Пример. Определить число, грузоподъемность и расстановку поддерживающих устройств для подъема трубопровода со дна водоема глубиной $h=20$ м при следующих данных: $D=529\times10$ мм, $q_1=1{,}756$ кгс/см, $p=1{,}202$ кгс/см, $EI=10{,}9318\cdot10^{10}$ кгс·см^2, $W=2066$ см^3, $\sigma_{max}=2440$ кгс/см^2.

Определяем значения $\omega=p+q_1=2{,}958$ кгс/см, $p/\omega_1=0{,}4064$ и по формуле (11.98) $R=3{,}4812\cdot10^3$ кгс.

Вычисляем значение k по формуле (11.96), $\bar{h}$ по формуле (11.104) и $\bar{Q}$ по формуле (11.103).

$$k=8{,}4971\cdot10^{-4}\,\frac{1}{\text{см}},\qquad \bar{h}=\frac{(h-D)\,k^4EI}{\omega_1}=37{,}5,$$

$$\bar{Q}=2\sqrt{2}=2{,}828.$$

По графику рис. 11.29 при $p/\omega_1=0{,}4064$ находим $\bar{a}=6$, $\bar{b}=7$, $\bar{c}=2{,}1$, $Q_c=2{,}7$.

Определяем размерные значения расстояний и усилий в поддерживающих устройствах

$$a=\frac{\bar{a}}{k}=7060\text{ см},\qquad b=\frac{\bar{b}}{k}=8230\text{ см},$$

$$c=\frac{\bar{c}}{k}=2470\text{ см},\qquad Q=\frac{\bar{Q}\omega_1}{k}=9850\text{ кгс},$$

$$Q_c=\frac{\omega_1\bar{Q}_c}{k}=9400\text{ кгс}.$$

Определяем число поддерживающих устройств

$$m_1=n_b+1.$$

По графику (рис. 11.30) при $p/\omega_1=0{,}4064$ и $\bar{h}=37{,}5$ находим $n_b>0$, принимаем $n_b=1$, тогда $m_1=2$.

Длина поднимаемого участка трубопровода будет

$$l=L+c=a+bn_b+c=177{,}6\text{ м}$$

§ 11.8. РАСЧЕТ УКЛАДКИ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ОПОРНЫХ УСТРОЙСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАТЯЖЕНИЯ

Как уже отмечалось в § 11.6, применение натяжения позволяет значительно увеличить глубину укладки погружаемых с поверхности воды трубопроводов. Значительное увеличение допустимой глубины укладки подводных трубопроводов, погружаемых с опорных устройств, можно также достичь с применением натяжения. Ниже приводятся расчеты допустимой глубины погружения трубопроводов, укладываемых с натяжением для некоторых технологических схем.

1. *Укладка трубопровода с баржи, оборудованной прямолинейным наклонным стрингером.*

Расчетная схема соответствует схеме, представленной на рис. 11.25 с добавлением растягивающего усилия H.

Считая дно водоема в точке касания с трубопроводом горизонтальным и изгибающий момент равным нулю, уравнения для прогиба трубопровода и его производных примут вид:

$$y=\frac{R}{nH}(\operatorname{sh}nx-nx)+\frac{p}{H}\left(\frac{x^2}{2}+\frac{1-\operatorname{ch}nx}{n^2}\right);\qquad(11.105)$$

$$y^{\mathrm{I}}=\frac{R}{H}(\operatorname{ch}nx-1)+\frac{p}{H}\left(x-\frac{\operatorname{sh}nx}{n}\right);\qquad(11.106)$$

$$y^{\mathrm{II}}=\frac{Rn}{H}\operatorname{sh}nx+\frac{p}{H}(1-\operatorname{ch}nx);\qquad(11.107)$$

$$y^{\mathrm{III}}=\frac{Rn^2}{H}\operatorname{ch}nx-\frac{pn}{H}\operatorname{sh}nx,\qquad(11.108)$$

где $n^2=H/EI$.

Учитывая, что в точке касания трубопровода и прямолинейного стрингера $x=l$, $y_l^{\mathrm{II}}=0$, из уравнения (11.107) получаем значение опорной реакции

$$R=\frac{p}{n}\operatorname{th}\frac{\bar{l}}{2},\qquad(11.109)$$

где $\bar{l}=nl$.

Подставляя зависимость (11.109) в выражение (11.105) и приравнивая $x=l$, находим безразмерную глубину $\bar{h}$ укладки трубопровода (расстояние от дна водоема до точки касания трубопровода и стрингера):

$$\bar{h}=\frac{hH^2}{pEI}=\bar{l}\left(\frac{\bar{l}}{2}-\operatorname{th}\frac{\bar{l}}{2}\right).\qquad(11.110)$$

Приравнивая $y^{\mathrm{III}}=0$, получаем из уравнения (11.108), что максимальный изгибающий момент будет в сечении x, определяемый из условия

$$\operatorname{th}nx=\frac{Rn}{p}.\qquad(11.111)$$

Подставляя зависимости (11.111) и (11.109) в уравнение (11.107), получаем максимальное безразмерное напряжение в трубопроводе

$$\bar{\sigma}=\frac{\sigma Wn^2}{p}=\operatorname{th}\frac{\bar{l}}{2}\cdot\operatorname{th}\frac{\bar{l}}{4}.\qquad(11.112)$$

Объединяя зависимости (11.110) и (11.112), получаем

$$\frac{\bar{h}}{\bar{\sigma}^2}=\frac{hpEI}{(\sigma W)^2}=f(\bar{l}).\qquad(11.113)$$

Графики зависимостей $\bar{h}$ и $f(\bar{l})$ от $\bar{l}$ показаны на рис. 11.31.