМИЗАЦИЯ МАССЫ ШНЕКОВ ЭКСТРУЗИОННЫХ МАШИН

1.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МИНИМИЗАЦИИ МАССЫ ШНЕКА ЭКСТРУЗИОННЫХ МАШИН

Основная цель данного раздела состоит в том, чтобы на основании расчётных формул (1.1) и (1.2) найти такие оптимальные геометрические параметры детали (параметры управления $\bar{x} = (x_1, \dots, x_i)$), которые наряду с прочностными характеристиками и эффективным отводом тепла обеспечивали бы минимальную массу конструкции:

$$M(\bar{x}) = \rho V(\bar{x}); \quad (1.1)$$

$$\sigma_{\text{экв } j} = F_j(\bar{x}), \quad (1.2)$$

где $M(\bar{x})$ – масса участка детали единичной длины; $V(\bar{x})$ – зависимость объёма конструкции детали от параметров управления; $\sigma_{\text{экв } j}$ – эквивалентные напряжения в опасных сечениях детали; $F_j(\bar{x})$ – зависимость эквивалентных напряжений в опасных сечениях детали от параметров управления; $j = (1, \dots, k)$, k – число опасных сечений конструкции детали.

В связи с этим ставится задача: найти вектор $\bar{x} = (x_1, \dots, x_i)$, который минимизирует целевую функцию, характеризующую расход материала (массы):

$$M(\bar{x}) \Rightarrow \min. \quad (1.3)$$

При этом должны выполняться ограничения по прочности

$$\max \sigma_{j} \leq [\sigma] \quad (1.4)$$

и геометрические ограничения по параметрам управления

$$a_i \leq x_i \leq b_i, \quad (1.5)$$

где $i = (1, \dots, k_u)$, k_u – число параметров управления.

Здесь $\max \sigma_{\text{экв } j}$ – максимальные эквивалентные напряжения в опасных сечениях детали, определяемые по формуле (1.2); $[\sigma]$ – допускаемые напряжения для материала детали; x_i – геометрические размеры детали, которые принимаются равными: a_i , b_i – наименьший и наибольший значения управляемых параметров; ρ – плотность материала детали.

Прочностные расчёты деталей шнековых машин выполняются после предварительного выбора геометрических размеров шнека и расчёта тех-

нологических параметров. Прочностные расчёты выполняются с учётом вида силовой нагрузки и режима работы. Целью прочностного расчёта является определение размеров основных деталей машины (толщины стенки цилиндра, размеров соединительных элементов, максимального прогиба шнека), выбор и расчёт упорно-опорных элементов и др.

Прочностной расчёт производится на максимально возможные усилия, возникающие в шнековых машинах.

1. Максимальное давление, развиваемое шнеком (P_{\max}). Максимальное давление развивается шнеком, когда отверстие в головке закрыто и нет выхода материала из машины (производительность равна нулю):

$$\alpha_i F_\alpha n - \beta_i F_\beta \frac{P_{\max}}{\mu_{\text{cp}}} = 0, \quad (1.6)$$

откуда

$$P_{\max} = \frac{\alpha_i F_\alpha n \mu_{\text{cp}}}{\beta_i F_\beta}, \quad (1.7)$$

где μ_{cp} – средняя по длине шнека вязкость перерабатываемого материала; α_i и β_i – постоянные прямого и обратного потоков для шнеков с постоянной или переменной глубиной нарезки в зоне дозирования или переменным шагом; n – частота вращения шнека; F_α и F_β – коэффициенты формы прямого и обратного потоков (при переработке термопластичных материалов принимают $F_\alpha = F_\beta = 1$).

Значение средней вязкости материала μ_{cp} определяют из следующего соотношения:

$$Q = \alpha_i F_\alpha n - \beta_i F_\beta \frac{\Delta P_{\text{общ}}}{\mu_{\text{cp}}}, \quad (1.8)$$

где Q – производительность машины; $\Delta P_{\text{общ}}$ – перепад давления в головке.

Откуда

$$\mu_{\text{cp}} = \frac{\beta_i F_\beta \Delta P_{\text{общ}}}{\alpha_i F_\alpha n - Q}. \quad (1.9)$$

2. Максимальное осевое усилие, действующее на шнек,

$$S_{\text{ос}} = P_{\max} F, \quad (1.10)$$

где F – площадь поперечного сечения шнека

$$F = \frac{\pi D_{\text{н}}^2}{4}, \quad (1.11)$$

где $D_{\text{н}}$ – наружный диаметр шнека, м.

3. Крутящий момент, действующий на шнек, $H \cdot m$,

$$M_{\text{кр}} = 573 \frac{N}{n}, \quad (1.12)$$

где $N = N_1 + N_2$ – мощность, затрачиваемая на продвижение материала по каналу шнека, Вт; n – частота вращения шнека, с^{-1} .

1.2. РАСЧЁТЫ ШНЕКОВ НА ПРОЧНОСТЬ, ЖЁСТКОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ

Процессы переработки пластических масс и резиновых смесей в шнековых машинах ведутся при значительных давлениях, достигающих 50 МПа, что определяет повышенные требования к расчётам на прочность деталей и узлов машин.

Основное требование, предъявляемое к шнекам, – обеспечение наибольшей производительности при необходимом качестве пластикации и наименьшей потребляемой мощности, которые зависят не только от реологических свойств смеси, но и конструктивных параметров шнека.

В настоящее время имеющиеся в литературе рекомендации для проектирования шнеков недостаточны, так как не учитывают их прочностных характеристик. Например, выбранная по рекомендациям длина l , отношение D/D_1 могут удовлетворять требованиям по производительности и качеству пластикации, однако за счёт продольно-поперечного изгиба шнека будут наблюдаться преждевременный износ его и материального цилиндра и дополнительные затраты мощности.

Применяется методика расчёта шнеков на прочность, жёсткость и устойчивость с постоянным шагом винтовой линии, переменным поперечным сечением в широком интервале изменения рабочей длины шнека $l = (10...35)D$ при действии гармонических поперечных нагрузок.

1.2.1. Расчёт консольного шнекового вала на прочность и жёсткость

Задачей прочностного расчёта является проверка запроектированных на основании предыдущих расчётов размеров шнека и определение максимально допустимого прогиба с целью недопущения контакта витков шнека с внутренней поверхностью цилиндра. Расчётная схема шнека представлена на рис. 1.1.

Прочностной расчёт шнека производится исходя из максимально возможных значений крутящего момента $M_{\text{кр}}$, осевого усилия $S_{\text{ос}}$, величина которых рассчитывается по формулам (1.10) и (1.12).

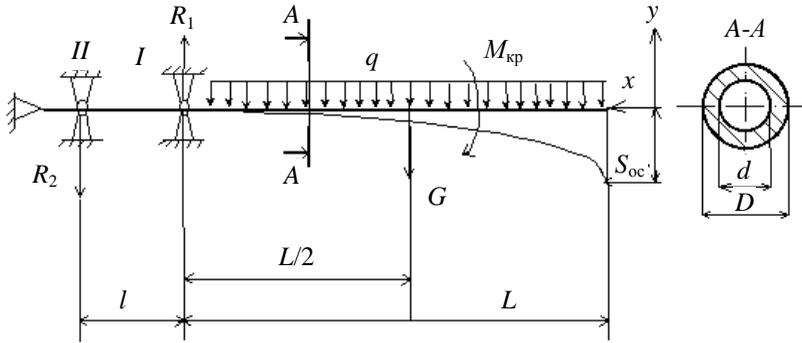


Рис. 1.1. Расчётная схема нагружения шнека и его опор:

S_{oc} – осевое усилие от давления перед формирующим инструментом;
 G – вес материала шнека; R_1, R_2 – реакции в опорах I и II соответственно

Расчёт шнеков возможен в двух вариантах в зависимости от его жёсткости (гибкости):

- рассматривается действие максимального осевого усилия S_{oc} и крутящего момента $M_{кр}$ с учётом собственного веса шнека;
- расчёт на продольно-поперечный изгиб с учётом максимального осевого усилия S_{oc} и собственного веса шнека.

Для определения варианта расчёта проверяем шнек на гибкость по формуле

$$\lambda_b = \frac{\mu L}{i}, \quad (1.13)$$

где λ_b – гибкость вала шнека; μ – коэффициент, зависящий от способа закрепления концов вала, в данном частном случае $\mu = 2$; L – длина шнека, м; i – радиус инерции сечения, определяемый из

$$i = \sqrt{\frac{J}{F}}, \text{ м}, \quad (1.14)$$

где $J = \frac{\pi D^4}{64}(1 - \alpha^4)$, м^4 – момент инерции поперечного сечения $A-A$

(см. рис. 1.1); $F = \frac{\pi D^2}{4}(1 - \alpha^2)$ – площадь поперечного сечения шнека в

сечении $A-A$, м^2 ; $\alpha = \frac{d}{D}$, где d – диаметр осевого отверстия шнека, м.

После подстановки значений J и F получим

$$i = \frac{D}{4} \sqrt{1 + \alpha^2}, \text{ м} \quad (1.15)$$

и по формуле (1.13) находим значение λ . Если $\lambda < 50$, то расчёт шнека проводим по первому варианту, если $\lambda \geq 50$, то по второму.

Первый вариант расчёта. Максимальные касательные напряжения на поверхности шнека

$$\tau_{\max} = \frac{M_{\text{кр}}}{W_{\text{п}}}, \quad (1.16)$$

где $W_{\text{п}}$ – полярный момент сопротивления, м^3 :

$$W_{\text{п}} = \frac{\pi D^3}{16} (1 - \alpha^4).$$

Окончательно имеем

$$\tau_{\max} = \frac{16M_{\text{кр}}}{\pi D^3 (1 - \alpha^4)}, \text{ н/м}^2. \quad (1.17)$$

Нормальные напряжения вызываются осевой силой $S_{\text{ос}}$ и распределённой нагрузкой q . Максимальные напряжения будут возникать в месте закрепления шнека (у первого подшипника)

$$\sigma_{\max} = \frac{S_{\text{ос}}}{F} + \frac{M_{\text{и max}}}{W_{\text{н.о}}}, \quad (1.18)$$

где $M_{\text{и max}}$ – максимальный изгибающий момент от распределённой нагрузки шнека, $\text{Н}\cdot\text{м}$; $W_{\text{н.о}}$ – осевой момент сопротивления относительно нейтральной оси, м^3 :

$$M_{\text{и max}} = \frac{\gamma FL^2}{2},$$

где $\gamma = \rho g$, Н/м^3 ; ρ – плотность материала шнека, кг/м^3 ; $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м/с^2 ; F – площадь поперечного сечения шнека, м^2 .

С учётом значения площади поперечного сечения шнека

$$F = \frac{\pi D^2}{4} (1 - \alpha^2)$$

изгибающий момент будет равен

$$M_{\text{и max}} = \frac{\gamma L^2}{2} \frac{\pi D^2}{4} (1 - \alpha^2). \quad (1.19)$$

Осейвой момент сопротивления относительно нейтральной оси

$$W_{\text{н.о}} = \frac{\pi D^3}{32} (1 - \alpha^4).$$

После подстановки соответствующих значений и преобразований уравнение (1.17) принимает вид

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{4S_{\text{ос}}(1 + \alpha^4) + \pi \gamma L^2 D (1 - \alpha^4)}{\pi D^2 (1 - \alpha^4)}. \quad (1.20)$$

Условие прочности шнека по третьей теории прочности

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{\text{max}}^2 + 4\tau_{\text{max}}^2} \leq [\sigma],$$

где $[\sigma]$ – допускаемое для материала и заданных условий его работы напряжение, Н/м².

Максимальный прогиб шнека от распределённой нагрузки q

$$f_{\text{max}} = \frac{qL^4}{8EJ},$$

где E – модуль упругости материала шнека, Н/м²; J – момент инерции поперечного сечения шнека, м⁴.

Второй вариант расчёта. При продольно-поперечном изгибе уравнение изогнутой оси шнека

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = M_{\text{и}}. \quad (1.21)$$

Уравнение изгибающего момента

$$M_{\text{и}} = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + M_{\text{н}} \cos kx + \frac{Q_{\text{н}}}{k} \sin kx, \quad (1.22)$$

где параметр $k = \sqrt{\frac{P}{EJ}}$; $M_{\text{н}}$ – начальное значение изгибающего момента при $x = 0$; $Q_{\text{н}}$ – начальное значение поперечной силы при $x = 0$, равное

$$Q_{\text{н}} = \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{\cos kL}. \quad (1.23)$$

Для изгибающего момента, подставив из этого уравнения значение $Q_{\text{н}}$ в уравнение (1.22), получим

$$M_{\text{н}} = \frac{q}{k^2}(1 - \cos kx) + \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{k \cos kL} \sin kx = 0. \quad (1.24)$$

Для определения $M_{\text{н max}}$ исследуем уравнение (1.23) на максимум

$$\frac{dM_{\text{н}}}{dx} = \frac{q}{k} \sin kx + \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right) k}{k \cos kL} \cos kx = 0. \quad (1.25)$$

После соответствующих преобразований получим

$$\operatorname{tg} kx = \operatorname{tg} kL - \frac{kL}{\cos kL}. \quad (1.26)$$

Из уравнения (1.25) находим значение x , при котором изгибающий момент $M_{\text{н}}$ будет максимальным, и по формуле (1.24) найдем величину максимального изгибающего момента $M_{\text{н max}}$.

Максимальные касательные напряжения на поверхности шнека

$$\tau_{\text{max}} = \frac{M_{\text{кр}}}{W_{\text{п}}}. \quad (1.27)$$

С учётом полярного момента сопротивления сечения шнека максимальное касательное напряжение будет

$$\tau_{\text{max}} = \frac{16M_{\text{кр}}}{\pi D^3 (1 - \alpha^4)}. \quad (1.28)$$

Максимальное нормальное напряжение от максимального осевого усилия $S_{\text{ос}}$ и распределённой нагрузки q будет равно

$$J_2 = \frac{\pi(D_2^4 - d^4)}{64}, \quad (1.29)$$

где $F = \frac{\pi D^2}{4}(1 - \alpha^2)$ и $W_{\text{н.о}} = \frac{\pi D^3}{32}(1 - \alpha^4)$ – соответственно площадь поперечного сечения шнека (м^2) и осевой момент сопротивления (м^3) относительно нейтральной оси.

Условие прочности шнека по третьей теории прочности

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{\max}^2 + 4\tau_{\max}^2} \leq [\sigma].$$

Максимальный прогиб шнека $f_{\max} = y_{\max}$ для второго варианта расчёта определяется следующим образом.

Подставим значение изгибающего момента из уравнения (1.24) в дифференциальное уравнение изогнутой оси шнека (1.21) и получим

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + A \sin kx, \quad (1.30)$$

где $A = \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{k \cos kL}$.

После двойного интегрирования уравнения (1.30) и нахождения значений постоянных интегрирования C_1 и C_2 уравнение изогнутой оси шнека примет вид

$$EJy = \frac{qx^2}{2k^2} + \frac{q}{k^4} \cos kx - \frac{A}{k^2} \sin kx + \left(\frac{q}{k^3} \sin kL + \frac{A}{k} \cos kL - \frac{pL}{k^2} \right) x + \frac{qL^2}{2k^2} - \frac{q}{k^4} \cos kL + \frac{A}{k^2} \sin kL - \frac{qL}{k^3} \sin kL - \frac{AL}{k} \cos kL. \quad (1.31)$$

Максимальный прогиб шнека $f_{\max} = y_{\max}$ будет при $x = 0$ и определится по формуле

$$f_{\max} = \frac{1}{EJ} \left[\frac{q}{k^2} \left(\frac{1}{k^2} + \frac{L^2}{2} \right) - \frac{1}{k} \left(\frac{q}{k^3} + AL \right) \cos kL - \frac{1}{k^2} \left(\frac{qL}{k} - A \right) \sin kL \right]. \quad (1.32)$$

Определив максимальный прогиб по формуле (1.32), необходимо сопоставить его значение с расчётным и практически установленной величиной зазора между шнеком и внутренней поверхностью цилиндра. Полученный прогиб должен быть меньше этого зазора.

Предлагается для расчёта на прочность и жёсткость шнекового консольного вала программа 1, её порядок работы поясняет табл. 1.1, схема алгоритма (рис. 1.2) и текст программы 1 (прил.).



Рис. 1.2. Блок-схема алгоритма расчёта консольного шнека на прочность и жёсткость

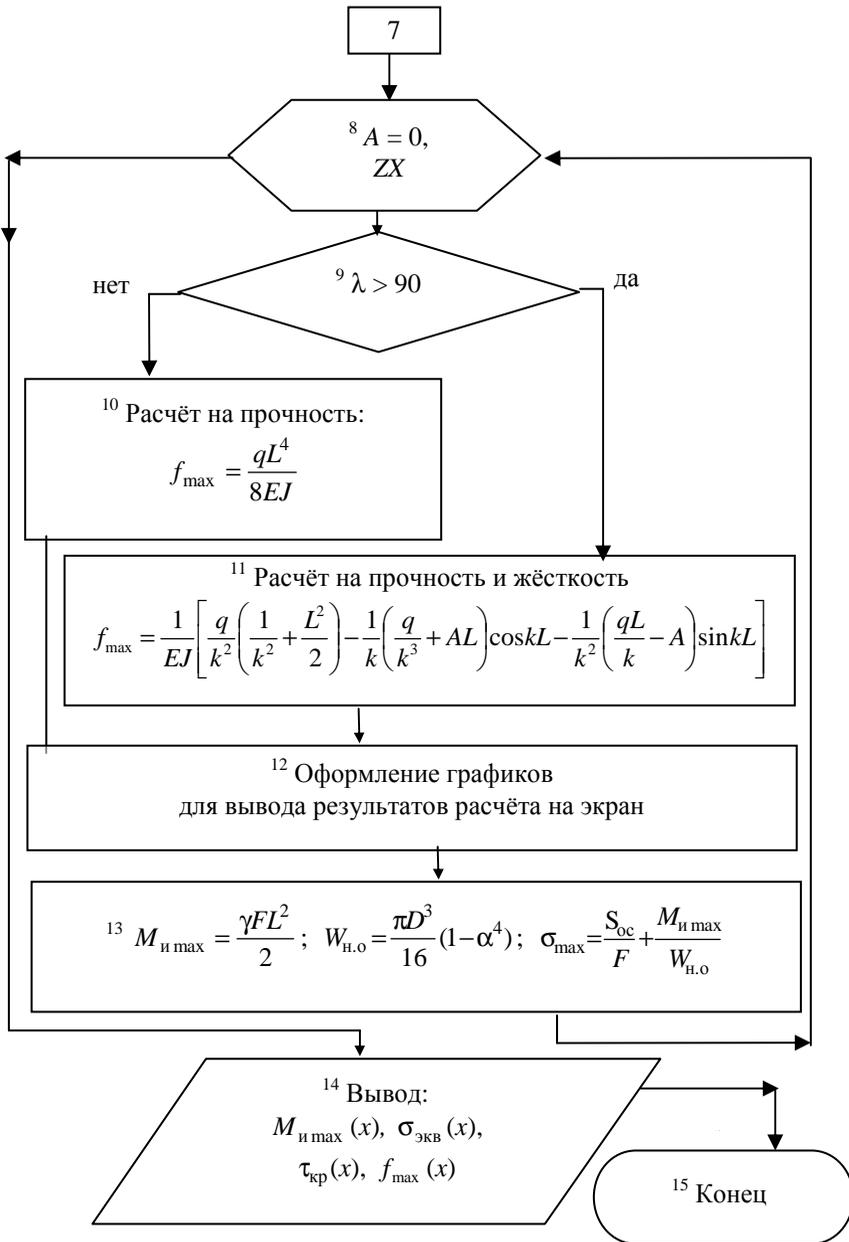


Рис. 1.2. Окончание

Таблица 1.1

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе
1. Наружный диаметр шнека, м	D	d
2. Диаметр осевого отверстия шнека, м	d	d1
3. Длина нарезной части шнека, м	L	L
4. Текущая координата по длине шнека, м	x	X
5. Шаг витка, м	t	T
6. Угол подъёма витка	φ_i	FI
7. Максимальное давление на конце вала, МПа	P_{\max}	P
8. Касательное напряжение, МПа	$\tau(x)$	TAU
9. Модуль упругости 1 рода, МПа	E	E
10. Допускаемое напряжение, МПа	$[\sigma]$	SIG
11. Касательное напряжение, МПа	$\tau(x)$	TAU
12. Плотность материала шнека, кг/м ³	ρ	RO
13. Поперечная сила, Н	Q_p	QP
14. Изгибающий момент, Н·м	$M_{и}$	MIZ
15. Крутящий момент, Н·м	$M_{кр}$	MKR
16. Эквивалентное напряжение, МПа	$\sigma_{\text{эkv}}$	SIGEKV
17. Мощность привода шнекового вала, Вт	N	N
18. Ускорение свободного падения, м/с ²	g	g1

1.2.2. Расчёт консольного шнекового вала на прочность и жёсткость с учётом гидромеханического нагружения

Наиболее широкое распространение в шнековых машинах получили шнеки с трапецеидальным и прямоугольным сечением витка. Общий вид шнека показан на рис. 1.3.

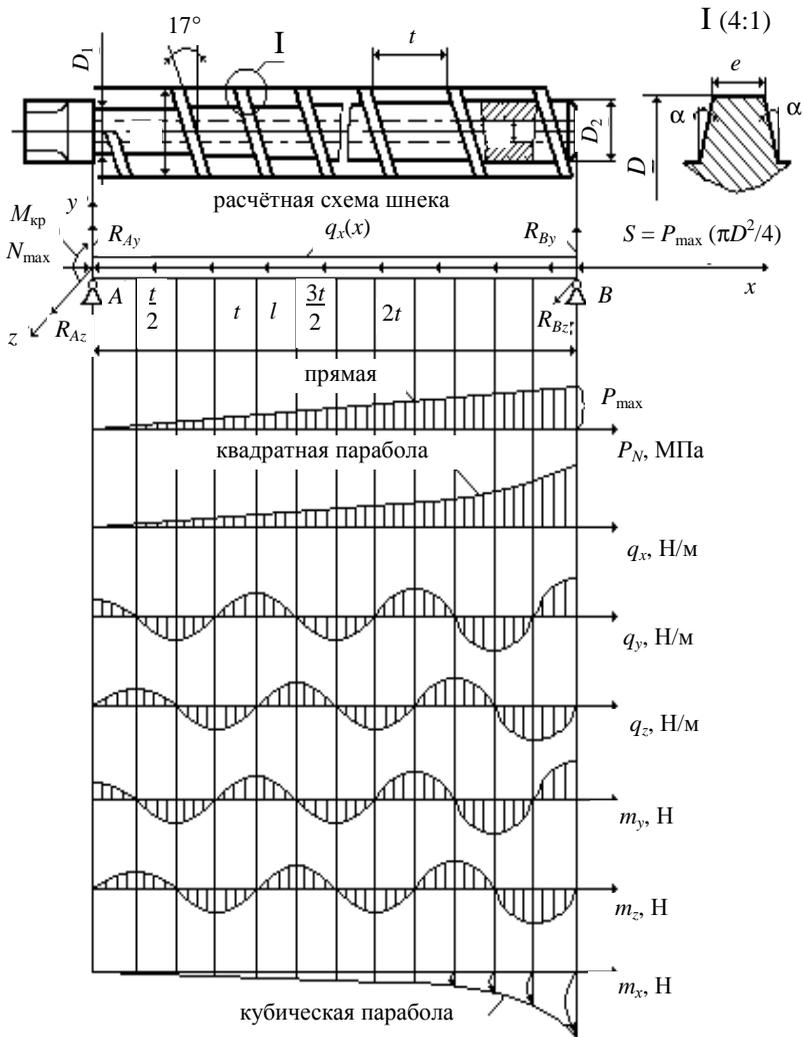


Рис. 1.3. Схема действия внешних нагрузок на шнек

Основные геометрические характеристики сердечника и профиля витка шнека: l – рабочая длина; n – число витков; t – шаг нарезки; φ – угол подъёма винтовой нарезки; D – наружный диаметр шнека; D_1 и D_2 – диаметры сердечника в начале и в конце зоны дозирования соответственно; e – ширина гребня витка; α – угол наклона профиля витка в плоскости, проходящей через ось шнека (для прямоугольного профиля $\alpha = 0$); d – диаметр внутреннего канала сердечника шнека.

1.2.3. Нагрузки, действующие на шнек

В процессе интрузии на витки шнека со стороны перерабатываемого материала действует нормальное давление, которое по длине изменяется по линейному закону (рис. 1.3).

$$P = P_{\max} \frac{x}{l}, \quad (1.33)$$

где x – текущая координата; P_{\max} – максимальное давление в перерабатываемом материале, МПа.

В дальнейшем в расчётах будем исходить из предположения, что давление P_{\max} действует только со стороны напорной части гребня витка. В действительности с противоположной стороны витка шнека действует противодавление, но, как показали экспериментальные исследования, они намного меньше основного напорного давления. Такое допущение хотя и приводит к некоторому завышению внешних нагрузок, но значительно упрощает расчёты на прочность и обеспечивает большой запас прочности. На рисунке 1.4 дана схема действующих на витки шнека нагрузок.

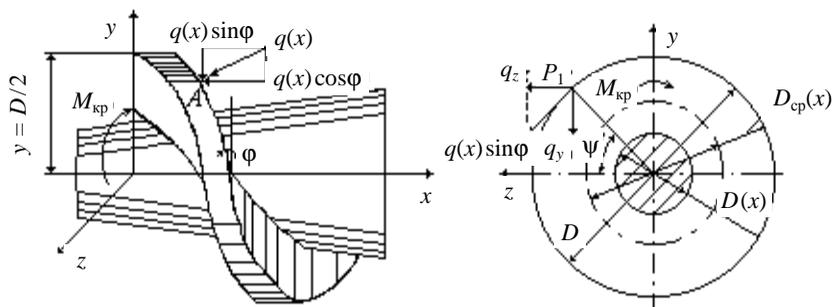


Рис. 1.4. Схема действия нагрузок на виток шнека

Выражение для распределённой нагрузки $q(x)$, действующей на витки шнека, имеет вид

$$q(x) = \delta P_{\max} \left(\frac{D - D_1}{2} - \frac{D_2 - D_1}{2} \frac{x}{l} \right) \frac{x}{l}, \quad (1.34)$$

где $\delta = \sqrt{\left(\frac{D_2 - D_1}{4l} \right)^2 + \left(\frac{D_{\text{cp}}(x)}{t} \pi \right)^2} + 1$ – элемент длины дуги среднего диаметра витка; $D_{\text{cp}}(x) = \frac{D + D_1}{2} + \frac{D_2 - D_1}{2} \frac{x}{l}$ – текущий диаметр витка шнека; $D(x) = D_1 + (D_2 - D_1) \frac{x}{l}$ – текущий диаметр сечения сердечника шнека (рис. 1.4); $\psi = \frac{2\pi}{t} x$ – текущая угловая координата точки A в месте приложения распределённой нагрузки $q(x)$.

Распределённая нагрузка $q(x)$ приводит к составляющим нагрузок q_x, q_y, q_z и распределённым моментам m_x, m_y, m_z относительно осей x, y, z :

$$\left\{ \begin{array}{l} q_x = -q(x) \cos \varphi; \\ q_y = -q(x) \sin \varphi \cos ax; \\ q_z = q(x) \sin \varphi \sin ax; \\ m_x = q(x) \sin \varphi \frac{D_{\text{cp}}(x)}{2}; \\ m_y = q(x) \cos \varphi \cos ax \frac{D_{\text{cp}}(x)}{2}; \\ m_z = q(x) \cos \varphi \sin ax \frac{D_{\text{cp}}(x)}{2}. \end{array} \right. \quad (1.35)$$

Графики распределённых внешних нагрузок по длине шнека приведены на рис. 1.3.

На торец шнека помимо распределённых нагрузок действует со стороны напорной части сосредоточенная продольная сила (максимальное осевое усилие)

$$S = P_{\max} \frac{\pi D^2}{4}.$$

В результате действия всех указанных выше нагрузок сердечник шнека испытывает продольно-поперечный изгиб и кручение.

1.2.4. Расчёт внутренних усилий в поперечных сечениях шнека

При расчёте шнека на прочность, жёсткость и устойчивость введём следующие допущения:

- влиянием витков на общее напряжённо-деформированное состояние шнека пренебрегаем, так как размеры поперечного сечения витка малы по сравнению с диаметром сердечника, а шаг нарезки достаточно большой по отношению к общей длине шнека;
- концевые сечения шнека имеют свободные опирания.

В рамках принятых допущений расчётная схема шнека принята как переменный по длине стержень круглого сечения с шарнирным опиранием по концам (рис. 1.3).

Выражения для внутренних усилий N_x, M_x, M_y, M_z определяются из условия равновесия выделенного элемента длиной dx (рис. 1.5)

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum x = 0; \quad dN_x + q_x dx = 0; \\ \sum y = 0; \quad -dQ_y + q_z dx = 0; \\ \sum z = 0; \quad q_z dx - dQ_z = 0; \\ \sum m_x = 0; \quad M_x + m_x dx = 0; \\ \sum m_y = 0; \quad -m_y dx + Q_z dx - dM_y = 0; \\ \sum m_z = 0; \quad m_z dx + dM_z - Q_y dx = 0. \end{array} \right. \quad (1.36)$$

Подставляя в эти уравнения выражения (1.34), (1.35) и удовлетворяя граничным условиям опирания шнека

$$\begin{aligned} x = l; \quad N_x = S = -P_{\max} \frac{\pi D^2}{4}; \quad M_x = M_y = M_z = 0; \\ x = 0; \quad M_y = M_z = 0, \end{aligned}$$

получим окончательные формулы для определения внутренних силовых факторов:

$$N_x(x) = \delta P_{\max} \cos \varphi l \left[\frac{D - D_1}{4} \left(\frac{x^2}{l^2} - 1 \right) - \frac{D_2 - D_1}{6} \left(\frac{x^3}{l^3} - 1 \right) \right] - P_{\max} \frac{\pi D^2}{4}; \quad (1.37)$$

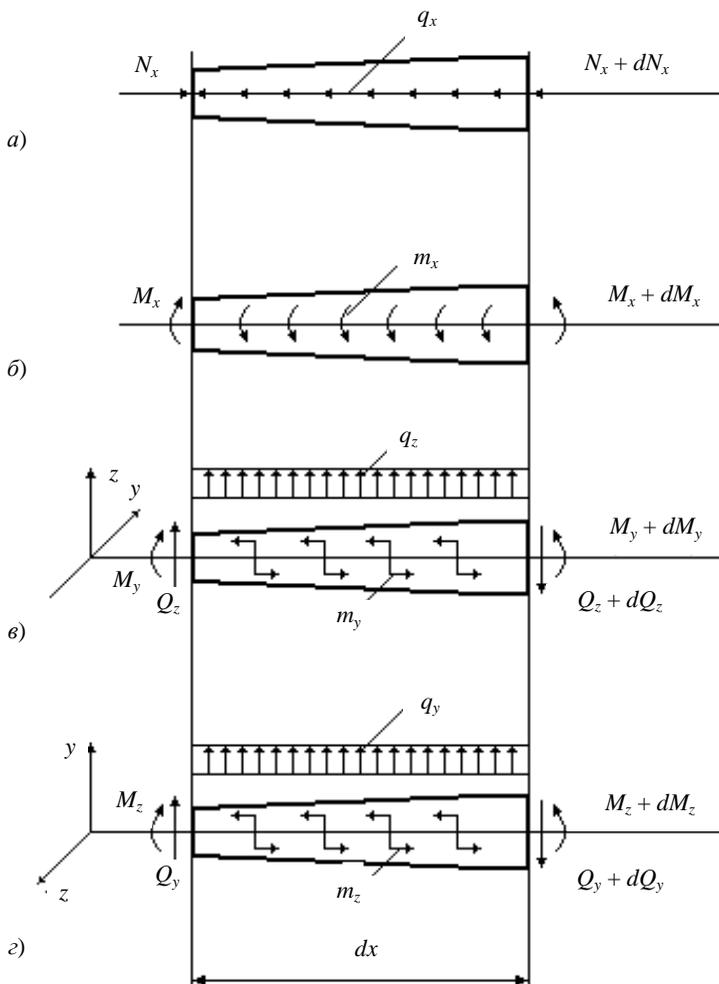


Рис. 1.5. Схема действия внутренних усилий для элемента dx

$$\begin{aligned}
 M_x(x) = & -\delta P_{\max} \frac{\sin \varphi}{8} l \left\{ \frac{D^2}{2} \left(\frac{x^2}{l^2} - 1 \right) - D_1^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{2x}{3l} + \frac{1}{4} \frac{x^2}{l^2} \right) \frac{x^2}{l^2} - \frac{1}{12} \right] - \right. \\
 & \left. - 2D_1 D_2 \left[\left(\frac{1}{3} - \frac{1}{4} \frac{x}{l} \right) \frac{x^3}{l^3} - \frac{1}{12} \right] - D_2^2 \frac{1}{4} \left(\frac{x^4}{l^4} - 1 \right) \right\}; \quad (1.38)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_y(x) = & \frac{\delta P_{\max} \sin \varphi}{2l} \left\{ (D - D_1) \left[-\frac{2 \cos ax}{a^3} - \frac{x \sin ax}{a^2} + \frac{2}{a^3} \right] - \right. \\
& - \frac{D_2 - D_1}{l} \left[\frac{6}{a^4} \sin ax - \frac{4x}{a^3} \cos ax - \frac{x^2}{a^2} \sin ax - \frac{4x}{a^3} \right] \left. \right\} - \\
& - \frac{\delta P_{\max} \cos \varphi}{8} \left\{ (D^2 - D_1^2) \frac{1}{l} \left[\frac{\cos ax}{a^2} + \frac{x \sin ax}{a} + \frac{1}{a^2} \right] + \right. \\
& + 2D_1(D_1 - D_2) \frac{1}{l^2} \left[\frac{2x \cos ax}{a^2} + \left(\frac{x^2}{a} - \frac{2}{x^3} \right) \sin ax - \frac{2x}{a^2} \right] - (D_2 - D_1)^2 \times \\
& \times \frac{1}{l^3} \left[\left(\frac{3x^2}{a^2} - \frac{6}{a^4} \right) \cos ax + \left(\frac{x^3}{a} - \frac{6x}{a^3} \right) \sin ax + \frac{6}{a^4} - \frac{3lx}{a^2} \right] \left. \right\};
\end{aligned} \tag{1.39}$$

$$\begin{aligned}
M_z(x) = & -\frac{\delta P_{\max} \sin \varphi}{2l} \left\{ (D - D_1) \left[-\frac{2 \sin ax}{a^3} - \frac{x \cos ax}{a^2} + \frac{x}{a^3} \right] - \right. \\
& - \frac{D_2 - D_1}{l} \left[\frac{6}{a^4} \cos ax + \frac{4x}{a^3} \sin ax - \frac{x^2}{a^2} \cos ax - \frac{6}{a^4} + \frac{lx}{a^2} \right] \left. \right\} - \\
& - \frac{\delta P_{\max} \cos \varphi}{8} \left\{ (D^2 - D_1^2) \frac{1}{l} \left[\frac{\sin ax}{a^2} - \frac{x \cos ax}{a} + \frac{x}{a} \right] + \right. \\
& + 2D_1(D_1 - D_2) \frac{1}{l^2} \left[\frac{2x \sin ax}{a^2} - \left(\frac{x^2}{a} - \frac{2}{a^3} \right) \cos ax - \frac{2}{a^3} + \frac{lx}{a} \right] - (D_2 - D_1)^2 \times \\
& \times \frac{1}{l^3} \left[\left(\frac{3x^2}{a^2} - \frac{6}{a^4} \right) \sin ax + \left(\frac{x^3}{a} - \frac{6x}{a^3} \right) \cos ax - \frac{6x}{a^3} + \frac{l^2 x}{a} \right] \left. \right\}.
\end{aligned} \tag{1.40}$$

Здесь $a = \frac{2\pi}{t}$.

Примечание: при выводе формул (1.37) – (1.40) принято $\delta \approx \text{const}$, так как в реальных шнеках $\frac{D + D_1}{2} \gg \frac{D_2 - D_1}{2}$.

1.2.5. Определение прогибов шнека

Дифференциальные уравнения упругой линии шнека от поперечных нагрузок в плоскостях XOY и ZOX имеют вид:

$$EJ(x) \frac{d^2 V_y}{dx^2} = M_z; \quad (1.41)$$

$$EJ(x) \frac{d^2 V_z}{dx^2} = M_y. \quad (1.42)$$

Здесь V_y и V_z – прогибы в текущем сечении x в направлении осей y и z соответственно; $J(x) = J_0(1 + \beta x)^4$ – момент инерции текущего сечения;

$$J_0 = \frac{\pi(D_1^4 - d^4)}{64}; \quad \beta = \frac{D_2 - D_1}{lD_1}.$$

Решение уравнений (1.41) и (1.42) позволит обоснованно назначить величину необходимого зазора между шнеком и стенкой материального цилиндра, а также проводить расчёты на прочность при продольно-поперечном изгибе. Известно, что для шнеков с расстоянием между опорами $l > 10D$, что соответствует гибкости стержня $\lambda > 50$, заметно увеличивается влияние напряжений от действия продольно-поперечного изгиба. Используя приёмы решения дифференциальных уравнений (1.41), (1.42), изложенные в работе [1], запишем окончательные выражения для прогибов:

$$\begin{aligned} V_y(x) = & \frac{1}{EJ_0} \left[3\delta \frac{P_{\max} \sin \varphi (D_2 - D_1)}{2} \frac{2D_1(D_2 - D_1) \times}{l^2 a^2} \right. \\ & \times \delta \frac{P_{\max} \cos \varphi}{8} \frac{1}{L^2 a} \left. \right] \left[\left(\frac{x^4}{12} - \frac{lx^3}{6} + \frac{l^3 x}{12} \right) - 4\beta \times \right. \\ & \times \left(\frac{x^5}{20} - \frac{lx^4}{12} + \frac{l^4 x}{30} \right) + 10\beta^2 \left(\frac{x^6}{30} - \frac{lx^5}{20} + \frac{l^5 x}{60} \right) \left. \right] - \\ & - \left[\delta \frac{P_{\max} \cos \varphi (D_2 - D_1)^2}{8} \frac{1}{L^3 a} \right] \left[\left(\frac{x^5}{20} - \frac{l^2 x^3}{6} + \frac{14l^4 x}{120} \right) - \right. \\ & \left. - 4\beta \left(\frac{x^6}{30} - \frac{l^2 x^4}{12} + \frac{18l^5 x}{360} \right) + 10\beta^2 \left(\frac{x^7}{42} - \frac{l^2 x^5}{20} + \frac{22l^6 x}{840} \right) \right]. \quad (1.43) \end{aligned}$$

Программа расчёта консольного шнека на прочность, жёсткость и устойчивость с учётом гидродинамического нагружения показана в программе 2 (прил.) и поясняется блок-схемой рис. 1.6 и табл. 1.2.

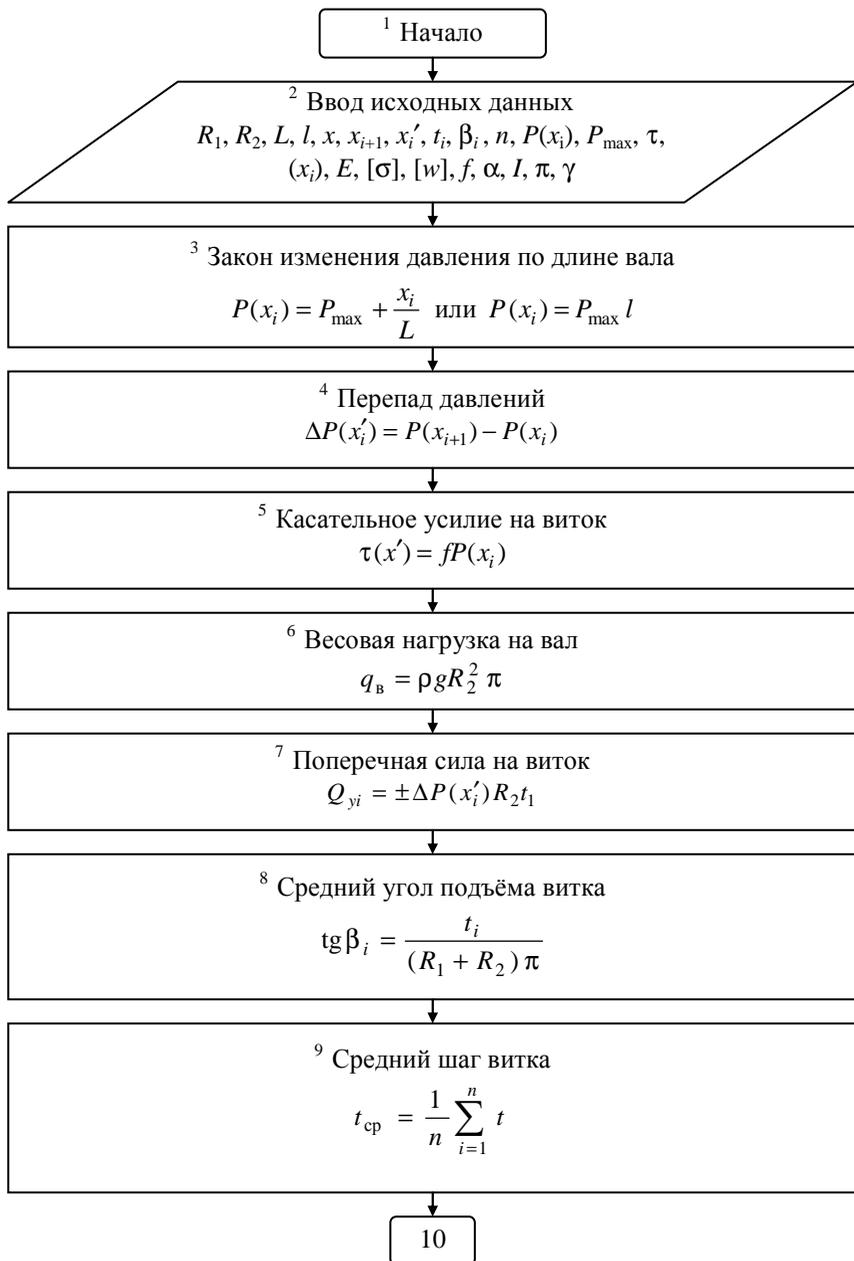


Рис. 1.6. Блок-схема алгоритма расчёта консольного шнекового вала на прочность и жёсткость с учётом гидромеханического нагружения

9

10 Крутящий момент

$$M_{кр} = \left[\sum_{i=1}^n \Delta P(x'_i) \operatorname{tg} \beta_i + \left(\frac{2}{t_{сп}} + \frac{3R_2^2}{R_1^3 - R_2^3} \right) \int_0^L fP(x'_i) dx_i \right] \frac{2\pi(R_1^3 - R_2^3)}{3}$$

11 Изгибающий момент на виток

$$M_{yi} = \pm \left[\Delta P(x_i) \left(\operatorname{tg} \beta_i \frac{R_1^2 - R_2^2}{2} + \frac{R_2}{2\pi} t_i \right) 2\tau(x_i) \frac{R_1^2 - R_2^2}{2} \right] t_i$$

12 Выполнение условия жёсткости

$$W = \frac{1}{6 \left[E \frac{\pi R_2^4}{4} - \frac{4}{\pi} P_{\max} R_1^2 L^2 \right]} q_b L^4 \left[\frac{3}{4} + \frac{1}{L} + \frac{1}{4} \left(\frac{l}{L} \right)^4 \right] +$$

$$+ \sqrt{\left[2Ll \sum_{i=1}^n Q_{y1} x'_i + 3L \sum_{i=1}^n Q_{y1} (x'_i)^2 - \sum_{i=1}^n Q_{y1} (x'_i)^3 \right]^2 +$$

$$+ \left[2lL \sum_{i=1}^n M_{y1} + 6L \sum_{i=1}^n M_{y1} x'_i - 3 \sum_{i=1}^n M_{y1} (x'_i)^2 \right]^2} \leq [W]$$

13 Выполнение условия прочности

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{4}{\pi R_2^3} \sqrt{\left[W P_{\max} R_1^2 \pi + P_{\max} \frac{\pi R_1^2 R_2}{4} \right]^2 +$$

$$+ \frac{q_b L^2}{2} \sqrt{\left(\sum M_i \right)^2 + \left(\sum Q_{yi} x_i \right)^2} + M_{кр}^2} \leq [\sigma]$$

14 Вывод исходных данных и результатов расчёта

 $R_1, R_2, L, l, P_{\max}, [\sigma], [w], E, \gamma, f, i, W, \sigma_{\text{экв}}$

15 Конец

Рис. 1.6. Окончание

Таблица 1.2

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
1. Радиус вала с витками, м	R_1	R1
2. Радиус вала, м	R_2	R2
3. Длина вала между опорами, м	L	LM
4. Длина консольной части вала, м	L_0	LB
5. Расстояние среднего сечения между i -м и $i + 1$ витками от опоры, м	x_i	XI
6. Расстояние средней части i -го витка от опоры, м	x_{ic}	XIP
7. Шаг i -го витка, м	t_i	TI
8. Средний угол наклона винтовой нарезки	β_i	TSB
9. Число витков	n	N
10. Распределение давления по длине вала, МПа	$P(x)$	PXI
11. Максимальное давление на конце вала, МПа	P_{\max}	PMAX
12. Касательное напряжение, МПа	$\tau(x)$	TAU
13. Модуль упругости 1 рода, МПа	E	E
14. Допускаемое напряжение, МПа	$[\sigma]$	SIGMAD
15. Допускаемый прогиб, м	$[W]$	WDOP
16. Плотность материала шнека, кг/м ³	ρ	RO
17. Коэффициент трения	f	F
18. Поперечная сила на витке, Н	Q_{yi}	QYI
19. Изгибающий момент на витке, Н·м	M_{yi}	MYI
20. Крутящий момент, Н·м	$M_{кр}$	MKR
21. Эквивалентное напряжение, МПа	$\sigma_{\text{экв}}$	SIGMAEKV
22. Расстояние от опоры до точки касания витка гильзы, м	L_{κ}	LK
23. Мощность привода шнекового вала, Вт	N	NP
24. Частота вращения шнека, с ⁻¹	$n_{\text{в}}$	NOBOR

1.3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МИНИМИЗАЦИИ МАССЫ КОНСТРУКЦИИ ШНЕКА С ОСЕВЫМ ОТВЕРСТИЕМ И РАЗРЫВНЫМИ ВИТКАМИ

Вопросы прочности подобного типа конструкции изложены ранее [2], поэтому ограничимся записью расчётных формул для определения максимального эквивалентного напряжения и максимального прогиба шнека (рис. 1.6):

$$\max \sigma_{\text{экр}} = \sqrt{\left(\frac{M_{\text{max}}}{W_0} + \frac{N_{\text{п}}}{F} + \frac{N_{\text{п}} W}{W_0}\right)^2 + \left(\frac{M_{\text{кр}}}{W_0}\right)^2} \leq [\sigma], \quad (1.44)$$

$$\max W = \frac{W_{\text{max}}}{1 - \frac{N_{\text{п}}}{N_3}} \leq [W], \quad (1.45)$$

где R_1, R_2, R_0 – радиусы витков, сердечника, осевого отверстия шнека, соответственно; e – ширина витка шнека; $W_0 = \frac{\pi R_2^3}{2} \left(1 - \left(\frac{R_0}{R_2}\right)^4\right)$ – осевой

момент сопротивления шнека изгибу; $F = \pi(R_2^2 - R_0^2)$ – площадь поперечного сечения вала шнека; $[W]$ – допускаемый прогиб вала шнека, который не должен превышать величины радиального зазора между гребнем винтовой нарезки и внутренней поверхностью материального цилиндра.

Основная цель данного проектирования состоит в том, чтобы на основании расчётных формул (1.44) и (1.45) найти такие оптимальные геометрические параметры шнека, которые наряду с прочностными характеристиками и эффективным отводом тепла обеспечивали бы минимальную массу конструкции (1.3).

$$M(\bar{x}) = \pi r \left[l_0 (R_1 - x_1)^2 + (R_1 - x_1)^2 l + \right. \\ \left. + (2(R_1 - x_1)/\cos \beta) x_1 x_2 n - x_3^2 (l_0 + l) \right]. \quad (1.46)$$

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

$$\max \sigma_{\text{экр}} \leq [\sigma]; \quad (1.47)$$

$$\max W \leq [W]; \quad (1.48)$$

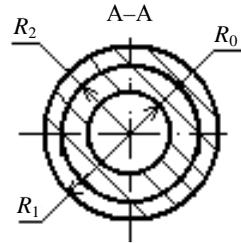


Рис. 1.7. Поперечное сечение шнека с осевым отверстием:
 $(R_1 - R_2) \equiv x_1; e \equiv x_2;$
 $R_0 \equiv x_3$

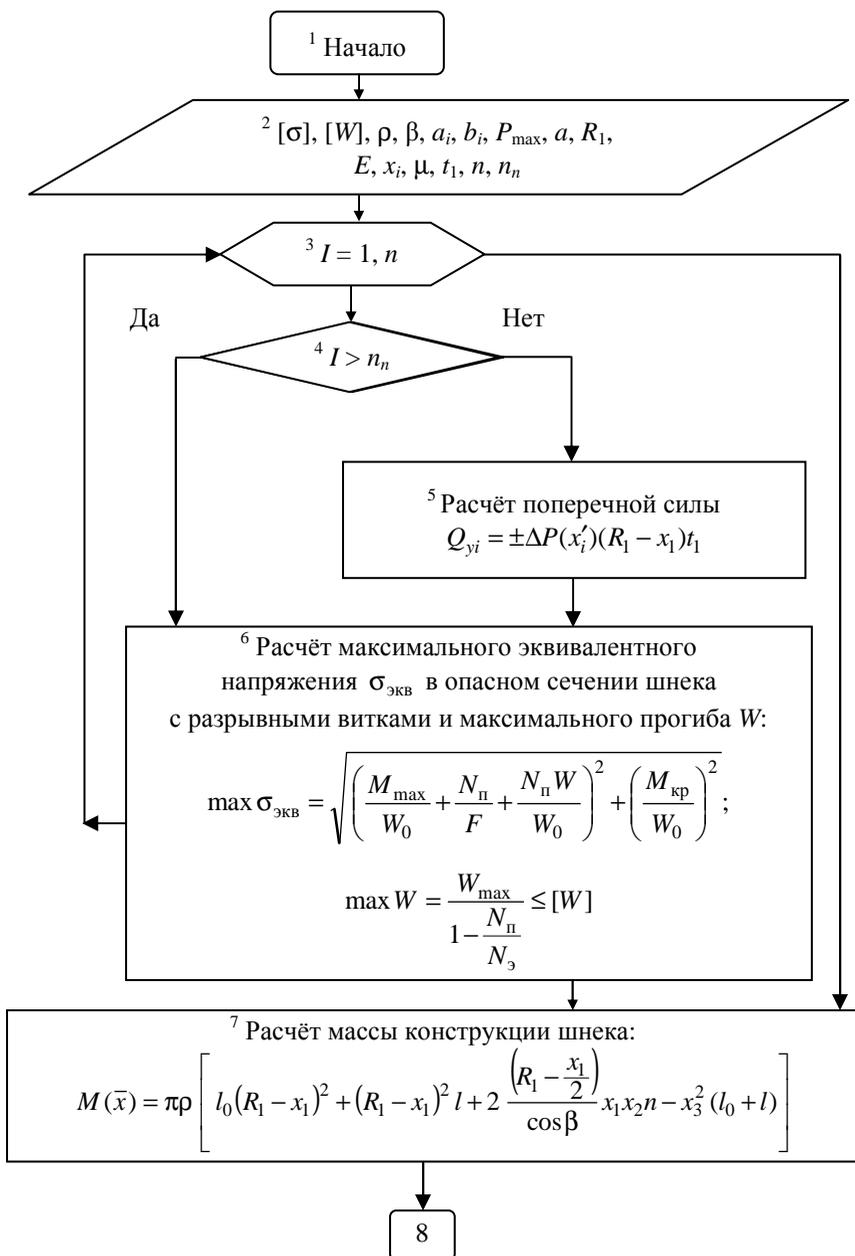


Рис. 1.8. Блок-схема алгоритма минимизации массы шнека с разрывными витками

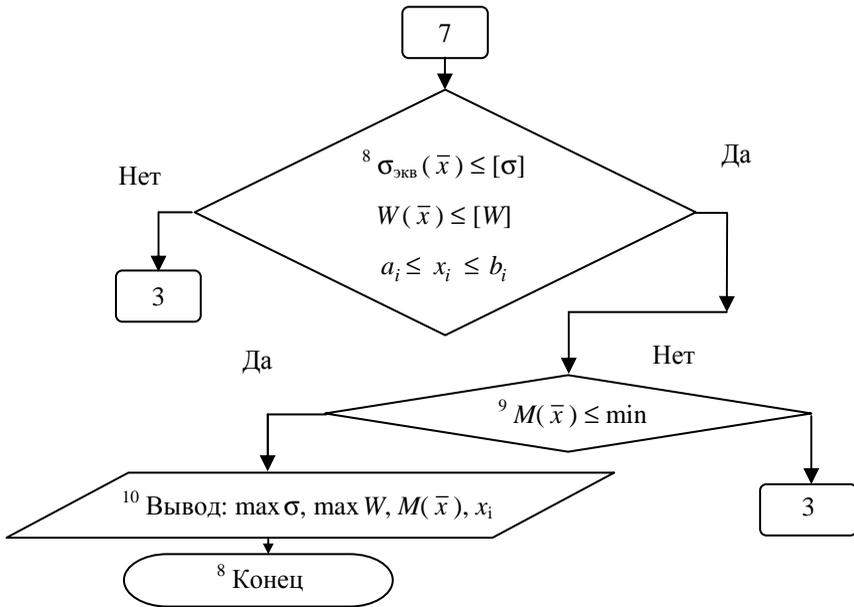


Рис. 1.8. Окончание

и геометрические ограничения по параметрам управления

$$a_i \leq x_i \leq b_i \quad (i = 1, 2, 3, 4). \quad (1.49)$$

Здесь $\max \sigma_{\text{экв}}$, $\max W$ – максимальное эквивалентное напряжение и прогиб шнека, определяемые по формулам (1.44) и (1.45); $[\sigma]$, $[W]$ – допускаемое напряжение для материала шнека и допускаемый прогиб для конструкции системы шнек–цилиндр; $M(\bar{x})$ – масса шнека; x_i – геометрические размеры составного цилиндра, которые принимаются равными: a_i , b_i – наименьшее и наибольшее значения параметров управления; ρ – плотность материала цилиндров.

При проектировании конструкции минимальной массы $M(x)$ использован метод скользящего допуска (МСД) [3].

Для шнека со следующими исходными данными: $R_1 = 0,032$ м; $p = 5$ МПа; $l_0 = 0,016$ м; $l = 0,704$ м; $n = 10$ витков (разрыв после второго витка); $[\sigma] = 325$ МПа; $[W] = 0,01R_1$ мм; $(0,001 \leq x_1 \leq 0,006)$ м; $(0,001 \leq x_2 \leq 0,004)$ м; $(0,001 \leq x_3 \leq 0,007)$ м; материал шнека сталь; $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$; $\rho = 7,85 \cdot 10^3$ кг/м³ с помощью программы "minMSCRE" (прил., программа 3), реализующей алгоритм МСД (блок-схема приведена на рис. 1.8), получены следующие значения оптимальных параметров конструкции: $x_1^* = 0,0024$ м; $x_2^* = 0,0011$ м; $x_3^* = 0,0058$ мм. При этом минимальная масса шнека составила $M_{\min}^* = 12,5$ кг.

2. МИНИМИЗАЦИЯ МАССЫ СОСТАВНОГО МАТЕРИАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА

2.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МИНИМИЗАЦИИ МАССЫ СОСТАВНОГО МАТЕРИАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА

В машинах для экструзии термопластов и реактопластов в качестве цилиндров пластикации используются обычно однослойные толстостенные цилиндры или двухслойные цилиндры с гильзами. Методики прочностных расчётов таких цилиндров приводятся в [2, 4].

В экструзионных машинах для профилирования резиновых смесей однослойные цилиндры пластикации в силу большой толщины стенки не обеспечивают быстрого отвода тепла от внутренней поверхности. Кроме того, при высоких внутренних давлениях, достигающих до 250 МПа, однослойные цилиндры не удовлетворяют условию прочности. Поэтому весьма актуальны вопросы создания двухслойных цилиндров пластикации, удовлетворяющих как условию прочности, так и ускоренному охлаждению.

Поставленную проблему можно решить, применив двухслойные цилиндры с натягом, имеющие на внутренней поверхности наружного цилиндра кольцевые канавки для охлаждения стенок внутреннего цилиндра (рис. 2.1).

Вопросы прочности подобного типа конструкции изложены в [2] и представлены программой 4 (прил.). Расчётные формулы для максимальных эквивалентных напряжений по IV теории прочности соответственно для внутреннего и наружного цилиндров:

$$\max \sigma_{\text{эKB1max}} = p \frac{1}{2} \sqrt{\left[\left[\left(\frac{a}{d-a} + \mu \frac{l^2}{2(d-a)^2} \right) - \frac{2a}{d} \frac{d}{2(d-a)} - \frac{l^2}{2(d-a)^2} \right]^2 + \left[\frac{l^2}{2(d-a)^2} + 1 \right]^2 + \left[\left(\frac{a}{d-a} + \mu \frac{l^2}{2(d-a)^2} \right) - \frac{2a}{d} \frac{d}{2(d-a)} + 1 \right]^2 \right]} \quad (2.1)$$

$$\max \sigma_{\text{эKB2max}} = p \sqrt{\frac{a^2}{c^2} \left[\left(\frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - 1} \right)^2 + 1,8 \frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - 1} + 1,56 \right]} \quad (2.2)$$

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; μ – коэффициент Пуассона для материала цилиндра.

Основная цель данного проектирования состоит в том, чтобы на основании расчётных формул (2.1) и (2.2) найти такие оптимальные геометрические параметры двухслойного цилиндра, которые наряду с прочностными характеристиками и эффективным отводом тепла обеспечивали бы минимальную массу конструкции.

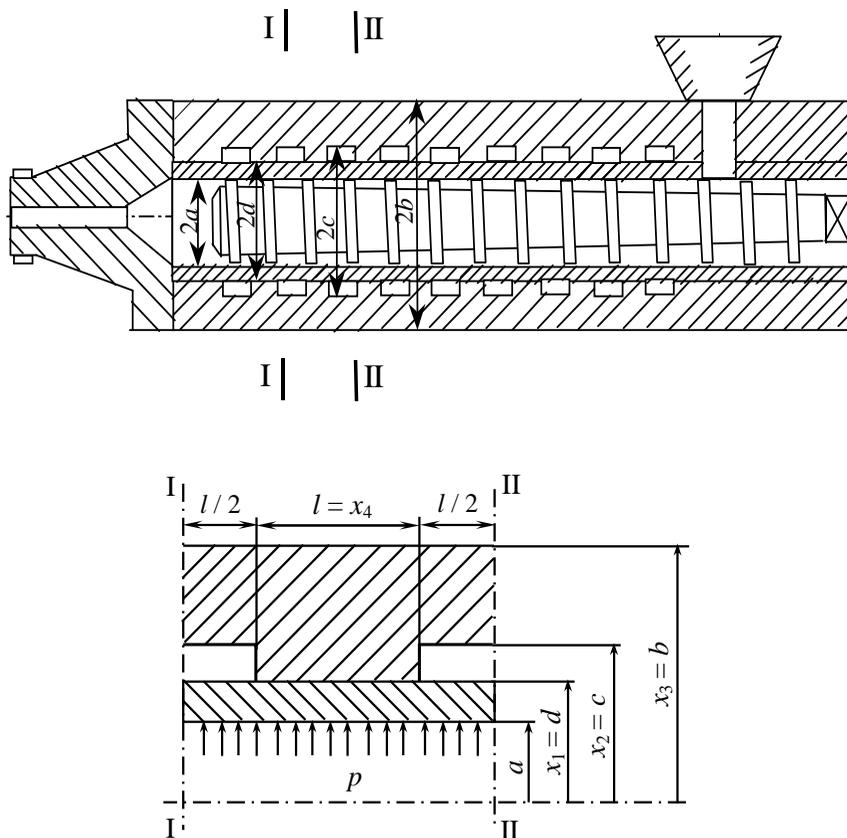


Рис. 2.1. Конструкция двухслойного цилиндра пластикации

В связи с этим ставится задача: найти вектор управляемых параметров $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$, который минимизирует целевую функцию, характеризующую расход материала (массы):

$$M(x) = \pi \rho \left[2(x_1^2 - a^2) + (x_2^2 - x_1^2) + 2(x_3^2 - x_2^2) \right]. \quad (2.3)$$

При этом должны выполняться ограничения по прочности:

$$- \text{ для внутреннего цилиндра } \max \sigma_{\text{эKB}_1} \leq [\sigma]_1; \quad (2.4)$$

$$- \text{ для наружного цилиндра } \max \sigma_{\text{эKB}_2} \leq [\sigma]_2; \quad (2.5)$$

и геометрические ограничения по управляемым параметрам

$$a_i \leq x_i \leq b_i \quad (i = 1, 2, 3, 4). \quad (2.6)$$

Здесь $\max \sigma_{\text{эKB}_1}$, $\max \sigma_{\text{эKB}_2}$ – максимальные эквивалентные напряжения соответственно для внутреннего и наружного цилиндров, определяемые по формулам (2.1) и (2.2); $[\sigma]_1$, $[\sigma]_2$ – допускаемые напряжения для материалов внутреннего и наружного цилиндров; $M(x)$ – масса участка составного цилиндра единичной длины; x_i – геометрические размеры составного цилиндра, которые принимаются равными: a_i , b_i – наименьший и наибольший значения управляемых параметров; ρ – плотность материала цилиндров.

При проектировании конструкции минимальной массы $M(x)$ использован метод скользящего допуска (МСД).

Для составного цилиндра со следующими исходными данными: $a = 22,5$ мм; $p = 150$ МПа; $[\sigma]_1 = 566$ МПа; $[\sigma]_2 = 434$ МПа; $25 \leq x_1 \leq 32$ мм; $30 \leq x_2 \leq 37$ мм; $42 \leq x_3 \leq 52$ мм; $8 \leq x_4 \leq 15$ мм; материал цилиндров сталь; $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$; $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³ с помощью программы "minMT-LC" (прил., программа 5), реализующей алгоритм МСД (блок-схема приведена на рис. 2.4), получены следующие значения оптимальных параметров конструкции: $x_1^* = 25,6$ мм; $x_2^* = 33,6$ мм; $x_3^* = 42$ мм; $x_4^* = 8$ мм. При этом минимальная масса участка составного цилиндра единичной длины составила $M_{\min}^* = 0,05$ кг.

Для приближённой оценки оптимальных геометрических параметров составного цилиндра на этапе предварительного проектирования при решении поставленной задачи может быть использован принцип дискретной равнопрочности с применением итерационного метода. При построении области допустимых проектных решений ограничения по прочности (2.4) и (2.5) можно привести к виду

$$K_j^n(x_i) - 1 = 0 \quad (j = 1, 2), \quad (2.7)$$

где $K_j^n(x) = \frac{\sigma_{\text{экв}j}}{[\sigma]_j}$.

Систему уравнений (2.1, 2.2) можно решать относительно одного параметра x_i [остальные x_k ($k \neq i$) фиксированы] с заданной точностью $|K_j^n(x_i) - 1| \leq \varepsilon$ (здесь ε – сколь угодно малое число). Для этого используют итерационный метод, основанный на формуле

$$x_i^{(p+1)} = x_i^{(p)} + x_i^{(p)} r^{-1} |K_j(x_i^{(p)}) - 1|, \quad (2.8)$$

где p – номер итерации; r – параметр, определяющий сходимость итерационного процесса (для нашего случая $r = 2$).

Решение системы (2.1, 2.2) позволяет определить в первом приближении параметры составного цилиндра дискретно-равнопрочного проекта [6 – 10]. С помощью программы "ITERA" (см. блок-схему рис. 2.3 и прил., программа 3), используя вышеприведённые исходные данные, получены решения задачи по определению оптимальных параметров \bar{x}_1^* и \bar{x}_2^* в виде кривых ограничений (рис. 2.2) (Аналогично можно построить кривые ограничения для определения параметров \bar{x}_3^* и \bar{x}_4^*).

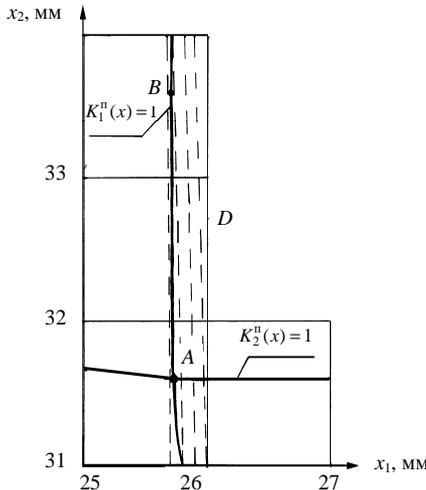


Рис. 2.2. Кривые ограничения по прочности для составного цилиндра пластичации:

т. А. ($x = 25,7$ мм; $x = 31,6$ мм) – дискретно-равнопрочный проект;

т. В. ($x = 25,6$ мм; $x = 33,6$ мм) – проект минимальной массы

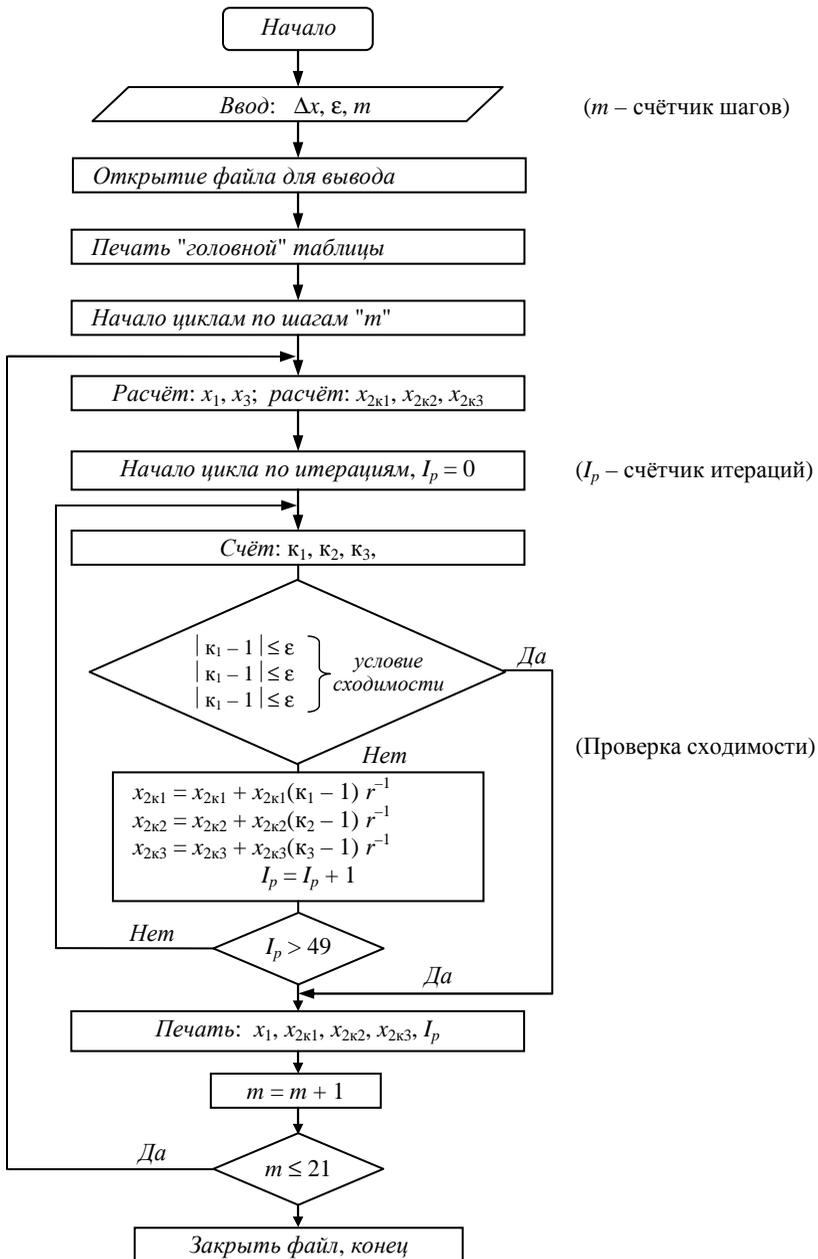


Рис. 2.3. Блок-схема алгоритма итерации решения системы трёх нелинейных уравнений для трёх переменных x_i ($i = 1, 2, 3$)

Итерационный процесс для указанных выше исходных данных сошёлся за 50 итераций с заданной точностью $\varepsilon = 0,01$ и ограничения на параметры $5 \leq x_i \leq 45$ мм ($i = 1; 4$).

Т. А. ($x = 25,7$ мм; $x = 31,6$ мм) – дискретно-равнопрочный проект;

Т. В. ($x = 25,6$ мм; $x = 33,6$ мм) – проект минимальной массы.

В результате был получен дискретно-равнопрочный проект конструкции с параметрами $\tilde{x}_1^* = 25,7$ мм; $\tilde{x}_2^* = 31,6$ мм; $\tilde{x}_3^* = 44$ мм; $\tilde{x}_4^* = 8$ мм. Масса конструкции единичной длины составила $\tilde{M}^* = 0,061$ кг.

Точка пересечения кривых ограничения $K_j^n(x)$ ($j = 1, 2$) для гильзы и кольца даёт геометрические параметры для дискретно-равнопрочной конструкции (т. А, рис. 2.2). Как видно из приведённых результатов, проект конструкции минимальной массы $M_{\min}^* = 0,05$ кг в 1,22 раза меньше дискретно-равнопрочного проекта $\tilde{M}_{\min}^* = 0,061$ кг, что даёт возможность принять для окончательного варианта оптимальные параметры конструкции минимальной массы: $x_1^* = 25,6$ мм; $x_2^* = 33,6$ мм; $x_3^* = 42$ мм; $x_4^* = 8$ мм.

2.2. РАСЧЁТ НА ПРОЧНОСТЬ ДВУХСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ С ВИНТОВОЙ КАНАВКОЙ В МЕСТЕ СОПРЯЖЕНИЯ

Однослойные цилиндры в силу большой толщины стенки не обеспечивают быстрого отвода тепла от внутренней поверхности. Кроме того, в результате быстрого износа внутренних стенок цилиндра необходимо регулярно проводить трудоёмкую технологическую операцию по их упрочнению. Поэтому весьма актуальны вопросы создания двухслойных цилиндров, удовлетворяющих не только условиям прочности, но и охлаждения и эксплуатации.

В процессе износа внутреннего цилиндра его можно заменять путём выпрессовывания, что существенно сказывается на экономической эффективности шнековой машины. Двухслойная конструкция цилиндров получила широкое распространение в шнековых машинах, предназначенных для переработки резиновых смесей.

Общий вид двухслойного цилиндра, состоящего из наружного толстостенного гладкого цилиндра 1 и внутренней гильзы 2 с кольцевыми канавками, изображён на рис. 2.5. Для исследования напряжённого деформированного состояния такого цилиндра представим его в виде трёх основных элементов: оболочки 1 толщиной h , витков 2, заменённых в целях упрощения расчёта равноотстоящими по оси цилиндра кольцами толщиной e ; диаметром d и толстостенного цилиндра 3 (рис. 2.6).

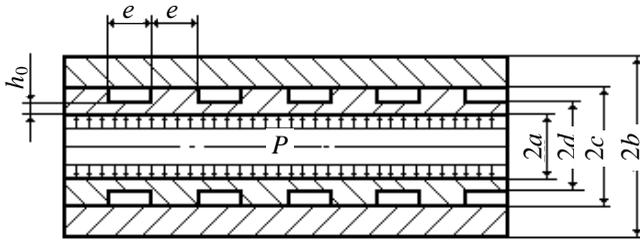


Рис. 2.5. Общий вид двухслойного цилиндра

Примем, что в местах сопряжения оболочки и кольца возникает нагрузка q_1 , а в месте контакта кольца и толстостенного цилиндра – нагрузка q_2 . Расчётная схема составного цилиндра показана на рис. 2.6.

Приведённая расчётная схема позволяет определить контактные давления q_1 и q_2 в местах сопряжения соответственно оболочки с кольцом и кольца с цилиндром. Так как расстояние e между кольцами незначительно и соизмеримо с толщиной цилиндра, то радиальные перемещения оболочки и цилиндра будут определяться равномерно-распределёнными составляющими нагрузок q'_1 и q'_2 , равными среднеарифметическому значению нагрузок в месте контакта и впадин:

$$q'_1 = \frac{1}{2} q_1; \quad K_{\text{шк}} = \frac{bh_1^2 h_2^2}{6L(h_1 + h_2)}.$$

Такая замена, как показали предварительные исследования, оправдана только при расчёте перемещений, но не напряжений.

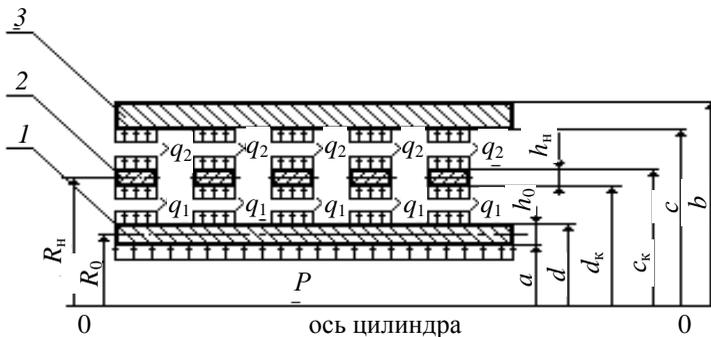


Рис. 2.6. Расчётная схема двухслойного цилиндра

При исследовании напряжённого состояния необходимо учитывать дискретность приложения нагрузки на оболочку и цилиндр:

$$\left. \begin{aligned} W_o &= W_k; \\ W_T &= W_k = \Delta, \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

где Δ – радиальный натяг в месте посадки кольца и цилиндра; W_o , W_k , W_T – радиальные перемещения оболочки, кольца и толстостенного цилиндра, соответственно, определяемые уравнениями:

$$W_o = \left(Pa - \frac{1}{2} q_1 d \right) \frac{R_o}{E h_o}; \quad (2.10)$$

$$W_k = (q_1 d - q_2 c) \frac{R_k}{E h_k}; \quad (2.11)$$

$$W_T = \frac{q_2 c}{2(\beta^2 - 1)} [1 - \mu + \beta^2(1 + \mu)]. \quad (2.12)$$

Здесь P – внутреннее рабочее давление в цилиндре; a и d – соответственно внутренний и наружный радиусы гильзы; c и b – соответственно внутренний и наружный радиусы цилиндра; d_k и c_k – соответственно внутренний и наружный радиусы кольца; h_o – толщина оболочки; E и μ – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала цилиндров; $\beta = b/c$ – толстостенность цилиндра; $R_k = \frac{c+d}{2}$ – средний радиус кольца; h_k – толщина кольца.

Условия совместности перемещений (2.9) через контактные давления q_1 и q_2 запишутся

$$q_1 = \frac{Pa \frac{R_o}{h_o} + q_2 c \frac{R_k}{h_k}}{\frac{R_o}{2h_o} + \frac{R_k}{h_k}} \frac{1}{d}; \quad (2.13)$$

$$q_2 = \frac{E\Delta + PaR_k \frac{R_o}{h_o} \frac{2}{R_o h_k + R_k 2h_o}}{\frac{1}{2} \frac{[1 - \mu + \beta^2 - (1 + \mu)]}{\beta^2 - 1} + \frac{R_k}{h_k}} \frac{1}{c}. \quad (2.14)$$



Рис. 2.7. Блок-схема алгоритма расчёта на прочность составного цилиндра с винтовой канавкой в месте сопряжения

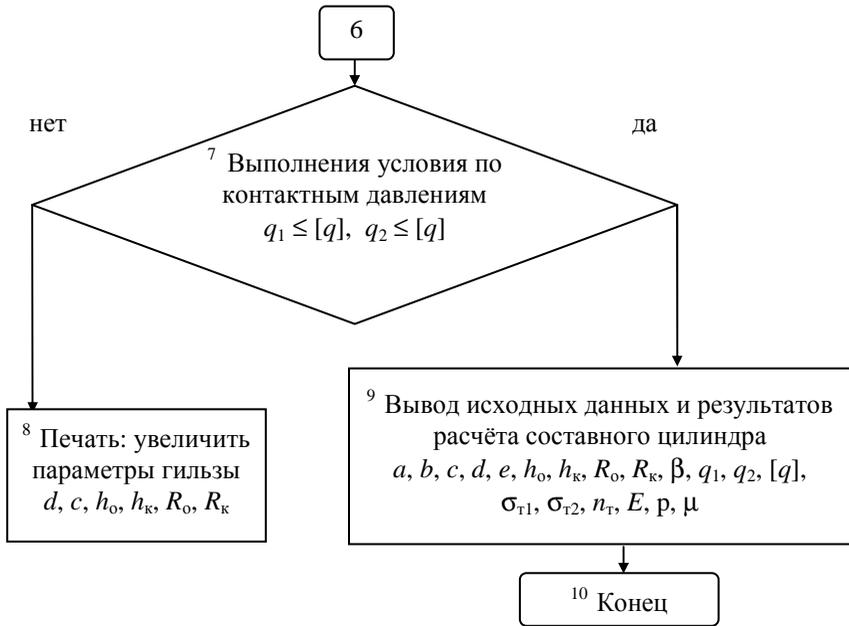


Рис. 2.7. Окончание

Величина натяга Δ и толстостенность β определяются из условий прочности оболочки, кольца и толстостенного цилиндра отдельно [7]:

$$q_1 \frac{d}{2h_o} \leq P \left[\frac{a}{h_o} - \left(\frac{1}{2} - \mu \right) \frac{l^2}{2h_o^2} + \frac{1}{2} \right] + \sqrt{P^2 \left[\frac{a}{h_o} - \left(\frac{1}{2} - \mu \right) \frac{l^2}{2h_o^2} + \frac{1}{2} \right]^2 + \frac{\sigma_T^2}{n_T^2} - P^2 \left[\left(\frac{a}{h_o} + \mu \frac{l^2}{2h_o^2} \right)^2 + \left(\frac{a}{h_o} + \mu \frac{l^2}{2h_o^2} \right) \left(1 - \frac{l^2}{2h_o^2} \right) + \left(1 + \frac{l^2}{2h_o^2} \right) + 1 \right]} ; \quad (2.15)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{q_1 d - q_2 c}{h_k} \leq \frac{\sigma_T}{n_T} ; \quad (2.16)$$

$$q_2 \leq \frac{\sigma_T}{n_T} \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - 1} \right)^2 + 1,8 \frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - 1} + 1,56}} , \quad (2.17)$$

где σ_n – предел текучести материала цилиндра; n – коэффициент запаса статической прочности по пределу текучести; σ_ϕ – окружное нормальное напряжение в кольце.

Условие прочности (2.15) для заданного давления p даёт ряд решений для контактного давления q_1 , однако, как показали исследования, оптимальными значениями контактных давлений q_1 и q_2 являются их величины, полученные из условия равенства нулю окружных нормальных напряжений σ_ϕ в кольце (2.16).

На основании изложенного, предлагается следующая методика решения задачи: из системы двух уравнений (2.15), (2.16) при $\sigma_\phi = 0$ определяются контактные давления q_1 и q_2 , затем по формулам (2.17) и (2.14) определяется толстостенность β и величина натяга Δ и далее по формуле (2.15) проводится окончательная проверка прочности гильзы.

На рисунке 2.7 приводится схема алгоритма расчёта на прочность составного (двухслойного) цилиндра с винтовой канавкой в месте сопряжения. Программа расчёта приведена в прил. (программа 4).

3. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСТРУЗИИ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ

3.1. ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЁТ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ОБОРУДОВАНИЯ

Математическая формулировка задачи оптимизации состоит в следующем [11].

Пусть \bar{x} – переменные управления; \bar{y} – переменные состояния; $F(\bar{x}, \bar{y})$ – целевая функция; $R(\bar{x}, \bar{y})$ – функции ограничения. Необходимо найти такие значения переменных управления \bar{x} , переменных состояния \bar{y} , чтобы целевая функция F достигала своего экстремального значения.

Таким образом, 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

$$[F = N(\varphi, h, D, \omega, L)] \rightarrow \min \quad (3.1)$$

при выполнении условий в виде ограничений (3.1)–(3.2):

- качество экструдата

$$R_1 = J(t) = \int_0^{t^*} \frac{dt}{\tau[T(t)]} = \sum_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{dt}{\tau[T(t)]} \leq \varepsilon; \quad (3.2)$$

- прочность материала (жесткость, устойчивость) шнека

$$R_2(\varphi, h, D, \omega, L) \leq [\sigma]; \quad (3.3)$$

- производительность шнековой машины

$$Q_{\text{зад}} = Q(\varphi, h, D, \omega, L); \quad (3.4)$$

- температуру выхода экструдата

$$T_{\text{см.вых}}(\varphi, h, D, \omega, L) = T_{\text{зад}}; \quad (3.5)$$

- диапазон изменения параметров управления

$$\begin{cases} D_r \leq D \leq D'; \\ \varphi_r \leq \varphi \leq \varphi'; \\ Dk_{h'} \leq k_h D \leq Dk_{h'}; \\ \omega_r \leq \omega \leq \omega'; \\ Dk_{L'} \leq k_L D \leq Dk_{L'}; \end{cases} \quad (3.6)$$

где $\varphi, Dk_{h'}, D_r, \omega, Dk_{L'}$ и $\varphi', Dk_{h'}, D', \omega', Dk_{L'}$ – левая и правая границы изменения конструктивных (φ, h, D, L) и технологического (ω) параметров соответственно; k_{h*}, k_{L*}, k_h, k_L – коэффициенты, учитывающие левую, правую границы и начальные значения конструктивных параметров (h, L) соответственно; $\epsilon, Q_{\text{зад}}, T_{\text{зад}}$ – 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 поставленных уравнений (3.1) – (3.6) применялся метод скользящего допуска [3], реализуемый программой на языке Бейсик, получены значения оптимальных конструктивных (φ, h, D, L) и технологических (ω, N) параметров в виде графических зависимостей от: производительности шнековой машины Q при изо- и неизотермическом режимах экструзии; перепада температуры по длине шнека ΔT (рис. 3.1 и 3.2).

Принимались следующие исходные и начальные данные: $D = 0,03 \dots 0,09$ м; $\varphi = (15 \dots 22)^\circ$; $k_{h'} = 0,05$; $k_h = 0,15$; $\omega = (1,25 \dots 9,4) \text{ c}^{-1}$; $k_{L'} = 5$; $k_L = 10$; $\Delta P = 25$ МПа; $\delta = 0,001$ м; $e = 0,1D$; $D_0 = 0,05$ м; $\varphi_0 = 17^\circ$; $h_0 = 0,1D$ м; $\omega_0 = 3,14 \text{ c}^{-1}$; $L_0 = 7D$ м.

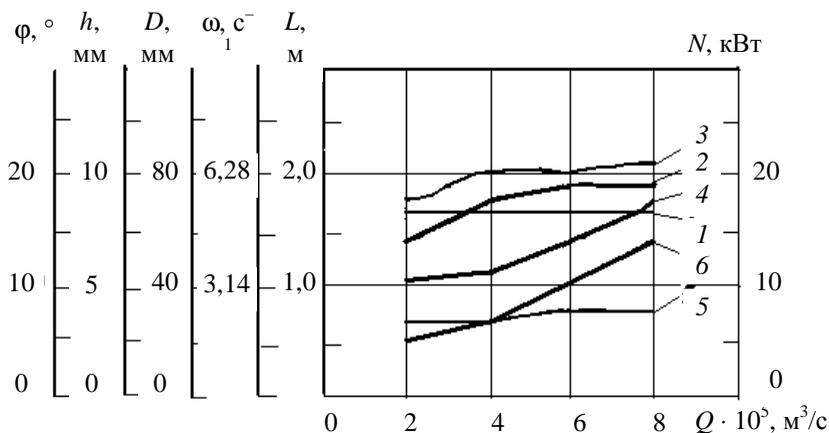


Рис. 3.1. Зависимости оптимальных конструктивных (1 – φ , 2 – h , 3 – D , 5 – L) и технологических (4 – ω , 6 – N) параметров от производительности Q при изотермическом режиме экструзии для $\Delta P = 20$ МПа, $T_{\text{см}} = 80$ °С

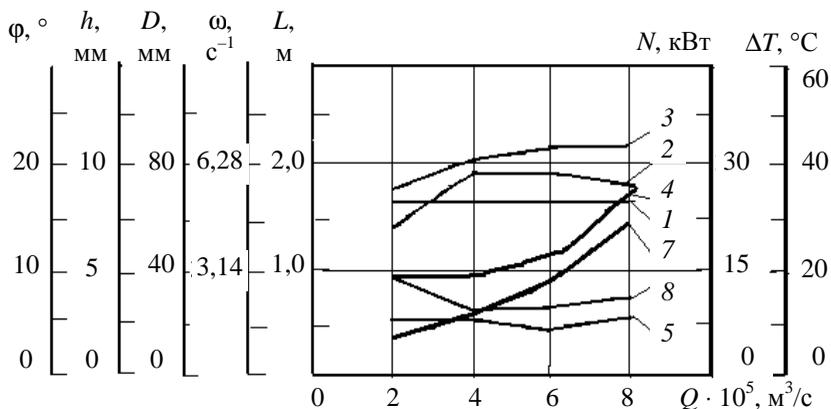


Рис. 3.2. Зависимости оптимальных конструктивных (1 – φ , 2 – h , 3 – D , 5 – L) и технологических (4 – ω , 7 – N , 8 – ΔT) параметров от производительности Q при неизотермическом режиме экструзии для $\Delta P = 20 \text{ МПа}$, $T_{\text{см.вх}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{ц}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, $\alpha = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

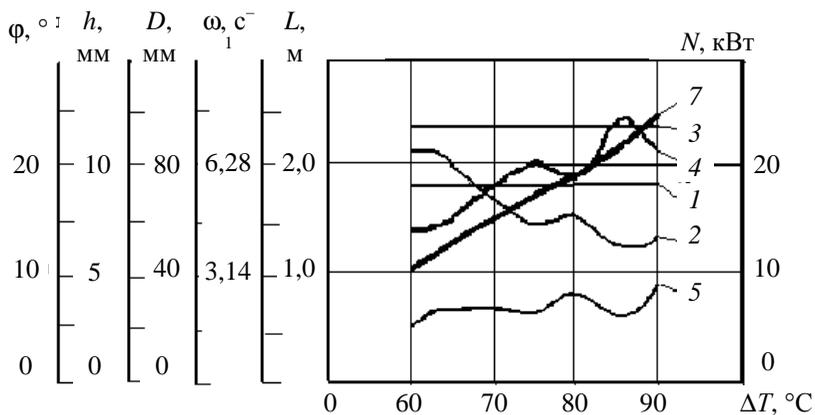


Рис. 3.3. График зависимости оптимальных конструктивных (1 – φ , 2 – h , 3 – D , 5 – L) и технологических (4 – ω , 7 – N) параметров от перепада температуры по длине шнека ΔT при $Q = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$

Из рисунка 3.3 видно, что с ростом длины L происходит увеличение перепада температуры ΔT , так как материал пребывает в цилиндре большее время, а следовательно, успевает прогреться до большей температуры.

Также с уменьшением глубины h и соответствующим этому увеличению угловой скорости ω наблюдается рост перепада температуры ΔT . Причём уменьшение глубины h приводит к уменьшению производительности Q и её заданное значение компенсируется увеличением угловой скорости ω .

Из рисунка 3.4 видно, что технологическая мощность при изотермическом режиме экструзии примерно в 1,5 – 3,0 раза меньше, чем при неизотермическом режиме. Это объясняется тем, что для заданного перепада температур ($\Delta T = 30$ К) вязкость резиновой смеси изменяется в широком интервале в сторону уменьшения $(6...1) \cdot 10^5$ Па·с^{*n*}, что, в свою очередь, приводит к более интенсивным сдвиговым деформациям, чем при изотермическом режиме.

Результаты оптимизации для политропного и адиабатического режимов (рис. 3.4) практически не отличаются, так как при оптимизации политропного процесса потери в системе термостатирования стремятся к нулю, т.е. к адиабатическому режиму экструзии.

Программа для расчёта на ЭВМ [12] приведена в прил. (программа 6), позволяющая определить оптимальные технологические параметры процесса и конструктивные размеры оборудования экструзии резиновых смесей. Порядок работы программы 6 поясняется табл. 3.1, схемой алгоритма (рис. 3.5).

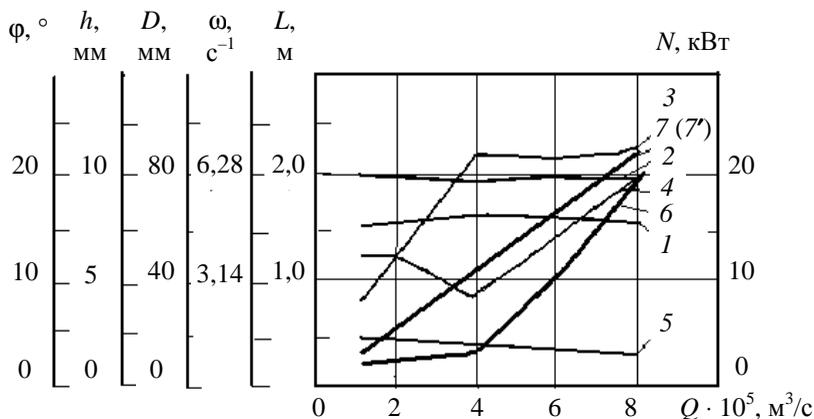


Рис. 3.4. График зависимости оптимальных конструктивных параметров от производительности Q при различных режимах экструзии: 6, 7, (7') – изотермический, неизотермический, адиабатический режимы экструзии соответственно

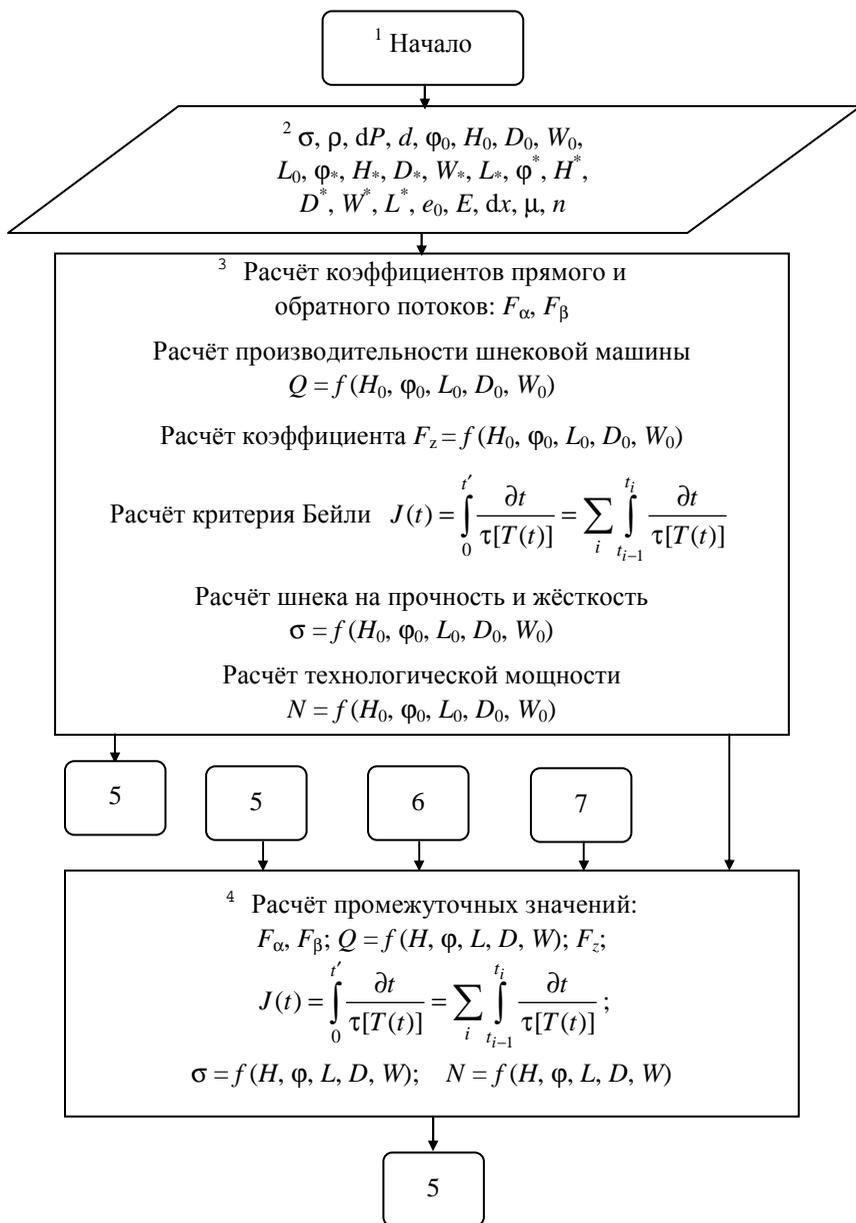


Рис. 3.5. Блок-схема алгоритма расчёта оптимальных технологических параметров процесса и конструктивных размеров оборудования экструзии резиновых смесей

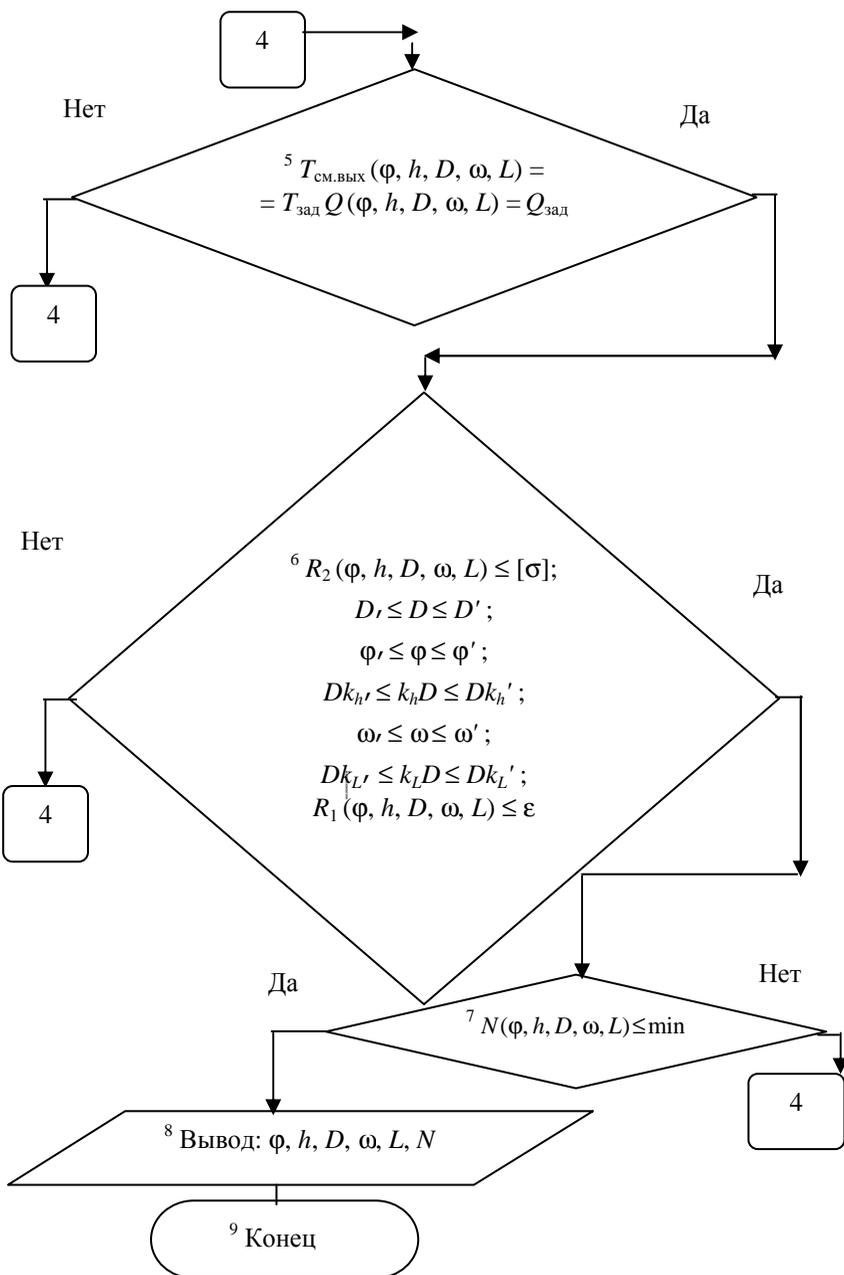


Рис. 3.5. Окончание

Таблица 3.1

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
1. Диаметр шнека, м	D	D
2. Диаметр осевого отверстия шнека, м	d	d ₁
3. Длина нарезной части шнека, м	L	L
4. Коэффициент прямого потока	F_{α}	Fg
5. Коэффициент обратного потока	F_{β}	Fp
6. Температура выхода резиновой смеси, град	$T_{\text{см.вых}}$	Tz
7. Температура входа резиновой смеси, град	$T_{\text{см.вх}}$	T0
8. Функции ограничения	R_i	RI
9. Общее число переменных	N_x	NX
10. Общее число ограничений в виде равенств	N_e	NC
11. Общее число ограничений в виде неравенств	N_{ic}	NIC
12. Осевое усилие, Н	S_{oc}	P1
13. Производительность шнековой машины, м ³ /с	Q	Q
14. Ширина винтового канала шнека, м	W	W1
15. Угол наклона винтовой нарезки шнека, град	φ	FI
16. Глубина винтового канала шнека, м	h	h
17. Распределение давления по длине вала, Па	ΔP	dP

Наименование величин	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
18. Плотность резиновой смеси, кг/м ³	ρ	RO
19. Касательное напряжение, Па	$\tau(x)$	TAU
20. Модуль упругости 1 рода, Па	E	E
21. Допускаемое напряжение, Па	$[\sigma]$	SIG
22. Допускаемый прогиб, м	$[W]$	WDOP
23. Плотность материала шнека, кг/м ³	ρ_1	RO1
24. Критерий Бейли	J	JB
25. Изгибающий момент, Н · м	$M_{и}$	Miz
26. Крутящий момент, Н · м	$M_{кр}$	MKR
27. Эквивалентное напряжение, Па	$\sigma_{эkv}$	SIGEKV
28. Технологическая мощность, Вт	N	N
29. Угловая скорость шнека, с ⁻¹	ω	W
30. Максимальный прогиб шнека, м	f_{max}	fmax

3.2. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЁТА ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСТРУЗИИ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ

Предложена методика инженерного расчёта оптимальных технологических и конструктивных параметров процесса экструзии и шнекового оборудования, которая включает в себя следующие этапы:

1. В качестве исходных параметров, необходимых для расчёта, должны быть заданы:

m_0 ; n – реологические константы перерабатываемого материала при температуре входа $T_{см.вх}$;

$\tau [T(t)]$ – кривая подвулканизации;

$x_{i*} \leq x_i \leq x_{i*}$ – границы изменения варьируемых параметров;

ΔP ; ΔT – перепад давления и температуры по длине шнека соответственно;

Q – производительность шнековой машины;

$[\sigma]$ – допусаемое напряжение (допускаемый прогиб, коэффициент запаса по устойчивости);

ε – заданное значение критерия подвулканизации.

2. Постановка задачи расчёта.

В а р и а н т 1 – разработка производства РТИ экструзионным методом и проектирование нового оборудования.

В а р и а н т 2 – модернизация существующего процесса и оборудования при производстве РТИ.

3. По математической модели [2], при условии минимизации технологической мощности и соответствующих исходных данных и ограничениях (см. подп. 3, (3.1) – (3.6) [2]) с помощью программного обеспечения (см. прил., программа б) определяются:

В а р и а н т 1 – оптимальные технологические (ω , N) и конструктивные (φ , h , D , L) параметры;

В а р и а н т 2 – оптимальные технологические (ω , N) и конструктивные (φ , h) параметры.

В случае если не будет найдено решение, то необходимо либо расширить границы изменения варьируемых параметров, либо изменить заданный технологический режим процесса.

В монографии [2] проведён расчёт оптимальных технологических параметров процесса и конструктивных параметров оборудования на примере экструзии резиновой смеси марки НО-68-1.

1. Исходные данные: $c = 2100$ Дж/(кг·град), $\rho = 1200$ кг/м³, $\lambda = 0,22$ Вт/(м·град), $T_{ц} = 368$ К, $m_0 = 600$ кПа · с^{*n*}, $n = 0,3$ при $T_{см.вх} = 323$ К, $[\sigma] = 320$ МПа; $[y] = 0,0005$ м.

2. В а р и а н т 1 – проектирование нового оборудования.

В а р и а н т 2 – усовершенствование существующего оборудования.

3. В а р и а н т 1 – расчёт технологических (ω , N) и конструктивных (φ , h , D , L) параметров. Результаты оптимизации см. рис. 3.1 – 3.4.

В а р и а н т 2 – расчёт технологических (ω , N) и конструктивного (h) параметров. Результаты оптимизации см. табл. 3.2.

Таблица 3.2

№ п/п	$Q \cdot 10^{-5}$, м ³ /с	ΔP , МПа	$T_{\text{см.вых.}}$, °С	JB , %	h^* , м	ω^* , с ⁻¹	N^* , кВт
1	0,2	5	100	0,5	0,0025	1,88	0,15
2	0,3	5	100	0,5	0,0029	3,12	0,25
3	0,4	5	100	0,5	0,0032	3,75	0,41
4	0,5	10	90	0,5	0,0035	5,02	0,52
5	0,6	10	90	0,5	0,0038	5,65	0,61
6	0,7	15	80	0,5	0,0041	6,91	0,82
7	0,8	15	80	0,5	0,0045	7,52	0,94

Начальные значения и интервалы изменения варьируемых параметров:

$$h_0 = 0,003 \text{ м}, \quad \omega_0 = 0,2 \text{ с}^{-1};$$

$$h = (0,002 \dots 0,006) \text{ мм}; \quad \omega = (0,2 \dots 7,85) \text{ с}^{-1}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии показаны современные методики расчёта и конструирования экструзионного оборудования. Решены вопросы расчёта на прочность и жёсткость материального цилиндра, шнека, оптимальных геометрических параметров основных тяжело нагруженных деталей экструзионного оборудования.

Предложены современные методики расчёта основных конструктивных параметров червячных машин и экструдеров при условии минимизации их массы и габаритов. Разработанное программное обеспечение для расчёта нового и модернизации существующего экструзионного оборудования позволяют автоматизировать проектирование и сократить его время.

Работа предназначена для студентов старших курсов и магистрантов при выполнении курсовых, дипломных проектов, магистерских диссертаций и для инженеров, занимающихся расчётом и проектированием пресового и литьевого оборудования переработки полимерных материалов.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров техники и технологии 261700, 151900, занимающихся расчётом и проектированием оборудования для переработки полимерных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчёт на прочность и жёсткость шнеков литьевых машин / В.И. Кочетов, Н.В. Задворнов, С.Э. Муратов и др. // Качество изделий полимерного машиностроения : сб. науч. тр. / ВНИИРТМаш. – Тамбов, 1976. – С. 135 – 145.
2. Автоматизированное проектирование и расчёт шнековых машин : монография / М.В. Соколов и др. – М. : "Издательство Машиностроение-1", 2004. – 248 с.
3. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1975. – 480 с.
4. Гурвич, С.Г. Расчёт и конструирование машин для переработки пластических материалов / С.Г. Гурвич, Г.А. Ильяшенко, Ш.Е. Мочман. – М. : Машиностроение, 1970. – 296 с.
5. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011615081 от 29.06.2011 Российская Федерация. Минимизации массы двухслойного материального цилиндра с канавками в месте сопряжения / М.В. Соколов, А.С. Клинков. – № 2011613342 ; заявл. 10.05.2011.
6. Малков, В.П. Оптимизация упругих систем / В.П. Малков, А.Г. Угодников. – М. : Наука, 1981. – 289 с.
7. Кочетов, В.И. Расчёт двухслойного цилиндра высокого давления с винтовой канавкой в месте сопряжения / В.И. Кочетов, Р.Л. Бородин // Новое высокопроизводительное оборудование для полимерной и бумагоделательной промышленности : сб. науч. тр. / ВНИИРТМаш. – Тамбов, 1989. – С. 69 – 74.
8. Шилд, Р. Методы оптимального проектирования конструкций / Р. Шилд. – М. : Механика, 1962. – 360 с.
9. Разани, Р. Поведение равнонапряжённой конструкции и её отношение к конструкции минимального веса / Р. Разани // Ракетная техника и космонавтика. – 1965. – № 12.
10. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя / В.И. Анурьев. – М. : Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 728 с.
11. Клинков, А.С. Определение оптимальных технологических и конструктивных параметров червячных машин для переработки эластомеров / А.С. Клинков, М.В. Соколов, В.И. Кочетов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2000. – № 8. – С. 15–16.
12. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003611833 от 04.08.2003 Российская Федерация. Расчёт оптимальных технологических и конструктивных параметров экструзии резиновых смесей с учётом минимизации технологической мощности и получения качественного экструдата. (Оптимизация экструзионного оборудования) / М.В. Соколов, А.С. Клинков, В.И. Кочетов, П.С. Беляев. – № 2003611300 ; заявл. 16.06.2003.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРОГРАММА 1

Программа расчёта шнека на прочность, жёсткость и устойчивость.
Язык Бейсик

```
CLS
"РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ КОНСОЛЬНО ЗАКРЕПЛЕННОГО ШНЕКА"
A = 400: DIM MIZ(A), X(A), МК(A), Fmax1(A), Fmax2(A), Fmax01(A),
Fmax02(A), Fmax03(A)
AF = 0: dX = .0045: hx1 = .0045
IF AF = 0 THEN 91
5 PRINT "ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ"
PRINT "ДОПУСКАЕМОЕ НАПРЯЖЕНИЕ (SIG), [Па]"
INPUT "SIG = "; SIG
PRINT "ПЛОТНОСТЬ МАТЕРИАЛА ШНЕКА, [кг/м^3]"
INPUT "R0 = "; R0
PRINT "ДАВЛЕНИЕ РАЗВИВАЕМОЕ ШНЕКОМ, [Па]"
10 INPUT "P = "; P
PRINT "ДИАМЕТР ОСЕВОГО ОТВЕРСТИЯ ШНЕКА, [м]"
15 INPUT "d1 = "; d1
PRINT "НАРУЖНЫЙ ДИАМЕТР ШНЕКА, [м]"
20 INPUT "D = "; d
PRINT "ДЛИНА НАРЕЗНОЙ ЧАСТИ ШНЕКА, [м]"
30 INPUT "L = "; L
PRINT "ГЛУБИНА ВИНТОВОГО КАНАЛА ШНЕКА, [м]"
40 INPUT "H = "; H
PRINT "УГОЛ НАКЛОНА ВИНТОВОЙ ЛИНИИ ШНЕКА, [град.]"
50 INPUT "FI = "; FI
PRINT "ШАГ ВИНТОВОЙ НАРЕЗКИ ШНЕКА, [м]"
60 INPUT "t = "; T
PRINT "ширина гребня винтового канала шнека, [м]"
70 INPUT "e1 = "; E1
PRINT "ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ, [кВт]"
75 INPUT "N = "; N
PRINT "ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ ШНЕКА, [об/мин]"
80 INPUT "W = "; W: GOTO 93
```

```

91DATA 5,50000000,0.032,0.001,0.64,0.0032,17,0.032,0.0032,70,7850,400E6
  READ N, P, d, d1, L, H, FI, T, E1, W, RO, SIG
93 E = 200000000000#
ZX = (L / dX)
95 PI = 3.14
100 FI = FI * PI / 180
120 A = PI * d * H * (T - E) * COS(FI) ^ 2 / 2
130 B = H ^ 3 * (T - E) * SIN(2 * FI) / (24 * L)
140 GAM = PI ^ 2 * d ^ 2 * DL ^ 3 * TAN(FI) * SIN(FI) / (10 * E1 * L)
150 Q = A * K * N / (K + B + GAM)
160 PRINT "Q = "; Q; "[м^3/с]"
170 MKR = 9550 * N / W
'PRINT MKR
F = 3.14 * d ^ 2 / 4
"РАСЧЕТ УСИЛИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ ФОРМОВАНИЯ"
180 P1 = F * P
'PRINT "УСИЛИЕ ОТ ДАВЛЕНИЯ ФОРМОВАНИЯ, P1 = "; P1; " [Н]"
' "РАСЧЕТ ГИБКОСТИ ШНЕКА"
AL = d1 / d
FI = 3.14 * d ^ 2 / 4 * (1 - AL ^ 2)
J1 = 3.14 * d ^ 4 / 64 * (1 - AL ^ 4)
I = d * SQR(1 + AL ^ 2) / 4
MU = 2
LA = MU * L / I
" РАСЧЕТ МОМЕНТА ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КРУЧЕНИЯ"
WR = 3.14 * d ^ 3 * (1 - AL ^ 4) / 16
'PRINT "МОМЕНТ ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КРУЧЕНИЯ,
WR = "; WR; " [м^3]"
"РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ КРУЧЕНИЯ"
TAUmax = MKR / WR
q = RO * g * L
FOR A = 0 TO ZX
SCREEN 11
LOCATE 2, 1: PRINT "РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ КОНСОЛЬНО
ЗАКРЕПЛЕННОГО ШНЕКА ЭКСТРУЗИОННЫХ МАШИН"
LOCATE 3, 1: PRINT "ГИБКОСТЬ ШНЕКА, LA = "; LA
LOCATE 5, 1: PRINT "ЭПЮРА ИЗГИБАЮЩИГО Ми(X), КРУТЯЩЕГО
Мкр(X) МОМЕНТОВ И ПРОГИБА ШНЕКА Y(X)"
X(A) = dX * A: MIZ(A) = RO * F1 * X(A) ^ 2 / 2 * 10
МК(A) = 9.55 * N / W

```

```

IF LA <= 90 THEN GOTO 191 ELSE GOTO 192
191 LOCATE 4, 1: PRINT " РАСЧЕТ ПО ПЕРВОМУ ВАРИАНТУ –
НА ПРОЧНОСТЬ "
Fmax1(A) = RO * F1 * X(A) ^ 4 / (8 * E * J1)
LOCATE 24, 1: PRINT "МАКСИМАЛЬНЫЙ ПРОГИБ Fmax1 = ";
Fmax1(A); " [м]": GOTO 195
192 LOCATE 4, 1: PRINT "РАСЧЕТ ПО ВТОРОМУ ВАРИАНТУ –
НА УСТОЙЧИВОСТЬ"
K1 = SQR(P1 / (E * J1))
A1 = RO * F1 * (X(A) – (SIN(K1 * X(A))) / K1) / (K1 * COS(K1 * X(A)))
Fmax01(A) = RO * F1 / K1 ^ 2 * (1 / K1 ^ 2 + X(A) ^ 2 / 2) / (E * J1)
Fmax02(A) = 1 / K1 * (RO * F1 / K1 ^ 3 + A1 * X(A)) * COS(K1 * X(A)) / (E * J1)
Fmax03(A) = 1 / K1 ^ 2 * (RO * F1 * X(A) / K1 – A1) * SIN(K1 * X(A)) / (E * J1)
Fmax2(A) = (Fmax01(A) – Fmax02(A) – Fmax03(A))
LOCATE 24, 1: PRINT "МАКСИМАЛЬНЫЙ ПРОГИБ F2 = "; Fmax2(A); " [м]"
195 LINE(40, 100)-(40, 300): LINE (40, 300)-(600, 300)
LINE(550, 100)-(550, 300):LINE(600, 100)-(600, 300)
FOR X = 40 TO 600 STEP 7.5
LINE (X, 298)-(X, 302), 6: NEXT X: FOR X1 = 40 TO 600 STEP 75 / 2
LINE (X1, 296)-(X1, 304), 6: NEXT X1: FOR Y1 = 300 TO 100 STEP -5
LINE (38, Y1)-(42, Y1), 7: NEXT Y1: FOR Y2 = 300 TO 100 STEP -25
LINE (36, Y2)-(44, Y2), 7: NEXT Y2
FOR T1 = 300 TO 100 STEP -5: LINE (597, T1)-(603, T1), 6
NEXT T1: FOR T2 = 300 TO 100 STEP -25: LINE (595, T2)-(605, T2), 6:
NEXT T2
FOR Z1 = 300 TO 100 STEP -5: LINE (547, Z1)-(553, Z1), 6
NEXT Z1: FOR Z2 = 300 TO 100 STEP -25: LINE (545, Z2)-(555, Z2), 6:
NEXT Z2
LOCATE 20, 6: PRINT "0": LOCATE 20, 14: PRINT "0.1":
LOCATE 20, 23: PRINT "0.2": LOCATE 20, 75: PRINT "X,М"
LOCATE 20,33: PRINT "0.3": LOCATE 20, 41: PRINT "0.40"
LOCATE 20,51: PRINT"0.50": LOCATE 20, 61: PRINT "0.60"
LOCATE 14, 47: PRINT "Ми(X)": LOCATE 16, 51: PRINT "Мкр(X)"
LOCATE 6, 6: PRINT "Ми,Н*М"
LOCATE 16, 1: PRINT "5": LOCATE 13, 1: PRINT "10": LOCATE 10, 1:
PRINT "20"
LOCATE 6, 63: PRINT "Мкр,Н*М"
LOCATE 16, 65: PRINT "1.0": LOCATE 7, 65: PRINT "4.0"
LOCATE 13, 65: PRINT "2.0": LOCATE 10, 65: PRINT "3.0"
LOCATE 6, 72: PRINT "Y,МКМ": LOCATE 18, 40: PRINT "Y(X)"

```

```

LOCATE 16, 71: PRINT "40": LOCATE 14, 71: PRINT "60"
LOCATE 12, 71: PRINT "80": LOCATE 18, 71: PRINT "20"
LOCATE 10, 71: PRINT "100": LOCATE 8, 71: PRINT "120"
LINE (40 + X(A) * 375 * 2, 300 - MIZ(A) * 10)-(40 + (X(A) - hx1) * 375 * 2,
300 - MIZ1 * 10)
LINE (40 + X(A) * 375 * 2, 300 - МК(A) * 50)-(40 + (X(A) - hx1) * 375 * 2,
300 - МК1 * 50)
LINE (40 + X(A) * 375 * 2, 300 - Fmax1(A) * 1000000)-(40 + (X(A) - hx1) *
375 * 2, 300 - Fmax1 * 1000000)
LINE (40 + X(A) * 375 * 2, 300 - Fmax2(A) * 1000000)-(40 + (X(A) - hx1) *
375 * 2, 300 - Fmax2 * 1000000)
MIZ1 = MIZ(A): МК1 = МК(A): Fmax1 = Fmax1(A): Fmax2 = Fmax2(A)
LOCATE 22, 1: PRINT"КРУТЯЩИЙ МОМЕНТ Mкр = ";МК(A); "[Н*М]"
LOCATE 23, 1: PRINT "МАКСИМАЛЬНЫЙ ИЗГИБАЮЩИЙ МОМЕНТ
Mиз = "; MIZ(A); "[Н*М] "
NEXT A
'MIZmax = RO * F1 * L ^ 2 / 2 * 10
"РАСЧЕТ МОМЕНТА ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗГИБА"
Wh0 = 3.14 * d ^ 3 * (1 - AL ^ 4) / 32
"РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ИЗГИБА"
SIGRmax = P1 / F1
SIGmax = SIGRmax + MIZmax / Wh0
"РАСЧЕТ ЭКВИВАЛЕНТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ "
SIGekv = SQR(SIGmax ^ 2 + 4 * ТАUmax ^ 2)
LOCATE 25, 1: PRINT "НАПРЯЖЕНИЕ КРУЧЕНИЯ, ТАUmax = ";
ТАUmax / 1000000; " [МПа]"
LOCATE 26, 1: PRINT "НАПРЯЖЕНИЕ РАСТЯЖЕНИЯ, SIGRmax = ";
SIGRmax / 1000000; " [МПа]"
LOCATE 27, 1: PRINT "ЭКВИВАЛЕНТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, SIGekv = ";
SIGekv / 1000000; " [МПа]"
IF SIGekv < SIG THEN 198 ELSE 200
198 LOCATE 28, 1: PRINT "УСЛОВИЕ ПРОЧНОСТИ ВЫПОЛНЯЕТСЯ,
ТАК КАК SIGekv < SIG": GOTO 500
200 LOCATE 28, 1: PRINT "УСЛОВИЕ ПРОЧНОСТИ НЕ
ВЫПОЛНЯЕТСЯ, ТАК КАК SIGekv > SIG"
500 END

```

ПРОГРАММА 2

Программа расчёта консольного шнека на прочность,
жёсткость и устойчивость с учётом гидродинамического нагружения.
Язык Бейсик

```
5 REM INPUT "РАСЧЕТ ШНЕКА НА ПРОЧНОСТЬ,ЖЕСТКОСТЬ "  
6 REM INPUT " И УСТОЙЧИВОСТЬ. "  
10 REM INPUT "Максимальное давление смеси, [МПа] Pmax = ";PMAX  
20 REM INPUT "Диаметр сердечника, [м] D2 = ";D2  
25 REM INPUT "Наружный диаметр, [м] D = "D  
27 REM INPUT "Диаметр сердечника, [м] D1 = ";D1  
30 REM INPUT "Рабочая длина, [м] L = ";L  
40 REM INPUT "Модуль упругости, [МПа] E = ";E  
50 REM INPUT "Шаг нарезки, [м] T = ";T  
60 REM INPUT "Коэффициент n = ";ETA  
70 REM INPUT "Допускаемое напряжение, [МПа] [G] = ";G  
80 REM INPUT "Допускаемый коэф-т запаса устойчивости для шнека [Ny]  
= ;NY  
105 DATA 30,0.08,0.056,0.064,0.72,2.1E5,0.08,.6,68,0.35  
106 READ PMAX, D, D1, D2, L, E, T, ETA, G, X  
100 REM  
120 P1 = 3.141592  
130 A = 2 * P1 / T: PRINT A  
140 A1 = ((D2 - D1) / 4 / L) ^ 2  
150 DSPX = ((D + D1) / 2) + (((D2 - D1) / 2) * (X / L))  
160 DX = (D1 + ((D2 - D1) / L) * X)  
170 A2 = (P1 * (DSPX / T)) ^ 2  
180 DEL = SQR(A1 + A2 + 1)  
190 F1 = T / P1 / D  
200 B = (D2 - D1) / D1 / L: PRINT "B"; B  
210 J0 = P1 * (D1 ^ 4) / 64: PRINT "J0"; J0  
220 J1 = P1 * (D1 ^ 4) / 64  
230 J2 = P1 * (D2 ^ 4) / 64  
240 S = (PMAX * P1 * (D ^ 2)) / 4: PRINT "S1"; S  
250 A1 = (((D - D1) / 4) * ((X ^ 2) / (L ^ 2) - 1)) - (((D2 - D1) / 6) * ((X ^ 3) /  
(L ^ 3) - 1))  
260 NX = DEL * PMAX * COS(F1) * L: PRINT "A1"; NX  
265 NX = NX * A1
```

```

270 NX = NX - ((PMAX * P1 * D * D) / 4)
275 REM
*****Mx(X)*****
280 A1 = ((D ^ 2) / 2) * ((X ^ 2) / (L ^ 2) - 1)
290 A2 = .5 - (((2 / 3) * (X / L)) + ((X ^ 2) / (4 * (L ^ 2))))
300 A2 = A2 * ((X ^ 2) / (L ^ 2))
310 A2 = A2 - (1 / 12)
320 A2 = (D1 ^ 2) * A2
330 Mx = (DEL * PMAX * SIN(F1) * L) / 8: PRINT Mx
340 A3 = (((1 / 3) - (X / 4 / L)) * ((X ^ 3) / (L ^ 3)) - (1 / 12))
350 A3 = A3 * 2 * D1 * D2
360 A4 = D2 ^ 2 / 4 * (X ^ 4 / L ^ 4 - 1)
370 Mx = (-Mx) * (A1 - A2 - A3 - A4)
373 PRINT "NX"; NX, "Mx"; Mx
376 REM
*****MY(X)*****
380 A1 = (D - D1) * ((((-2) * COS(A * X)) / (A ^ 3)) - ((X * SIN(A * X)) / (A ^ 2)) + (2 / (A ^ 3)))
390 A2 = ((D2 - D1) / L) * (((6 / (A ^ 4)) * SIN(A * X)) - (((4 * X) / (A ^ 3)) * COS(A * X)) - (((X ^ 2) / (A ^ 2)) * SIN(A * X)) + ((4 * X) / (A ^ 3)))
400 MY = ((DEL * PMAX * SIN(F1)) / (2 * L)) * (A1 - A2): PRINT "A1"; A1, A2
410 A1 = (COS(A * X) / (A ^ 2)) + ((X * SIN(A * X)) / A) - (1 / (A ^ 2))
420 A1 = ((D ^ 2) - (D1 ^ 2)) / L * A1
430 A2 = (2 * D1 * (D1 - D2)) / (L ^ 2)
440 A3 = (((2 * X * COS(A * X)) / (A ^ 2)) + (((X ^ 2) / A) - (2 / (A ^ 3))) * SIN(A * X) - ((2 * X) / (A ^ 2)))
450 A2 = A2 * A3
460 A3 = ((3 * ((X ^ 2) / (A ^ 2))) - (6 / (A ^ 4))) * COS(A * X)
470 A4 = (((X ^ 3) / A) - ((6 * X) / (A ^ 3))) * SIN(A * X) + ((6 / (A ^ 4)) - ((3 * L * X) / (A ^ 2)))
480 A3 = A3 + A4
490 A3 = (((D2 - D1) ^ 2) / (L ^ 3)) * A3
500 MY = MY - ((DEL * PMAX * COS(F1)) / 8) * (A1 + A2 - A3)
502 PRINT "MY"; MY
505 REM
*****MZ(Z)*****
510 MZ = -DEL * PMAX * SIN(F1) / 2 / L
520 A1 = (D - D1) * (((2 * SIN(A * X)) / (A ^ 3)) - ((X * COS(A * X)) / (A ^ 2)) + (X / (A ^ 2)))

```

```

525 C = -(((X ^ 2) / (A ^ 2)) * COS(A * X)) - (6 / (A ^ 4)) + ((L * X) / (A ^ 2))
530 A2 = ((D2 - D1) / L) * ((6 / (A ^ 4)) * COS(A * X) + (((4 * X) / (A ^ 3)) *
SIN(A * X)) + C): PRINT A1
540 A1 = A1 - A2
550 MZ = MZ * A1
560 A1 = (DEL * PMAX * COS(F1)) / 8
570 A2 = (((D ^ 2) - (D1 ^ 2)) / L) * ((SIN(A * X) / (A ^ 2)) - ((X * COS(A *
X)) / A) + X / A)
580 A3 = 2 * D1 * (D1 - D2) / (L ^ 2)
590 A4 = ((2 * X * SIN(A * X)) / (A ^ 2)) - (((X ^ 2) / A) - (2 / (A ^ 3))) *
COS(A * X) + ((L * X) / A) - (2 / (A ^ 3))
600 A3 = A3 * A4
610 A4 = ((3 * ((X ^ 2) / (A ^ 2)) - (6 / (A ^ 4))) * SIN(A * X)) - (((X ^ 3) / A) -
(6 * X / (A ^ 3))) * COS(A * X) + (((L ^ 2) * X) / A) - ((6 * X) / (A ^ 3))
620 A4 = A4 * (((D1 - D2) ^ 2) / (L ^ 3))
630 MZ = MZ - A1 * (A2 + A3 - A4)
635 PRINT "MZ"; MZ
636 REM
*****VY(X)*****
640 VY = (3 * DEL * (PMAX / 2) * SIN(F1) * ((D2 - D1) / (L ^ 2) / (A ^ 2))) -
(2 * D1 * (D2 - D1) * (DEL * (PMAX / 8) * COS(F1) / (L ^ 2) / A))
660 VY = VY * (((X ^ 4) / 12) - ((L / 6) * (X ^ 3)) + ((L ^ 3) * (X / 12))) - (4 *
B) * (((X ^ 5) / 20) - ((L * (X ^ 4)) / 12) + ((L ^ 4) * (X / 30))) + (10 * (B ^ 2)) *
(((X ^ 6) / 30) - ((L * (X ^ 5)) / 20) + (((L ^ 5) * X) / 60)): PRINT "VY"; VY
670 A1 = ((X ^ 5) / 20 - (((L ^ 2) * (X ^ 3)) / 6) + ((14 * (L ^ 4) * X) / 120)) - (4
* B) * (((X ^ 6) / 30) - (((L ^ 2) * (X ^ 4)) / 12) + ((18 * (L ^ 5) * X) / 360)) +
(10 * (B ^ 2)) * (((X ^ 7) / 42) - (((L ^ 2) * (X ^ 5)) / 20) + ((22 * X * (L ^ 6)) /
840))
680 A1 = A1 / E / J0: VY = VY / (J0 * E)
690 A1 = A1 * (((DEL / 8) * PMAX * COS(F1)) / ((L ^ 3) * A)) * ((D2 - D1) ^
2))
700 VY = VY - A1
703 PRINT "VY"; VY
704 REM
*****VZ(Z)*****
710 VZ = ((3 * (DEL / 8) * PMAX * COS(F1)) / ((L ^ 3) * (A ^ 2)) * ((D2 - D1)
^ 2)) - ((2 / 3) * PMAX * SIN(F1) * (D - D1) * (1 / (2 * L * A)))
720 VZ = VZ * (((X ^ 4) / 12 - (L / 6) * (X ^ 3) + ((L ^ 3) / 12) * X) - (4 * B) *
((X ^ 5) / 20 - (L * (X ^ 4)) / 12 + ((L ^ 4) * X) / 30) + (10 * (B ^ 2)) * ((X ^ 6) /
30 - (L * (X ^ 5)) / 20 + ((L ^ 5) / 60) * X))

```

```

725 VZ = VZ / E / J0
730 A1 = (X ^ 5) / 20 - ((L ^ 2) * (X ^ 3)) / 6 + (14 * (L ^ 4) * X) / 120 - (4 * B)
* ((X ^ 6) / 30 - ((L ^ 2) * (X ^ 4)) / 12 + (18 * (L ^ 5) * X) / 360) + 10 * (B ^ 2)
* ((X ^ 7) / 42 - ((L ^ 2) * (X ^ 5)) / 20 + (22 * X * (L ^ 6)) / 840)
740 A1 = (1 / E / J0 / 3) * A1 * DEL * (PMAX * SIN(F1) / ((L ^ 2) * A)) * (D2 -
D1)
750 VZ = VZ + A1
755 PRINT "VZ = "; VZ
760 MOX = SQR(MY ^ 2 + MZ ^ 2)
770 VOX = SQR(VY ^ 2 + VZ ^ 2)
772 AWD = J1 / J2
773 PRINT "J1/J2"; AWD
780 SE = (E / (L ^ 2)) * ETA * J2
790 VX = VOX / (1 - NX / SE)
800 FX = (P1 / 4) * DX
810 WOX = (P1 / 32) * (DX ^ 3)
820 GMAX = ABS(ABS(NX) / FX + MOX / WOX + (ABS(NX) / WOX) * VX)
830 A1 = (((L ^ 3) / 12) * (D - D1)) - ((L ^ 3) / 32) * (D2 - D1) - ((D - D1) * (L
^ 3)) / (16 * (P1 ^ 2)) + ((D2 - D1) / (16 * (P1 ^ 2))) * L ^ 3
840 A1 = (A1 / L) * B * COS(F1)
850 A1 = A1 + ((P1 / 8) * L * (D ^ 2))
860 A2 = (L / 2) + B * (L ^ 2) + 6 * (B ^ 2) * (((L ^ 3) / 6) - ((L ^ 3) / (4 * (P1 ^
2)))) + (4 * (B ^ 3)) * (((L ^ 4) / 8) - ((3 / 8) * ((L ^ 4) / (P1 ^ 2))))
880 A3 = (B ^ 4) * ((L ^ 5) / 10 - (L ^ 5) / (2 * (P1 ^ 2))) + (3 / 4 / P1 ^ 4) * L ^ 5)
890 A2 = A2 + A3
900 A2 = ((A2 * E * J1) / (L ^ 2)) * (P1 ^ 2): PMAXP = A2 / A1
920 TMAX = ABS(Mx / 2 / WOX): GR = SQR((GMAX ^ 2) + 4 * (TMAX ^ 2))
940 NU = PMAXP / PMAX
950 PRINT "Внутреннее усилие NX = "; NX, "MX = "; Mx, "MY = "; MY,
"MZ = "; MZ
960 PRINT "Прогибы VY = "; VY, "VZ = "; VZ, "Полный прогиб VX = "; VX
970 PRINT "SIGMAMAX = "; GMAX, "Pмакр = "; PMAXP, "TAUmax = ";
TMAX; "NU = "; NU; "SIGMAR = "; GR

```

ПРОГРАММА 3

Программа минимизации массы конструкции шнека
с разрывными витками.

Язык Бейсик

' minMSCRE

'Минимизация целевой функции методом скользящего допуска

' Расчет минимальной массы шнека с разрывными витками

DECLARE SUB FEAS ()

DECLARE SUB STAR ()

DECLARE SUB WRIT ()

DECLARE SUB SUMR ()

DECLARE SUB prob (INQ!)

DIM SHARED X#(50), X1#(50, 50), X2#(50, 50), R#(100), R1#(100),
R2#(100), R3#(100), SUM#(50), F#(50), SR#(50), ROLD#(100), H#(50),
FLG#(10), a#(50, 50)

COMMON SHARED kik, NX, NC, NIC, STEP0#, ALFA#, BETA#,
GAMA#, IN, INF, FDIFER#, SEQL#, k1, k2, k3, k4, k5, k6, K7, K8, K9,
FOLD#, L5, L6, L7, L8, L9, R1A#, R2A#, R3A#

OPEN "minMSCRE.res" FOR OUTPUT AS #1

PRINT #1, "Расчет минимальной массы шнека с разрывными витками "

PRINT " Расчет минимальной массы шнека с разрывными витками "

FDIFER# = 1#

NX = 3 'общее число переменных

NC = 0 'общее число ограничений в виде равенств

NIC = 8 'общее число ограничений в виде неравенств

SIZE# = 5# 'опред. размер деформ. многогранника

CONVER# = .001# 'используется для окончания поиска

ALFA# = 1#

BETA# = .5#

GAMA# = 1#

10 STEP0# = SIZE#

X#(1) = .003# 'координаты

X#(2) = .003# 'стартовой

X#(3) = .005# 'точки

' CALL prob(3)

'PRINT "ДЛЯ ВВОДА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ НАЖМИТЕ F2 И
ВЫБЕРИТЕ ПОДПРОГРАММУ PROB"

IF FDIFER# < CONVER# THEN GOTO 9999

```

PRINT " <<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>"
PRINT #1, "      <<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>"
    Далее с помощью кнопки "F2" войти в подпрограмму SUB PROB
(INQ) и ввести с клавиатуры в тексте программы соответствующие пара-
метры.
    Затем запустить программу на счет (F5)
SUB prob (INQ)
' "ввод перепада давления по длине шнека,[Па]"
ppn = 2' число витков (от начала винтовой нарезки до начала разрыва)
nk = 10 'число витков (суммарное)
PP = 7000000: dP = PP / nk
' "ввод геометрических параметров [м]"
LL0 = .016: R1 = .016: tt = .032: LL = tt * nk: BE = (17 * 3.14 / 180)
' "ввод допускаемого напряжения [Па] и коэффиц. трения"
SIGD = 325000000: FF = .2
' "Расчет допускаемого прогиба [м]"
WD = .01 * 2 * R1
' "ввод плотности [кг/м^3], модуля упругости [Па] и ускорения свобод.
паден. [м/с^2]"
RO = 7850: EE = 2E+11: gg = 9.81
' "расчет распределенной нагрузки, сечения шнека, момента инерции и
момента временного сопротивления"
q = RO * gg * 3.14 / LL * ((R1 - X#(1)) ^ 2 * LL + 2 * (R1 - X#(1) / 2) /
COS(BE) * X#(1) * X#(2) * nk - X#(3) ^ 2 * LL)
FFP = 3.14 * ((R1 - X#(1)) ^ 2 - (X#(3)) ^ 2)
J2 = 3.14 * (R1 - X#(1)) ^ 4 / 4 * (1 - (X#(3) / (R1 - X#(1))) ^ 4)
WW0 = 3.14 * (R1 - X#(1)) ^ 3 / 2 * (1 - (X#(3) / (R1 - X#(1))) ^ 4)
'LL1 = (2 * 3.14 * (R1 - X#(1)) ^ 4 * WD * EE / q) ^ .25
PRINT "q="; q; "LL="; LL; "WD="; WD
PRINT "X#(1)="; X#(1); "X#(2)="; X#(2); "X#(3)="; X#(3)
PRINT #1, "q="; q; "LL="; LL; "WD="; WD
PRINT #1, "X#(1)="; X#(1); "X#(2)="; X#(2); "X#(3)="; X#(3)
' "ДЛЯ НАЧАЛА ВЫЧИСЛЕНИЙ НАЖМИТЕ F5"
Mys0 = 0: Mys1 = 0: Mys2 = 0: Qys1 = 0: Qys2 = 0: Qys3 = 0
FOR I = 1 TO nk - 1
    XI = (2 * I - 1) * tt / 2
    IF I <= nnn THEN GOTO 15 ELSE 5
5 Qy = (-1) ^ (I + 1) * dP * tt * (R1 - X#(1)): Qysx1 = Qysx1 + Qy * XI
    Qysx2 = Qysx2 + Qy * (XI) ^ 2: Qysx3 = Qysx3 + Qy * (XI) ^ 3

```

$15 My = (-1)^{(I+1)} * (dP * (TAN(BE) * (2 * R1 * X\#(1) - X\#(1)^2) * 3.14 + (R1 - X\#(1)) * tt) + 2 * dP * I * FF * (2 * R1 * X\#(1) - X\#(1)^2) * 3.14) * tt / 3.14$

Mys0 = Mys0 + My; Mys1 = Mys1 + My * XI; Mys2=Mys2 + My * (XI) ^ 2
 NEXT I

$Ne = 3.14^2 * EE * J2 / ((2 * LL)^2)$

$Np = PP * (3.14 * R1^2 + 2 * FF * (2 * R1 * X\#(1) - X\#(1)^2) * 3.14)$

IF (Ne) <= 0 THEN Ne = .0001: NpNe = (1 - Np / Ne)

IF (NpNe) <= 0 THEN NpNe = .5

$ETA = 1 / (NpNe)$

$Wmax1 = q * LL^4 * (3 / 4 + LL0 / LL - 1 / 4 * (LL0 / LL)^4)$

$Wmax2a = (2 * LL0 * LL * Qysx1 + 3 * LL * Qysx2 - Qysx3)^2$

$Wmax2b = (2 * LL0 * LL * Mys0 + 6 * LL * Mys1 - 3 * Mys2)^2$

$Wmax2 = (Wmax2a + Wmaxb)^.5$

$Wmax = 1 / (6 * EE * J2) * (Wmax1 + Wmax2); Wpr = Wmax * ETA$

$Mmax = q * LL^2 / 2 + ((Mys0)^2 + Qysx1^2)^.5$

$Mkr = PP * 2 * 3.14 * (R1^3 - (R1 - X\#(1))^3) / 3 * (TAN(BE) + FF * LL / tt)$

$SIG = ((Mmax / WW0 + Np / FFP + Np * Wpr / WW0)^2 + (Mkr / WW0)^2)^.5$

PRINT "I="; I;"SIG="; SIG; "Wpr="; Wpr; "Wmax=";Wmax;"ETA="; ETA

PRINT "Mkr1="; Mkr1; "Mkr="; Mkr; "Mmax="; Mmax; "q="; q;

"R\#(9)="; R\#(9)

PRINT #1, "I="; I; "SIG="; SIG; "Wpr="; Wpr; "Wmax="; Wmax;

"ETA="; ETA

PRINT #1, "Mkr="; Mkr; "Mmax="; Mmax; "q="; q; "R\#(9)="; R\#(9)

IF INQ = 2 THEN GOTO 100

IF INQ = 3 THEN GOTO 200

'ограничений в виде равенств нет

GOTO 300

'ограничения в виде неравенств

100 R\#(1) = 1 - SIG / SIGD

R\#(2) = 1 - Wpr / WD

R\#(3) = X\#(1) / .001 - 1

R\#(4) = 1 - X\#(1) / .005

R\#(5) = X\#(2) / .001 - 1

R\#(6) = 1 - X\#(2) / .005

R\#(7) = X\#(3) / .001 - 1

R\#(8) = 1 - X\#(3) / .007

GOTO 300

'целевая функция

```
200 R#(9) = RO * gg * 3.14 * ((R1 - X#(1)) ^ 2 * LL0 + (R1 - X#(1)) ^ 2 *  
LL + 2 * (R1 - X#(1) / 2) / COS(BE) * X#(1) * X#(2) * nk - X#(3) ^ 2 * (LL0  
+ LL))
```

```
300 END SUB
```

```
SUB STAR
```

```
VN = NX
```

```
STEP1# = STEP0# / (VN * SQR(2#)) * (SQR(VN + 1#) + VN - 1#)
```

```
STEP2# = STEP0# / (VN * SQR(2#)) * (SQR(VN + 1#) - 1#)
```

```
FOR J = 1 TO NX
```

```
  a#(1, J) = 0#
```

```
NEXT J
```

```
FOR I = 2 TO k1
```

```
  FOR J = 1 TO NX
```

```
    a#(I, J) = STEP2#
```

```
  NEXT J
```

```
  L = I - 1
```

```
  a#(I, L) = STEP1#
```

```
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO k1
```

```
  FOR J = 1 TO NX
```

```
    X1#(I, J) = X#(J) + a#(I, J)
```

```
  NEXT J
```

```
NEXT I
```

```
END SUB
```

```
SUB SUMR
```

```
SUM#(IN) = 0#
```

```
CALL prob(2)
```

```
SEQL# = 0#
```

```
IF NIC = 0 THEN GOTO 444
```

```
FOR J = K7 TO K8
```

```
  IF R#(J) >= 0# THEN GOTO 111
```

```
  SEQL# = SEQL# + R#(J) * R#(J)
```

```
111 NEXT J
```

```
444 IF NC = 0 THEN GOTO 313
```

```
CALL prob(1)
```

```
FOR J = 1 TO NC
```

```

    SEQL# = SEQL# + R#(J) * R#(J)
NEXT J
313 SUM#(IN) = SEQL#
END SUB

SUB WRIT
CALL prob(3)
PRINT " ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ (ОБЪЕМ КОНСТРУКЦИИ), V=
"; R#(K9); "[кг]"
PRINT #1, "          ОБЪЕКТНАЯ ФУНКЦИЯ = "; R#(K9); "[кг]"
PRINT " ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ"
PRINT #1, "ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ"
FOR J = 1 TO NX
    IF J = 1 THEN PRINT ", X1": GOTO 22
    IF J = 2 THEN PRINT ", X2": GOTO 22
    IF J = 3 THEN PRINT ", X3"
22 PRINT " ВЕКТОР: X("; J; ") = "; X#(J); "[м]"
    PRINT #1, "          ВЕКТОР: X("; J; ") = "; X#(J); "[м]"
NEXT J
IF NC = 0 THEN GOTO 6
CALL prob(1)
FOR J = 1 TO NC
    PRINT " H("; J; "): "; R#(J)
    PRINT #1, "          H("; J; "): "; R#(J)
NEXT J
6 IF NIC = 0 THEN GOTO 503
CALL prob(2)
FOR J = K7 TO k6
    PRINT " G("; J; "): "; R#(J)
    PRINT #1, "          G("; J; "): "; R#(J)
NEXT J
503 END SUB

```

ПРОГРАММА 4

Программа расчёта на прочность двухслойных цилиндров
с винтовой канавкой в месте сопряжения.
Язык Бейсик

```
' CalcT-LC.bas
' ПРОГРАММА РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ДВУХСЛОЙНЫХ ЦИЛИН-
ДРОВ
' С ВИНТОВОЙ КАНАВКОЙ В МЕСТЕ СОПРЯЖЕНИЯ
' ввод исходных данных в системе измерения [СИ]
DATA .0225, .00005, .00045, .00055, .3, .0225, .0325, 566E6, 434E6, .6, 2E11,
150E6, .3
READ A, D, C, H0, HK, L, R0, RK, SIGMAT1, SIGMAT2, NT, E, PMAX, MU
' определение контактных давлений
Q1 = PMAX * 2 * A / D: Q2 = PMAX * 2 * A / C
' определение толстостенности наружного цилиндра
A1 = (SIGMAT2 * C / NT / A / PMAX) ^ 2 - .75
A2 = SQR(A1) + .1: A3 = SQR(A1) - 1.9: BETA = SQR(A2 / A3)
REM "определение наружного радиуса цилиндра": B = C * BETA
' определение величины натяга
DELT = Q2 * C * RK * R0 / (R0 * HK + RK * 2 * H0) + Q2 * C * (1 - MU +
BETA ^ 2 + BETA ^ 2 * MU) / 2 / (BETA ^ 2 - 1) - PMAX * A * 2 * RK * R0 /
(R0 * HK + RK * 2 * H0): DELT = DELT / E
' определение допускаемого контактного давления
QDOP = PMAX * (A / H0 - (.5 - MU) * L ^ 2 / 2 / H0 ^ 2)
A1 = (A / H0 - (.5 - MU) * L ^ 2 / 2 / H0 ^ 2 + .5) ^ 2 - (A / H0 + MU / 2 * L ^
2 / H0 ^ 2) ^ 2 + (A / H0 + MU / 2 * L ^ 2 / H0 ^ 2) * (1 - L ^ 2 / 2 / H0 ^ 2) + L
^ 2 / 2 / H0 ^ 2 * (1 + L ^ 2 / 2 / H0 ^ 2) + 1
A1 = A1 * PMAX ^ 2 + (SIGMAT1 / NT) ^ 2: A1 = SQR(A1)
QDOP = QDOP + A1: QDOP = QDOP * 2 * H0 / D
' проверка выполнения условия по контактным давлениям
IF Q1 > QDOP THEN
PRINT "НЕ ВЫПОЛНЕНО УСЛОВИЕ ПО КОНТАКТНЫМ ДАВЛЕНИ-
ЯМ"
PRINT "НЕОБХОДИМО УВЕЛИЧИТЬ ПАРАМЕТРЫ:"
PRINT "d, c, H0, HK, R0, Rk": ELSE
PRINT "ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ: "
PRINT "РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА: "
'D,C,H0,HK,RO,RK)(X(5),A);
END IF: END
```

ПРОГРАММА 5

Программа минимизации массы конструкции двухслойного
материального цилиндра с канавками в месте сопряжения.

Язык Бейсик

```
'
                                minMT-LC
' Минимизация целевой функции методом скользящего допуска
' Минимизация массы конструкции двухслойного материального цилиндра с канавками в местах сопряжения
  DECLARE SUB FEAS ()
  DECLARE SUB STAR ()
  DECLARE SUB WRIT ()
  DECLARE SUB SUMR ()
  DECLARE SUB PROB (INQ!)
  DIM SHARED X$(50), X1$(50, 50), X2$(50, 50), R$(100), R1$(100),
R2$(100), R3$(100), SUM$(50), F$(50), SR$(50), ROLD$(100), H$(50),
FLG$(10), A$(50, 50)
  COMMON SHARED NX, NC, NIC, STEP0#, ALFA#, BETA#, GAMA#,
IN, INF, FDIFER#, SEQL#, K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, K8, K9, FOLD#,
L5, L6, L7, L8, L9, R1A#, R2A#, R3A#
  OPEN "minVT-LC.res" FOR OUTPUT AS #1
  PRINT #1, "          Расчет двухслойного цилиндра"
  PRINT "-----"
  PRINT #1, "          -----"
  FDIFER# = 1#
  NX = 4          'общее число переменных
  NC = 0          'общее число ограничений в виде равенств
  NIC = 10        'общее число ограничений в виде неравенств
  SIZE# = 5#      'опред. размер деформ. многогранника
  CONVER# = .001# 'используется для окончания поиска
  ALFA# = 1#
  BETA# = .5#
  GAMA# = 2#
10 STEP0# = SIZE#
  X$(1) = .025#   'координаты
  X$(2) = .033#   'стартовой
  X$(3) = .042#   'точки
  X$(4) = .008#   '
```

```

IF FDIFER# < CONVER# THEN GOTO 9999
PRINT " <<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>"
PRINT #1, " <<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>"

```

Далее с помощью кнопки “F2” войти в подпрограмму SUB PROB (INQ) и ввести с клавиатуры в тексте программы соответствующие параметры.

Затем запустить программу на счёт (F5)

SUB PROB (INQ)

'Внутренний радиус внутреннего цилиндра, м

aa = .0225

'Плотность материала цилиндра, кг/м³

RO = 7800

'Коэффициент Пуассона для стали

mu1 = .3

'Давление внутри цилиндра, Па

PP = 150000000

dd = X#(1): bb = X#(3): cc1 = X#(2): LL = X#(4)

PRINT cc1

bet = bb / cc1

$PP1 = ((aa / (dd - aa) + mu1 * LL^2 / 2 / (dd - aa)^2) - 2 * aa / dd * dd / 2 / (dd - aa) - LL^2 / 2 / (dd - aa)^2)^2$

$PP2 = ((LL^2 / 2 / (dd - aa)^2 + 1))^2$

$PP3 = ((aa / (dd - aa) + mu1 * LL^2 / 2 / (dd - aa)^2) - 2 * aa / dd * dd / 2 / (dd - aa) + 1)^2$

Sig1 = PP * SQR(.5 * (PP1 + PP2 + PP3))

PRINT Sig1

$Sig2 = PP * SQR(aa^2 / cc1^2 * (((bet^2 + 1) / (bet^2 - 1))^2 + 1.8 * ((bet^2 + 1) / (bet^2 - 1)) + 1.56))$

'Допускаемые напряжения для материала двухслойного цилиндра, Па

Sigd1 = 566000000: Sigd2 = 434000000

IF INQ = 2 THEN GOTO 100

IF INQ = 3 THEN GOTO 200

'ограничений в виде равенств нет

GOTO 300

'ограничения в виде неравенств

100

R#(1) = 1# - Sig1 / Sigd1

R#(2) = 1# - Sig2 / Sigd2

R#(3) = X#(1) / .025 - 1#

```

R#(4) = 1# - X#(1) / .032
R#(5) = X#(2) / .03 - 1#
R#(6) = 1# - X#(2) / .037
R#(7) = X#(3) / .042 - 1#
R#(8) = 1# - X#(3) / .052
R#(9) = X#(4) / .008 - 1#
R#(10) = 1# - X#(4) / .015
GOTO 300

```

'целевая функция

```

200 R#(11) = 3.14 * RO * (2 * (dd ^ 2 - aa ^ 2) + (cc1 ^ 2 - dd ^ 2) + 2 * (bb ^
2 - cc1 ^ 2)) / 1000

```

```

300 X#(1) = dd: X#(3) = bb: X#(2) = cc1: X#(4) = LL

```

```

END SUB

```

```

SUB STAR

```

```

VN = NX

```

```

STEP1# = STEP0# / (VN * SQR(2#)) * (SQR(VN + 1#) + VN - 1#)

```

```

STEP2# = STEP0# / (VN * SQR(2#)) * (SQR(VN + 1#) - 1#)

```

```

FOR J = 1 TO NX

```

```

    A#(1, J) = 0#

```

```

NEXT J

```

```

FOR I = 2 TO K1

```

```

    FOR J = 1 TO NX

```

```

        A#(I, J) = STEP2#

```

```

    NEXT J

```

```

    L = I - 1

```

```

    A#(I, L) = STEP1#

```

```

NEXT I

```

```

FOR I = 1 TO K1

```

```

    FOR J = 1 TO NX

```

```

        X1#(I, J) = X#(J) + A#(I, J)

```

```

    NEXT J

```

```

NEXT I

```

```

END SUB

```

```

SUB SUMR

```

```

SUM#(IN) = 0#

```

```

CALL PROB(2)

```

```

SEQL# = 0#

```

```

IF NIC = 0 THEN GOTO 444

```

```

FOR J = K7 TO K8

```

```

        IF R#(J) >= 0# THEN GOTO 111
        SEQL# = SEQL# + R#(J) * R#(J)
111  NEXT J
444  IF NC = 0 THEN GOTO 313
        CALL PROB(1)
        FOR J = 1 TO NC
            SEQL# = SEQL# + R#(J) * R#(J)
        NEXT J
313  SUM#(IN) = SEQL#
        END SUB

SUB WRIT
CALL PROB(3)
PRINT " ОБЪЕКТНАЯ ФУНКЦИЯ = "; R#(K9)
PRINT #1, "        ОБЪЕКТНАЯ ФУНКЦИЯ = "; R#(K9)
FOR J = 1 TO NX
    PRINT " ВЕКТОР: X("; J; ") = "; X#(J)
    PRINT #1, "        ВЕКТОР: X("; J; ") = "; X#(J)
NEXT J
IF NC = 0 THEN GOTO 6
CALL PROB(1)
FOR J = 1 TO NC
    PRINT " H("; J; "): "; R#(J)
    PRINT #1, "        H("; J; "): "; R#(J)
NEXT J
6  IF NIC = 0 THEN GOTO 503
    CALL PROB(2)
    FOR J = K7 TO K6
        PRINT " G("; J; "): "; R#(J)
        PRINT #1, "        G("; J; "): "; R#(J)
    NEXT J
503  END SUB

```

ПРОГРАММА 6

Расчёт оптимальных технологических и конструктивных параметров
процесса и оборудования экструзии резиновых смесей

OPTISCRE.BAS

'Минимизация целевой функции методом скользящего допуска
'Расчет оптимальных технологических и конструктивных параметров
' процесса экструзии резиновых смесей с учётом минимизации техно-
логической мощности и получения качественного экструдата

```
DECLARE SUB FEAS ()
DECLARE SUB STAR ()
DECLARE SUB WRIT ()
DECLARE SUB SUMR ()
DECLARE SUB PROB (INQ)
DIM SHARED X#(50), X1#(50, 50), X2#(50, 50), R#(100), R1#(100),
R2#(100), R3#(100), SUM#(50), F#(50), SR#(50), ROLD#(100), H#(50),
FLG#(10), A#(50, 50)
COMMON SHARED NX, NC, NIC, STEP0#, ALFA#, BETA#, GAMA#,
IN, INF, FDIFER#, SEQL#, K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, K8, K9, FOLD#,
L5, L6, L7, L8, L9, R1A#, R2A#, R3A#
OPEN "flexbt5.res" FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1, "      N , Q"
PRINT "-----"
PRINT #1, "-----"
FDIFER# = 1#
NX = 5      'общее число переменных
NC = 2      'общее число ограничений в виде равенств
NIC = 13    'общее число ограничений в виде неравенств
SIZE# = .003# 'опред. размер деформ. многогранника
CONVER# = .01# 'используется для окончания поиска
ALFA# = 1#
BETA# = .5#
GAMA# = 2#
10 STEP0# = SIZE#
X#(1) = 17# ' FI, [град] координаты
X#(2) = .01# ' h, [м] стартовой
X#(3) = 3.2000000000000001D-02' D, [м] точки
```

```

X#(4) = 50 / 60# 'W, [c^-1]
X#(5) = .32# 'L, [M]
IF FDIFER# < CONVER# THEN GOTO 9999
PRINT " <<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>"
PRINT #1, "          <<<<< *НАЧАЛО ВЫЧИСЛЕНИЙ* >>>>>"
PRINT "-----"

```

‘Далее с помощью кнопки “F2” войти в подпрограмму SUB PROB (INQ) и ввести с клавиатуры в тексте программы соответствующие параметры.

Затем запустить программу на счёт (F5)

```

K1 = NX + 1
K2 = NX + 2
K3 = NX + 3
K4 = NX + 4
K5 = NX + 5
K6 = NC + NIC
K7 = NC + 1
K8 = NC + NIC
K9 = K8 + 1
N = NX - NC
N1 = N + 1
IF N1 >= 3 THEN GOTO 50
N1 = 3
N = 2
50  N2 = N + 2
    N3 = N + 3
    N4 = N + 4
    N5 = N + 5
    N6 = N + 6
    N7 = N + 7
    N8 = N + 8
    XN = N
    XNX = NX
    XN1 = N1
    R1A# = .5# * (SQR(5#) - 1#)
    R2A# = R1A# * R1A#
    R3A# = R2A# * R1A#
    L5 = NX + 5
    L6 = NX + 6
    L7 = NX + 7
    L8 = NX + 8
    L9 = NX + 9
    ICONT = 1
    NCONT = 1

```

```

FOR J = 1 TO NX
  PRINT " X("; J; ") = "; X#(J)
  PRINT #1, "          X("; J; ") = "; X#(J)
NEXT J
FDIFER# = 2# * (NC + 1) * STEP0#
FOLD# = FDIFER#
IN = N1
CALL SUMR
SR#(N1) = SQR(SEQ#)
PRINT " FDIFER ="; FDIFER#, " SR(N1) ="; SR#(N1)
PRINT #1, "          FDIFER ="; FDIFER#, " SR(N1) ="; SR#(N1)
IF SR#(N1) < FDIFER# THEN GOTO 341
CALL WRIT
INF = N1
STEP0# = .05# * FDIFER#
CALL FEAS
PRINT " SR(INF) ="; SR#(INF)
PRINT #1, "          SR(INF) ="; SR#(INF)
IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80
341 PRINT FDIFER#
CALL WRIT
FTER# = R#(K9)
STEP1# = STEP0# * (SQR(XNX + 1#) + XNX - 1#) / (XNX * SQR(2#))
STEP2# = STEP0# * (SQR(XNX + 1#) - 1#) / (XNX * SQR(2#))
ETA# = (STEP1# + (XNX - 1#) * STEP2#) / (XNX + 1#)
FOR J = 1 TO NX
  X#(J) = X#(J) - ETA#
NEXT J
CALL STAR
FOR I = 1 TO N1
  FOR J = 1 TO NX
    X2#(I, J) = X1#(I, J)
  NEXT J
NEXT I
FOR I = 1 TO N1
  IN = I
  FOR J = 1 TO NX
    X#(J) = X2#(I, J)
  NEXT J
  CALL SUMR
  SR#(I) = SQR(SEQ#)
  IF SR#(I) < FDIFER# THEN GOTO 8
  CALL FEAS
  IF FOLD# < 1E-09 THEN GOTO 80

```

```

8    CALL PROB(3)
      F#(I) = R#(K9)
      NEXT I
1000 STEP0# = .05# * FDIFER#
      ICONT = ICONT + 1
      FH# = F#(1)
      LHIGH = 1
      FOR I = 2 TO N1
        IF F#(I) < FH# THEN GOTO 166
        FH# = F#(I)
        LHIGH = I
166  NEXT I
SUB PROB (INQ)
‘Реологические константы MU [Па с^pm]
MU = 100000: pm = .32
‘Перепад давления dP [Па]
dP = 10000000
‘Производительность шнековой машины Q [м^3/с]
Q = .00005
‘Плотность материала шнека RO1 [кг/м^3]
RO1 = 7850
‘Допускаемое напряжение материала шнека SIG [Па]
SIG = 3E+08
‘Модуль Юнга E [Па]
E = 2E+11
IF X#(2) < 0 THEN X#(2) = .00000001#
IF X#(3) < 0 THEN X#(3) = .00000001#
IF X#(4) < 0 THEN X#(4) = .00000001#
‘Диаметр осевого отверстия шнека d1 [м]
d1 = .001
‘Ширина витка шнека E1 [м]
E1 = .003
‘Шаг нарезки шнека
t1 = 3.14 * X#(3) * TAN(X#(1) * 3.14 / 180)
CS = COS(X#(1) * 3.1416 / 180)
SN = SIN(X#(1) * 3.1416 / 180)
‘Ширина канала нарезки шнека
W1 = (t1 - E1) * CS
PRINT "t1="; t1; "CS="; CS; "X#(2)="; X#(2); "W1="; W1
Fg = 1: Fp = 1

```

```

'Расчёт отношения глубины винтового канала к его ширине
  hb = X#(2) / W1
'Расчёт коэффициентов прямотока и обратного потока
  Fg = .19191 + .81888 * EXP(-hb)
  Fp = .0614 + .9504 * EXP(-hb)
'Расчёт производительности шнековой машины
  Q# = W1 * X#(2) * 3.14 * X#(3) * X#(4) * CS * Fg / 2
4 REM "расчет температуры резиновой смеси T"
Tz = 75; T0 = 50; RO = 1200; C = 2100; LA = .22
Ts# = Tz
5 'AL = 175 - .833333 * Ts#
KA = AL * X#(2) / LA; b2 = .005
'PRINT AL
A = 2 * AL * W1 / (RO * C * Q#)
T# = Tz + MU * X#(2) ^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3) * X#(4) / X#(2)) ^
(pm + 1) * EXP(-b2 * Ts#) * (1 + (EXP(-A * X#(5)) - 1) / (A * X#(5)))
Ts1# = T# + (Tz - T0) * (EXP(-A * X#(5)) - 1) / (A * X#(5))
IF ABS((Ts1# - Ts#) / Ts1#) * 100 <= 1 THEN 23 ELSE 19
19 'PRINT "Ts1#="; Ts1#; Ts#
Ts# = Ts1#: GOTO 5
23 T# = Tz + MU * X#(2) ^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3) * X#(4) /
X#(2)) ^ (pm + 1) * EXP(-b2 * Ts1#)
  TD# = T# - (MU * X#(2) ^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3) * X#(4) /
X#(2)) ^ (pm + 1) * EXP(-b2 * Ts1#) - T0 + Tz) * EXP(-A * X#(5))
'PRINT "TD#="; TD#; KA
REM "расчет коэффициента EE"
AN = 0; ak = X#(5) / SN; KP = 16; E3 = .01; N11 = 2
31 H = (ak - AN) / N11; X1 = AN; S = 0
32 X2 = X1 + H; X3 = (X1 + X2) / 2
IF X2 > ak THEN 47
X5 = X1: GOTO 51
33 F1 = TD1
X5 = X3: GOTO 52
34 F2 = TD1
X5 = X2: GOTO 53
36 F3 = TD1
  I0 = (H / 6) * (F1 + F2 + 4 * F3)
  S = S + I0; X1 = X2
  GOTO 32

```

```

47 N11 = N11 * 2
   I22 = S
   'PRINT "I11="; I11; "I2="; I22; N11
   IF ABS(I11 - I22) <= E3 * KP THEN 49 ELSE 48
48 I11 = I22: GOTO 31
49 EE = I22 / ak
   'PRINT X#(1); X#(2); X#(3); X#(4); X#(5)
   GOTO 57
51 T# = Tz + MU * X#(2) ^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3) * X#(4) /
X#(2)) ^ (pm + 1) * EXP(-b2 * Ts1#)
TD1# = T# - (MU * X#(2) ^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3) * X#(4) /
X#(2)) ^ (pm + 1) * EXP(-b2 * Ts1#) - T0 + Tz) * EXP(-A * X#(5))
TD1 = EXP(-b2 * TD1#)
GOTO 33
52 T# = Tz + MU * X#(2) ^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3) * X#(4) /
X#(2)) ^ (pm + 1) * EXP(-b2 * Ts1#)
TD1# = T# - (MU * X#(2) ^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3) * X#(4) /
X#(2)) ^ (pm + 1) * EXP(-b2 * Ts1#) - T0 + Tz) * EXP(-A * X#(5))
TD1 = EXP(-b2 * TD1#)
GOTO 34
53 T# = Tz + MU * X#(2) ^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3) * X#(4) /
X#(2)) ^ (pm + 1) * EXP(-b2 * Ts1#)
TD1# = T# - (MU * X#(2) ^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3) * X#(4) /
X#(2)) ^ (pm + 1) * EXP(-b2 * Ts1#) - T0 + Tz) * EXP(-A * X#(5))
TD1 = EXP(-b2 * TD1#)
GOTO 36
57 Q1 = W1 * X#(2) * 3.14 * X#(3) * X#(4) * CS * Fg / 2
Q2 = W1 * X#(2) ^ (2 + pm) * Fp * dP * SN / (12 * MU * (3.14 * X#(3) *
X#(4)) ^ (pm - 1) * X#(5) * EE)
   Q1# = Q1 - Q2
   IF ABS(Q1# - Q#) / Q# * 100 <= 1 THEN 59 ELSE 58
58 Q# = Q1#: GOTO 5
59 REM "расчет интеграла Бейли JB"
TAU = (W1 * X#(2) / SN * X#(5)) / Q# / 60
dTAU = 1 / 60
TAUS1 = -16.17806: TAUS2 = 3131360
61 JB0 = 0: XT5 = X#(5) * dTAU / TAU
FOR X5 = 0 TO X#(5) STEP XT5
T# = Tz + MU * X#(2) ^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3) * X#(4) / X#(2)) ^
(pm + 1) * EXP(-b2 * Ts1#)

```

```

TDZ# = T# - (MU * X#(2) ^ 2 / (2 * KA * LA) * (3.14 * X#(3) * X#(4) /
X#(2)) ^ (pm + 1) * EXP(-b2 * Ts1#) - T0 + Tz) * EXP(-A * X5)
TDZK# = TDZ# + 273.15
TAUS = (TAUS1 + TAUS2 / TDZK# ^ 2) ^ 2
JB = JB0 + dTAU / TAUS: JB0 = JB
NEXT X5
EPS = ABS((JB - JB1) / JB) * 100
'PRINT JB1; JB; dTAU; EPS
IF EPS < 1 THEN 63 ELSE 62
62 JB1 = JB: dTAU = dTAU / 1.5: GOTO 61
63 'PRINT "TAU="; TAU; "JB="; JB; XT5
99 IF INQ = 2 THEN GOTO 100
    IF INQ = 3 THEN GOTO 200
NN1 = MU * W1 * (3.14 * X#(3) * X#(4)) ^ (1 + pm) / X#(2) ^ pm * (4 * SN ^
2 + CS ^ 2) * X#(5) * EE / SN
NN2 = 3.14 * X#(3) * X#(4) * CS / 2 * W1 * X#(2) * dP
NN3 = (3.14 * X#(3) * X#(4)) ^ (pm + 1) * MU * E1 * X#(5) / TAN(X#(1) *
3.1416 / 180) / d1 ^ pm * EXP(-b2 * Tz)
R#(14) = NN1 + NN2 + NN3
95 Q1 = W1 * X#(2) * 3.14 * X#(3) * X#(4) * CS * Fg / 2
    Q2 = W1 * X#(2) ^ (2 + pm) * Fp * dP * SN / (12 * MU * (3.14 * X#(3) *
X#(4)) ^ (pm - 1) * X#(5) * FZ)
    Q# = Q1 - Q2
NN1 = MU * W1 * (3.14 * X#(3) * X#(4)) ^ (1 + pm) / X#(2) ^ pm * (4 * SN ^
2 + CS ^ 2) * X#(5) * FZ / SN
NN2 = 3.14 * X#(3) * X#(4) * CS / 2 * W1 * X#(2) * dP
NN3 = (3.14 * X#(3) * X#(4)) ^ (pm + 1) * MU * E1 * X#(5) / TAN(X#(1) *
3.1416 / 180) / d1 ^ pm * FZ
R#(13) = NN1 + NN2 + NN3
' "расчет шнека на прочность, жесткость и устойчивость"
FI = X#(1)
h = X#(2)
d = X#(3)
W4 = X#(4) * 60
L = X#(5)
A = 400: DIM MIZ(A), X(A), МК(A), FP1(A)
' "ДОПУСКАЕМОЕ НАПРЯЖЕНИЕ (SIG), [Па]"
' "ПЛОТНОСТЬ МАТЕРИАЛА ШНЕКА, [КГ/М^3]"
d11 = .01 ' "ДИАМЕТР ОСЕВОГО ОТВЕРСТИЯ ШНЕКА, [М]"
ZX = 10: dX = L / ZX: PI = 3.14: FI = FI * PI / 180

```

```

'A = PI * d * h * (t1 - E1) * COS(FI) ^ 2 / 2
'B = h ^ 3 * (t1 - E1) * SIN(2 * FI) / (24 * L)
'GAM = PI ^ 2 * d ^ 2 * DL ^ 3 * TAN(FI) * SIN(FI) / (10 * E1 * L)
'Q = A * K * N / (K + B + GAM): 'PRINT "Q="; Q; "[M^3/c]"
MKR = 9.55 * R14 / W4: F = 3.14 * d ^ 2 / 4
""РАСЧЕТ УСИЛИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ ФОРМОВАНИЯ"
P1 = F * dP
' "УСИЛИЕ ОТ ДАВЛЕНИЯ ФОРМОВАНИЯ, P1="; P1; " [н]"
' ""РАСЧЕТ ГИБКОСТИ ШНЕКА"
AL1 = d11 / d
F1 = 3.14 * d ^ 2 / 4 * (1 - AL1 ^ 2)
J1 = 3.14 * d ^ 4 / 64 * (1 - AL1 ^ 4)
I = d * SQR(1 + AL1 ^ 2) / 4: MU1 = 2
190 LA1 = MU1 * L / I
'PRINT "РАСЧЕТ ПО ПЕРВОМУ ВАРИАНТУ - НА ПРОЧНОСТЬ"
""РАСЧЕТ МОМЕНТА ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КРУЧЕНИЯ"
WR = 3.14 * d ^ 3 * (1 - AL1 ^ 4) / 16
""РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ КРУЧЕНИЯ"
TAUmax = MKR / WR
""РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА В
ОПАСНОМ СЕЧЕНИИ"
FOR A = 0 TO ZX
X(A) = dX * A: MIZ(A) = RO1 * F1 * X(A) ^ 2 / 2 * 10
MK(A) = 9.55 * R14 / W4 / 1000: FP1(A) = RO1 * F1 * X(A) ^ 4 / (8 * E * J1):
NEXT A
'MIZmax = RO1 * F1 * L ^ 2 / 2 * 10
'PRINT MIZmax
""РАСЧЕТ МОМЕНТА ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗГИБА"
Wh0 = 3.14 * d ^ 3 * (1 - AL1 ^ 4) / 32
""РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ИЗГИБА"
SIGRmax = P1 / F1
SIGmax = SIGRmax + MIZmax / Wh0
""РАСЧЕТ ЭКВИВАЛЕНТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ "
SIGekv = SQR(SIGmax ^ 2 + 4 * TAUmax ^ 2)
Fmax1 = RO1 * F1 * L ^ 4 / (8 * E * J1)
K1 = SQR(P1 / (E * J1))
A1 = RO1 * F1 * (L - (SIN(K1 * L)) / K1) / (K1 * COS(K1 * L))
Fmax01 = RO * F1 / K1 ^ 2 * (1 / K1 ^ 2 + L ^ 2 / 2)
Fmax02 = 1 / K1 * (RO1 * F1 / K1 ^ 3 + A1 * L) * COS(K1 * L)
Fmax03 = 1 / K1 ^ 2 * (RO1 * F1 * L / K1 - A1) * SIN(K1 * L)

```

```

Fmax = (Fmax01 - Fmax02 - Fmax03)/(E*J1)
IF Fmax1 < .0000001 THEN Fmax1 = 0
IF Fmax2 < .0000001 THEN Fmax2 = 0
PRINT "SIGekv="; SIGekv; SIG
99 IF INQ = 2 THEN GOTO 100
   IF INQ = 3 THEN GOTO 200
‘ Ограничение в виде равенства
   R#(1) = (1 - Q# / Q) * 1
   R#(2) = (1 - (TD# - T0) / delT)
   PRINT "Q#="; Q#; "dT="; (TD# - T0)
   PRINT "N="; R#(15); "JB="; JB   GOTO 300
100 ‘Интервалы изменения варьируемых параметров (ограничения в виде
не равенств)
   R#(3) = 1 - JB / JB1# ‘Левая граница
   R#(4) = X#(1) - 16 ‘Левая граница
   R#(5) = 21# - X#(1) ‘Правая граница
   R#(6) = (X#(2) - .003#) * 10 ‘Левая граница
   R#(7) = (7.000000000000001D-02 - X#(2)) * 100 ‘Правая граница
   R#(8) = (X#(3) - 2.000000000000001D-02) * 10 ‘Левая граница
   R#(9) = (9.000000000000001D-02 - X#(3)) * 10 ‘Правая граница
   R#(10) = X#(4) - .1# ‘Левая граница
   R#(11) = 1.5# - X#(4) ‘Правая граница
   R#(12) = X#(5) - .2# ‘Левая граница
   R#(13) = 1# - X#(5) ‘Правая граница
   PRINT "SIGekv="; SIGekv; SIG
   R#(14) = 1 - SIGekv / SIG
   GOTO 300
200 ‘Расчёт технологической мощности (целевой функции)
CS = COS(X#(1) * 3.1416 / 180)
SN = SIN(X#(1) * 3.1416 / 180)
NN1 = MU * W1 * (3.14 * X#(3) * X#(4)) ^ (1 + pm) / X#(2) ^ pm * (4 * SN ^
2 + CS ^ 2) * X#(5) * FZ / SN
NN2 = 3.14 * X#(3) * X#(4) * CS / 2 * W1 * X#(2) * dP
NN3 = (3.14 * X#(3) * X#(4)) ^ (pm + 1) * MU * E1 * X#(5) / TAN(X#(1) *
3.1416 / 180) / d1 ^ pm * FZ
   R#(15) = NN1 + NN2 + NN3
300 END SUB

```

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. МИНИМИЗАЦИЯ МАССЫ ШНЕКОВ ЭКСТРУЗИОННЫХ МАШИН	4
1.1. Постановка задачи минимизации массы шнека экструзионных машин	4
1.2. Расчёты шнеков на прочность, жёсткость и устойчивость	6
1.2.1. Расчёт консольного шнекового вала на прочность и жёсткость	6
1.2.2. Расчёт консольного шнекового вала на прочность и жёсткость с учётом гидромеханического нагружения	15
1.2.3. Нагрузки, действующие на шнек	16
1.2.4. Расчёт внутренних усилий в поперечных сечениях шнека	18
1.2.5. Определение прогибов шнека	21
1.3. Решение задачи минимизации массы конструкции шнека с осевым отверстием и разрывными витками	25
2. МИНИМИЗАЦИЯ МАССЫ СОСТАВНОГО МАТЕРИАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА	28
2.1. Постановка задачи минимизации массы составного материального цилиндра	28
2.2. Расчёт на прочность двухслойных материальных цилиндров с винтовой канавкой в месте сопряжения	34
3. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСТРУЗИИ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ	40
3.1. Инженерный расчёт оптимальных технологических и конструктивных параметров процесса экструзии оборудования	40
3.2. Методика инженерного расчёта процесса и оборудования экструзии резиновых смесей	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	50
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	51
ПРИЛОЖЕНИЕ	52

Учебное издание

КЛИНКОВ Алексей Степанович,
СОКОЛОВ Михаил Владимирович,
КОЧЕТОВ Виктор Иванович,
ОДНОЛЬКО Валерий Григорьевич

ИНЖЕНЕРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСТРУЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Учебное пособие

Редактор Л.В. Комбарова
Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 15.03.2012.
Формат 60 × 84 / 16. 4,65 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 83

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО "ТГТУ"
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14