где $y_c$ — глубина погружения нижнего конца стрингера, считая от поверхности воды (см. рис. 12.18),

$$y_c = (\cos\alpha - \cos\theta_c)\,\rho_c. \qquad (12.31)$$

Из формулы (12.23) видно, что критерий, характеризующий длину стрингера, зависит от углов $\alpha$ и $\theta_c$

$$\frac{l}{\rho_c} = \theta_c - \alpha. \qquad (12.32)$$

Учитывая сказанное, для решения задачи необходимо установить зависимости между следующими критериями:

$$\frac{l}{\rho_c} = f\left(\frac{H}{ph}, \frac{EI}{p\rho^3}, \frac{h}{\rho}\right). \qquad (12.33)$$

Условие плоского равновесия элемента трубопровода длиной $ds$ можно представить в виде

$$\frac{dT}{ds} = p\sin\theta + \frac{QM}{EI}; \qquad (12.34)$$

$$\frac{dQ}{ds} = -p\cos\theta - \frac{TM}{EI}; \qquad (12.35)$$

$$\frac{dM}{ds} = -Q; \qquad (12.36)$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{M}{EI} = \frac{1}{\rho}, \qquad (12.37)$$

где $T$ — осевое усилие в трубопроводе; $Q$ — поперечная перерезывающая сила; $M$ — изгибающий момент; $\theta$ — угол наклона трубопровода.

Уравнения (12.34)—(12.37) являются математической моделью укладки трубопровода. На выпуклом участке трубопровод опирается на стрингер, и деформации их одинаковы. Поэтому максимальный изгибающий момент в трубопроводе здесь известен, поскольку кривизной стрингера задаются.

Решение уравнений (12.34)—(12.37) при заданных граничных условиях в точке касания трубопровода с грунтом ($s=0$) позволяет определить параметры точки перегиба трубопровода, а затем и искомые параметры стрингера по формулам (12.30) и (12.31).

При укладке глубоководных трубопроводов поперечные перерезывающие силы $Q$ малы по сравнению с силами натяжения трубопровода $T$, поэтому в точке перегиба (у нижнего конца стрингера) продольную силу можно принять равной

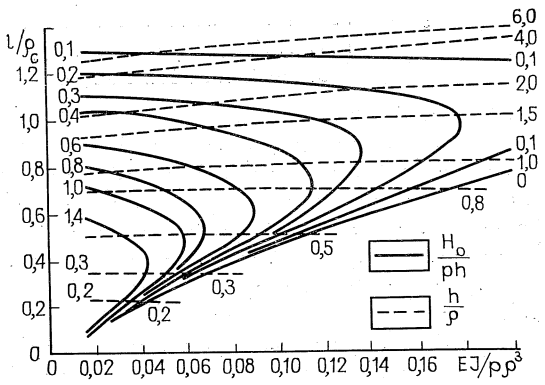
$$T_c = H_0 + ph_c,$$

а у верхнего конца стрингера

$$T = H_0 + ph. \qquad (12.38)$$



РИС. 12.24.
Графики зависимости безразмерных параметров для расчета длины стрингера при $\frac{\rho_c}{\rho} = 0{,}75$




Уравнения (12.34)—(12.37) для различных значений критериев, входящих в (12.33), были решены с помощью ЭВМ. Результаты расчетов представлены на рис. 12.21—12.24.

**Пример.** Определить необходимую длину стрингера и натяжение трубопровода $D=529$ мм с толщиной стенки 20 мм, укладываемого на глубину $h=420$ м. Отрицательная плавучесть трубопровода $p=60$ кгс/м, $EI=2{,}1798\times10^{11}$ кгс/см². Допустимый радиус кривизны трубопровода на вогнутом участке $\rho=210$ м, на стрингере $\rho_c=157{,}5$ м, что соответствует напряжениям $\sigma=2640$ кгс/см² на вогнутом участке и $\sigma_c=3520$ кгс/см² на стрингере.

Критерий, учитывающий глубину морского дна и жесткость трубопровода, определяются по формуле

$$\frac{h}{\rho} = \frac{420}{210} = 2; \qquad \frac{EI}{p\rho^3} = \frac{2{,}1798\cdot10^{11}}{0{,}6\cdot21\,000^3} = 0{,}0392.$$

По графикам рис. 12.21 для $h/\rho=2$ находим $l/\rho_c=1$, т. е. минимальная длина стрингера $l=\rho_c=157{,}5$ м.

По графикам рис. 12.22 для $l/\rho_c=1$ определяем $H_0/ph=0{,}41$ отсюда минимальное натяжение трубопровода на морском дне

$$H_0 = 0{,}41ph = 0{,}41\cdot60\cdot420 = 10\,332 \text{ кгс}.$$

Необходимое минимальное натяжение трубопровода на трубоукладочной барже определяется по (12.38)

$$T = 10\,332 + 60\cdot420 = 35\,532 \text{ кгс}.$$

По графикам рис. 12.23 для $l/\rho_c=1$ находим критерий стрингера $q/p=3{,}8$. Необходимая положительная плавучесть стрингера равна $q=3{,}8\cdot60=228$ кгс/м.