

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является закрепление навыков расчета на прочность элементов конструкций, полученных в ходе изучения курса «Сопротивление материалов». Курсовая работа выполняется после освоения разделов: статически неопределимые стержневые системы, расчет круглых валов на кручение, расчеты на прочность при сложном сопротивлении.

Курсовая работа включает в себя следующие этапы:

1. Построение расчетной схемы.
2. Определение величины продольной нагрузки из раскрытия условия статической неопределимости конструкции.
3. Расчет статически неопределимой конструкции на одноосное растяжение (сжатие).
4. Расчет статически неопределимой конструкции на кручение.
5. Расчет на прочность элементов конструкции.

Конечным результатом курсовой работы является определение размеров (диаметра) ступенчатого стержня, находящегося в условиях сложного нагружения – одноосного сжатия совместно с кручением.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

1. Выбирается согласно варианту задания расчетная схема конструкции из таблицы данных по вариантам.
2. Рассчитывается напряженное состояние заданной статически определимой конструкции на растяжение-сжатие. По результатам расчета строятся эпюры продольных усилий и напряжений.
3. Из условия полного закрытия зазора определяется минимальная величина продольной нагрузки, при которой система становится статически неопределимой.
4. В соответствии с таблицей вариантов заданий выбирается величина продольной нагрузки, при которой система становится статически неопределимой.

5. Производится расчет статически неопределимой конструкции на одноосное растяжение (сжатие). По результатам расчета строятся эпюры продольных усилий и напряжений.

6. Производится расчет статически неопределимого стержня на кручение из условия закрепления его торцов на опорах. Строятся эпюры крутящих моментов и касательных напряжений.

7. Определяется опасное сечение стержня при совместном нагружении продольной силой и крутящим моментом.

8. По третьей или четвертой теориям прочности рассчитываются величины диаметров стержня при учете заданного отношения площадей его участков.

Типовой лист Задания на курсовую работу содержит исходные данные для выполнения расчета:

1. Длины участков стержня l_1, l_2, l_3 .
2. Отношение площадей участков F_1, F_2, F_3 к минимальной площади K_1, K_2, K_3 , т.е. $F_1 = K_1 F, F_2 = K_2 F, F_3 = K_3 F$, F – минимальная площадь.
3. Величина зазора в долях длины $l_1, \delta l_1$.
4. Величина продольного усилия P .
5. Величина превышения продольного усилия P в процентах над минимальным усилием P_{\min} , получаемым из условия закрытия зазора, $\Delta P\%$.
6. Величина крутящих моментов.
7. Материал стержня (сталь). Допускаемое напряжение принимается равным $[\sigma] = 160$ МПа, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, модуль сдвига $G = 0,3 E$.

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Пусть заданы следующие характеристики конструкции:

$$l_1 = l_2 = l_3 = 1 \text{ м}; \quad P_1 = P; \quad P_2 = 2P; \quad P = 10^4 \text{ Н};$$

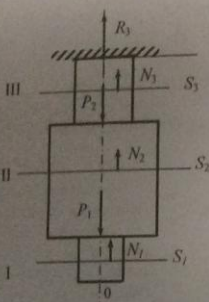


Рис. 2

Очевидно, что $R_3 = N_3$. Используя значения $N_1 - N_3$, находим значения напряжений на участках:

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{F_1} = 0; \quad \sigma_2 = \frac{N_2}{F_2} = \frac{P}{3F}; \quad \sigma_3 = \frac{N_3}{F_3} = \frac{3P}{2F}. \quad (3)$$

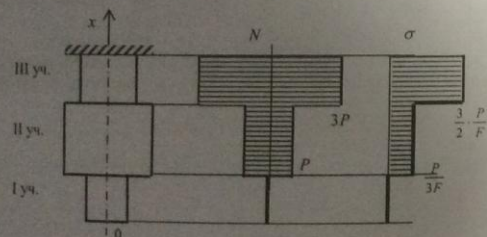


Рис. 3

$$K_1 = \frac{F}{F_1} = 1; \quad K_2 = \frac{F_2}{F_1} = 3; \quad K_3 = \frac{F_3}{F_1} = 2;$$

$$M_1 = 0; \quad M_2 = 1000 \text{ Н·м}; \quad \delta = 0,001 l_1; \quad \frac{\Delta P}{P_{\min}} = 50\%;$$

$$[\sigma] = 160 \text{ МПа}; \quad E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad G = 0,6 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

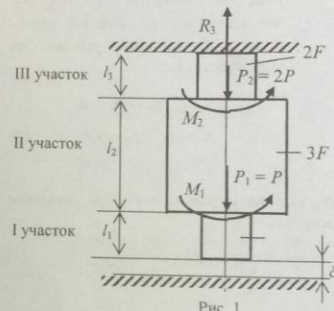


Рис. 1

Расчетная схема изображена на рис.1. Требуется определить d_1, d_2, d_3 – диаметры участков стержня.

I. Расчет статически определимой системы на одноосное растяжение (сжатие).

Обозначим на рис.1 реакцию в верхней опоре через R_3 . Предполагаем, что при приложении продольных нагрузок P_1, P_2 зазор не закрывается. При этих условиях задача является статически определимой (рис.2).

Построим эпюры продольных усилий и напряжений в величинах P и $\frac{P}{F}$, соответственно (рис.3).

Составим уравнение для определения удлинения стержня.

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3, \quad (4)$$

где $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$ – удлинения участков I, II, III; Δl – полное удлинение стержня. По закону Гука удлинения равны:

$$\Delta l_1 = \frac{N_1 l_1}{E F_1}; \quad \Delta l_2 = \frac{N_2 l_2}{E F_2}; \quad \Delta l_3 = \frac{N_3 l_3}{E F_3}.$$

Тогда

$$\Delta l = \frac{N_1 l_1}{E F_1} + \frac{N_2 l_2}{E F_2} + \frac{N_3 l_3}{E F_3}. \quad (5)$$

Подставляя в (5) значения $N_1, N_2, N_3, F_1, F_2, F_3$, получим

$$\Delta l = \frac{P l_2}{E \cdot 3F} + \frac{3P l_3}{E \cdot 2F} = \frac{P(2l_2 + 9l_3)}{6EF}. \quad (6)$$

Из условия закрытия зазора можно записать:

$$\Delta l = \delta \cdot l_1 \quad \text{или} \quad \frac{P_{\min}(2l_2 + 9l_3)}{6EF} = \delta \cdot l_1, \quad (7)$$

которое можно переписать в следующем виде:

$$P_{\min} = \frac{6EF\delta}{\left(2\frac{l_2}{l_1} + 9\frac{l_3}{l_1}\right)}, \quad (8)$$

где P_{\min} – минимальное значение продольной силы, при которой закрывается зазор.

Определим значение площади F из условия прочности в наиболее нагруженном участке III:

$$\sigma_3 = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{F} \leq [\sigma]$$

Отсюда: $F \geq \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{[\sigma]} = \frac{3}{2} \cdot \frac{10^4}{160 \cdot 10^6} = 0,94 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$

$$F_1 = F = 0,94 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad F_2 = 2,82 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad F_3 = 1,88 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Тогда из (8) получим для P_{\min} :

$$P_{\min} = \frac{6 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 0,94 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-3}}{(2 \cdot 1 + 9 \cdot 1)} \cong 1,025 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Выберем для величины продольной нагрузки $\frac{P}{P_{\min}} = 1,5.$

Определяем величину P :

$$P = 1,5 \cdot P_{\min} \cong 1,5 \cdot 10^4 \text{ Н.} \quad (9)$$

Новое значение $P_1 = P = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Н.}$

II. Расчет статически неопределимой системы на одноосное растяжение (сжатие).

Принимаем следующую расчетную схему при условии закрытого зазора (рис.4). Записываем уравнения равновесия для стержня:

$$R_1 + R_2 - P_1 - P_2 = 0$$

или

$$R_1 + R_2 = P_1 + P_2 = 3P, \quad (10)$$

где P определяется из выражения (9).

Степень статической неопределимости системы равна единице.

Составляем уравнение совместности деформаций. Для этого определим продольные усилия на участках, используя метод сечений:

8

$$R_1 = \frac{1,5 \cdot 10^4 \left(2 \frac{l_2}{l_1} + 9 \frac{l_3}{l_1} \right) - 6\delta \cdot E \cdot F}{\left(6 + 2 \frac{l_2}{l_1} + 3 \frac{l_3}{l_1} \right)}. \quad (14)$$

Подставляя численные данные в (14), получим:

$$R_1 = \frac{1,5 \cdot 10^4 (2 \cdot 1 + 9 \cdot 1) - 6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot F}{(6 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 1)} = 1,5 \cdot 10^4 - 1,1 \cdot 10^8 F. \quad (15)$$

Продольные усилия на участках равны:

$$N_1 = -R_1 = -(1,5 \cdot 10^4 - 1,1 \cdot 10^8 F);$$

$$N_2 = P - R_1 = 1,5 \cdot 10^4 - (1,5 \cdot 10^4 - 1,1 \cdot 10^8 F) = 1,1 \cdot 10^8 F; \quad (16)$$

$$N_3 = 3P - R_1 = 4,5 \cdot 10^4 - (1,5 \cdot 10^4 - 1,1 \cdot 10^8 F) = 3 \cdot 10^4 + 1,1 \cdot 10^8 F.$$

Продольные напряжения на участках определим из выражений:

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{F_1} = -\frac{1,5 \cdot 10^4}{F} + 1,1 \cdot 10^8 \text{ Па;}$$

$$\sigma_2 = \frac{N_2}{F_2} = \frac{1,1 \cdot 10^8 \cdot F}{3F} = 0,37 \cdot 10^8 \text{ Па;} \quad (17)$$

$$\sigma_3 = \frac{N_3}{F_3} = \frac{3 \cdot 10^4}{2F} + \frac{1,1 \cdot 10^8}{2} = \frac{1,5 \cdot 10^4}{F} + 0,55 \cdot 10^8 \text{ Па.}$$

Запишем условия прочности для каждого из участков:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\leq [\sigma] & \frac{1,5 \cdot 10^4}{F} - 1,1 \cdot 10^8 &\leq [\sigma] \\ \sigma_2 &\leq [\sigma] & 0,37 \cdot 10^8 &\leq [\sigma] \\ \sigma_3 &\leq [\sigma] & \frac{1,5 \cdot 10^4}{F} + 0,55 \cdot 10^8 &\leq [\sigma] \end{aligned} \quad (18)$$

Из первого условия системы (18) получим:

10

$$N_1 = -R_1; \quad N_2 = P - R_1; \quad N_3 = P_1 + P_2 - R_1 = 3P - R_1. \quad (11)$$

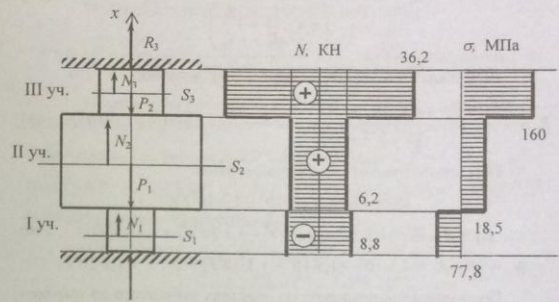


Рис.4

Подставим $N_1 - N_3$ из (11) в уравнение (5)

$$\Delta l = -\frac{R_1 l_1}{E \cdot F} + \frac{(P - R_1) l_2}{E \cdot 3F} + \frac{(3P - R_1) l_3}{E \cdot 2F}$$

и приравняем его величине зазора:

$$-\frac{R_1 l_1}{E \cdot F} + \frac{(P - R_1) l_2}{E \cdot 3F} + \frac{(3P - R_1) l_3}{E \cdot 2F} = \delta \cdot l_1. \quad (12)$$

Тогда для R_1 получим следующее выражение, преобразовав (12):

$$R_1 = \frac{P \left(2 \frac{l_2}{l_1} + 9 \frac{l_3}{l_1} \right) - 6\delta \cdot E \cdot F}{\left(6 + 2 \frac{l_2}{l_1} + 3 \frac{l_3}{l_1} \right)}. \quad (13)$$

Подставив в (13) значение P из (9), находим окончательно:

9

$$F \geq \frac{1,5 \cdot 10^4}{[\sigma] + 1,1 \cdot 10^8} = \frac{1,5 \cdot 10^4}{160 \cdot 10^6 + 1,1 \cdot 10^8} = \frac{1,5 \cdot 10^4}{2,7 \cdot 10^8} = 0,56 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Из третьего условия аналогично получим:

$$F \geq \frac{1,5 \cdot 10^4}{[\sigma] - 0,55 \cdot 10^8} = \frac{1,5 \cdot 10^4}{160 \cdot 10^6 - 0,55 \cdot 10^8} = \frac{10^4}{1,05 \cdot 10^8} \cong 1,43 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Напряжение на втором участке от величины площади его сечения не зависит и по величине меньше предельно допустимого.

Окончательно выбираем для F значение, равное $F = 1,43 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$

Тогда $F_1 = F = 1,43 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad F_2 = 3F \cong 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad F_3 = 2,46 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$

Определим величину реакции R_1 :

$$\begin{aligned} R_1 &= 1,5 \cdot 10^4 - 1,1 \cdot 10^8 F = 1,5 \cdot 10^4 - 1,1 \cdot 10^8 \cdot 1,43 \cdot 10^{-4} = \\ &= (1,5 - 1,573) \cdot 10^4 = -0,073 \cdot 10^4 \text{ Н.} \end{aligned}$$

т.е. при полученном значении площади F направление реакции R_1 соответствует растяжению первого участка, т.е. стержень является статически неопределимым. Зазор остается открытым.

Чтобы задача была статически неопределимой, необходимо уменьшить величину зазора.

Примем новое значение его равным $\delta_1 = 0,5\delta$. Тогда используем формулы (15 - 18), получим

$$R_1 = 1,5 \cdot 10^4 - 0,55 \cdot 10^8 \cdot F. \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= -(1,5 \cdot 10^4 - 0,55 \cdot 10^8 F); \\ N_2 &= 0,55 \cdot 10^8 F; \\ N_3 &= 3 \cdot 10^4 + 0,55 \cdot 10^8 F. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= -\frac{1,5 \cdot 10^4}{F} + 0,55 \cdot 10^8 \text{ Па;} \\ \sigma_2 &= 0,185 \cdot 10^8 \text{ Па;} \\ \sigma_3 &= \frac{1,5 \cdot 10^4}{F} + 0,275 \cdot 10^8 \text{ Па.} \end{aligned} \right\} (17)$$

$$\frac{1,5 \cdot 10^4}{F} - 0,55 \cdot 10^8 \leq [\sigma] \quad F \geq \frac{1,5 \cdot 10^4}{(1,6 + 0,55) \cdot 10^8} = 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, (18)$$

$$18,5 \cdot 10^6 < 160 \cdot 10^6$$

$$\frac{1,5 \cdot 10^4}{F} + 0,275 \cdot 10^8 \leq [\sigma] \quad F \geq \frac{1,5 \cdot 10^4}{(1,6 - 0,275) \cdot 10^8} = 1,132 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Выбираем значение $F_1 = 1,132 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;

Тогда $F_2 = 3F = 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $F_3 = 2F = 2,27 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;

Реакция R_1 равна

$$R_1 = 1,5 \cdot 10^4 - 0,55 \cdot 10^8 \cdot 1,132 \cdot 10^{-4} \cong 0,88 \cdot 10^4 \text{ Н} = 8,8 \text{ кН.}$$

Продольные усилия:

$$N_1 = -R_1 = -8,8 \text{ кН};$$

$$N_2 = P_1 - R_1 = 15 - 8,8 = 6,2 \text{ кН};$$

$$N_3 = 3P - R_1 = 45 - 8,8 = 36,2 \text{ кН.}$$

Напряжения на участках:

$$\sigma_1 = -\frac{8,8 \cdot 10^3}{1,132 \cdot 10^{-4}} = -77,8 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2 = 18,5 \text{ МПа};$$

$$\sigma_3 = \frac{36,2 \cdot 10^3}{2,27 \cdot 10^{-4}} = 159,5 \cong 160 \text{ МПа.}$$

Эпюры $N_1 - N_3$, $\sigma_1 - \sigma_3$ построены на рис.4.

12

Выпишем выражения для углов закручивания

$$\varphi_1 = \frac{M_1 \cdot l_1}{G \cdot J_1}; \quad \varphi_2 = \frac{M_2 \cdot l_2}{G \cdot J_2}; \quad \varphi_3 = \frac{M_3 \cdot l_3}{G \cdot J_3}, (22)$$

где M_1, M_2, M_3 - внутренние крутящие моменты на участках, J_1, J_2, J_3 - полярные моменты инерции поперечных сечений участков стержня.

Методом сечений определяем M_1, M_2, M_3 :

$$M_1 = -M_{R1}; \quad M_2 = -M_1 - M_{R2} = -M_{R1};$$

$$M_3 = -M_1 - M_{R1} - M_2 = -M_{R1} - M_2. (23)$$

Подставим (22) и (23) в (21):

$$\frac{M_{R1} \cdot l_1}{G \cdot J_1} - \frac{M_{R1} \cdot l_2}{G \cdot J_2} - \frac{(M_{R1} + M_2) \cdot l_3}{G \cdot J_3} = 0; (24)$$

т.к. $F_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$; $F_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$; $F_3 = \frac{\pi d_3^2}{4}$; и учитывая, что

$$K_1 = \frac{F_1}{F_2} = 1; \quad K_2 = \frac{F_2}{F_1} = \frac{\pi d_2^2}{4} \cdot \frac{4}{\pi d_1^2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}; \quad K_3 = \frac{d_3^2}{d_1^2},$$

получим для отношений полярных моментов инерции:

$$\bar{K}_1 = \frac{J_1}{J_1} = 1; \quad \bar{K}_2 = \frac{J_2}{J_1} = \frac{\pi d_2^4}{32} \cdot \frac{32}{\pi d_1^4} = \frac{d_2^4}{d_1^4} = K_2^2; \quad \bar{K}_3 = \frac{J_3}{J_1} = \frac{d_3^4}{d_1^4} = K_3^2.$$

Преобразуем выражение (24):

III. Расчет статически неопределимого ступенчатого стержня на кручение.

Расчетная схема изображена на рис.5.

Из таблицы вариантов заданий выписываем численные значения:

$$l_1 = l_2 = l_3 = 1 \text{ м}; \quad K_1 = 1; \quad K_2 = 3; \quad K_3 = 2; \quad M_1 = 0; \quad M_2 = 1000 \text{ Н·м.}$$

Профиль сечения - круг. Считаем, что под действием продольной нагрузки зазор полностью закрыт так, что в точке $x = 0$ нижний торец жестко закреплен, т.е.:

$$\varphi|_{x=0} = 0, \quad \text{где } \varphi - \text{угол закручивания.}$$

Обозначим реактивные моменты в заделках через M_{R1} и M_{R3} .

Тогда уравнение равновесия для стержня запишется в виде:

$$M_{R1} + M_{R3} + M_2 + M_1 = 0 (19)$$

или подставляя значения M_1 и M_2 :

$$M_{R1} + M_{R3} = -M_2 = -1000 \text{ Н·м.} (20)$$

Задача один раз статически неопределима.

Для ее решения составляем уравнение совместности деформаций

$$\varphi|_{x=l} = 0, \quad l = l_1 + l_2 + l_3,$$

которое можно представить в виде суммы углов закручивания по участкам

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0. (21)$$

13

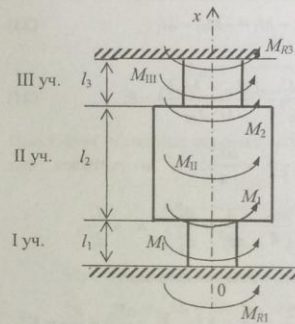


Рис. 5

$$-\frac{1}{G \cdot J_1} \left[M_{R1} (l_1) + M_{R1} \frac{l_2}{\left(\frac{J_2}{J_1}\right)} + (M_{R1} + M_2) \frac{l_3}{\left(\frac{J_3}{J_1}\right)} \right] = 0$$

$$= -\frac{1}{G \cdot J_1} \left[M_{R1} \cdot l_1 + M_{R1} \frac{l_2}{K_2^2} + (M_{R1} + M_2) \frac{l_3}{K_3^2} \right] = 0. (25)$$

Из (25) для реактивного момента M_{R1} окончательно находим:

$$M_{R1} = -\frac{M_2 \frac{l_3}{K_3^2}}{l_1 + \frac{l_2}{K_2^2} + \frac{l_3}{K_3^2}}. (26)$$

Подставляя численные значения, находим:

$$M_{R1} = -\frac{1000 \cdot \frac{1}{4}}{1 + \frac{1}{9} + \frac{1}{4}} \cong -184 \text{ Н·м.}$$

Из (20) находим значение реактивного момента M_{R3} :

$$M_{R3} = -M_2 - M_{R1} = -1000 + 184 = -816 \text{ Н·м.}$$

Построим эпюры крутящих моментов (рис.6).

Находим наибольшее значение крутящего момента

на опасном участке:

$$M_{\max} = 816 \text{ Н·м.}$$

Производим расчет на прочность на кручение опасного участка:

$$\tau_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_p} \leq [\tau] (27)$$

15

где W_p – полярный момент сопротивления сечения; $[\tau]$ – допустимое напряжение на срез. Выберем $[\tau] = 0,5[\sigma] = 80$ МПа.

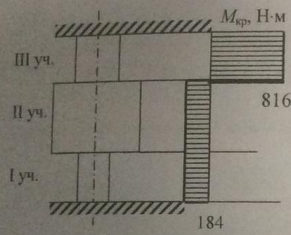


Рис. 6

Тогда из (27) получим:

$$W_p \geq \frac{M_{\max}}{[\tau]} = \frac{816}{80 \cdot 10^6} = 10,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Учитывая, что $W_p = \frac{\pi d_3^3}{16}$,

для d_3 получим:

$$d_3 \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot W_p}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 10,2 \cdot 10^{-6}}{3,14}} = 3,73 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Тогда

$$F_3 = \frac{\pi d_3^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (3,8 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 10,92 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$F_1 = \frac{F_3}{K_1} = \frac{10,92 \cdot 10^{-4}}{2} = 5,46 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$F_2 = F_1 \cdot K_2 = 5,46 \cdot 10^{-4} \cdot 3 = 16,38 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Сравнивая со значениями F_1, F_2, F_3 , полученными из расчета на одноосное напряженное состояние (п. I, II), видим, что наибольшие их значения получаются для режима кручения.

IV. Расчет на совместное нагружение продольными усилиями и крутящим моментом.

$$1024 \cdot 816^2 \cdot y^3 + 16 \cdot (3,62 \cdot 10^4)^2 \cdot y^2 = (160 \cdot 10^6)^2 \cdot (3,14)^2,$$

которое приводится к следующему виду:

$$0,68y^3 + 20,96y^2 = 2,51 \cdot 10^8. \quad (33)$$

Уравнение (33) решается численно.

Вместо уравнения (33) из (30) можно получить аналогичное уравнение относительно площади F_3 .

$$\text{Т.к. } W_p = \frac{\pi d_3^3}{16} = \frac{\pi d_3^2}{4} \cdot \frac{d_3}{4} = \frac{F_3 d_3}{4},$$

то, преобразуя (30) получим

$$F_3^3 [\sigma]^2 - F_3 N_{\max}^2 - 16\pi M_{\max}^2 = 0, \quad (34)$$

или

$$F_3^3 \cdot 2,56 \cdot 10^{16} - F_3 \cdot 13,13 \cdot 10^8 - 0,34 \cdot 10^8 = 0,$$

откуда

$$F_3^3 \cdot 2,56 \cdot 10^8 - F_3 \cdot 13,13 - 0,34 = 0.$$

Для повышения точности счета на компьютере рекомендуется сделать замену переменных в уравнении (34).

$$\bar{F}_3 = 10^4 \cdot F_3 \text{ или } F_3 = 10^{-4} \cdot \bar{F}_3.$$

Уравнение (34) при этой замене примет вид:

$$2,56 \cdot 10^{-4} \bar{F}_3^3 - 13,13 \cdot 10^{-4} \bar{F}_3 - 0,34 = 0. \quad (35)$$

Решая (35), получаем $\bar{F}_3 \approx 11,2 \text{ м}^2$; тогда $F_3 = 11,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Соответственно, площади поперечного сечения первого участка

$$F_1 = \frac{F_3}{2} = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \text{ второго участка } F_2 = 3F_1 = 16,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

В этом случае расчет на прочность производится по одной из теорий прочности. Выберем в качестве расчетной третью теорию прочности:

$$\sigma_{III} = \sqrt{\sigma_N^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma], \quad (28)$$

где σ_N – нормальные напряжения, вызванные продольной нагрузкой, τ – касательные напряжения, определяемые кручением. Подставляя в (28)

$$\sigma_N = \frac{N_{\max}}{F}; \quad \tau = \frac{M_{\max}}{W_p}$$

получим условие прочности применительно к рассматриваемому случаю:

$$\sqrt{\left(\frac{N_{\max}}{F}\right)^2 + 4\left(\frac{M_{\max}}{W_p}\right)^2} \leq [\sigma], \quad (29)$$

или через диаметр стержня

$$\sqrt{\frac{16N_{\max}^2}{\pi^2 d_3^4} + 4 \frac{256M_{\max}^2}{\pi^2 d_3^6}} \leq [\sigma] \quad (30)$$

Преобразуя (30), получим для d уравнение:

$$16N_{\max}^2 \cdot \frac{1}{d_3^4} + 1024M_{\max}^2 \cdot \frac{1}{d_3^6} = [\sigma]^2 \pi^2. \quad (31)$$

Обозначая $\frac{1}{d_3^2} = y$, приводим (31) к виду:

$$1024M_{\max}^2 \cdot y^3 + 16N_{\max}^2 \cdot y^2 = [\sigma]^2 \pi^2. \quad (32)$$

В нашем случае $N_{\max} = 3,62 \cdot 10^4 \text{ Н}$ (III участок), $M_{\max} = 816 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (III участок, см. рис.4). Подставляя эти значения в (32), получаем уравнение:

Результаты расчетов по п. I, II, III, IV сводятся в таблицу 1.

Таблица 1

Площадь поперечного сечения	Вид расчета			
	Статически определяемая система (осевая нагрузка)	Статически неопределимая система (осевая нагрузка)	Статически неопределимая система (кручение)	Статически неопределимая система (сложное сопротивление)
$\bar{F}_1 \cdot 10^4, \text{ м}$	0,94	1,132	5,46	5,6
$\bar{F}_2 \cdot 10^4, \text{ м}$	2,82	3,4	16,38	16,8
$\bar{F}_3 \cdot 10^4, \text{ м}$	1,88	2,27	10,92	11,2

V. Варианты заданий.

1. Расчетные схемы.

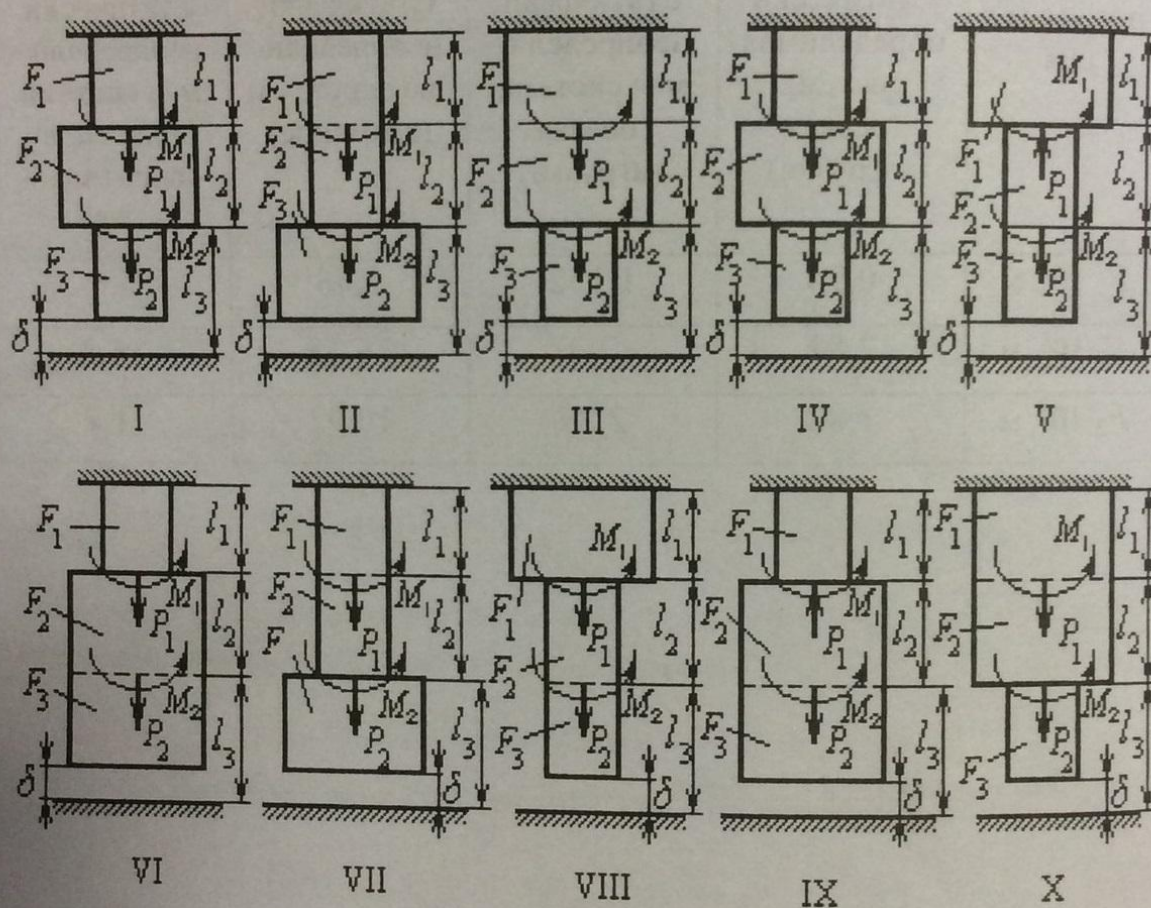


Рис. 7

2. Численные значения данных в вариантах заданий

№ варианта	№ чертежа	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	$K_1 = F_1/F$	$K_2 = F_2/F$	$K_3 = F_3/F$	$P_1 \cdot 10^{-4}$ Н	P_2/P_1	P/P_{\min}	M_1 кН·м	M_2 кН·м	$\delta/l_1 \cdot 10^{-4}$
1	I	1	1	1	1	2	1	2	1,5	1,2	5	0	5
2	II	1	2	1	1	1	3	3	1,6	1,3	2	1	6
3	III	1	1,5	1	2	2	1	-4	-2,5	1,3	1	2	8
4	IV	2	1	2	1	3	1	-2	-4	1,2	-3	2	10
5	V	2	2	1,5	2	1	1	4	0,5	1,4	2	-4	50
6	VI	1	1,5	1,5	1	4	4	3	1,4	1,3	2	2	5
7	VII	1	1	2	1	1	3	5	0,8	1,5	4	-3	10
8	VIII	1,5	1,5	1	2	1	1	-1	-4	1,3	-2	1	50
9	IX	1	2	1	1	3	3	1	6	1,25	3	2	10
10	X	1	1	2	3	3	1	4	0,5	1,2	1	1	5
11	I	1,5	1,5	2	1	3	1	3	1,4	1,3	2	1	6
12	II	1	1,5	2	1	1	2	5	0,6	1,2	-2	1	8
13	III	1	2	1,5	2	2	1	7	0,7	1,4	-2	0	10
14	IV	2	1	1	1	2	1	-3	-2,5	1,3	0	3	5
15	V	2	1	1	3	1	1	4	1	1,3	2	1	10

Окончание таблицы 2

№ варианта	№ чертежа	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	$K_1 = F_1/F$	$K_2 = F_2/F$	$K_3 = F_3/F$	$P_1 \cdot 10^{-4}$ Н	P_2/P_1	P/P_{\min}	M_1 кН·м	M_2 кН·м	$\delta/l_1 \cdot 10^{-4}$
16	VI	1,5	1,5	1,5	1	3	3	-2	-7,5	1,4	1	2	10
17	VII	2	1	1	1	1	2	2	2,5	1,3	3	-2	5
18	VIII	1	1	1,5	3	1	1	-3	-2,4	1,2	4	-3	5
19	IX	1	2	2	1	4	4	1	4	1,2	3	-2	5
20	X	2	1	1	2	2	1	3	1,5	1,3	2	2	10
21	I	2	2	1	1	4	1	-1	-5	1,4	1	1	8
22	II	1,5	2	1,5	1	1	4	2	2	1,3	2	-1	8
23	III	1	2	1,5	3	3	1	-3	-3	1,2	3	2	6
24	IV	2	1	1,5	1	2	1	4	0,75	1,4	2	0	6
25	V	1,5	2	1	2	1	1	4	2,75	1,3	0	2	10
26	VI	1	2,5	1	1	2	2	3	1,25	1,4	3	-1	6
27	VII	2	2	1	1	1	3	-2	-3	1,2	-3	2	10
28	VIII	1	2	2	2	1	1	6	0,3	1,4	3	-2	5
29	IX	2	1,5	1,5	1	2	2	2	2,5	1,3	2	-3	5
30	X	1,5	1,5	2	2	2	1	4	1,25	1,5	1	-2	10