напряженного состояния глубины укладки и длины погружаемого участка подводного трубопровода необходимо использовать вторую расчетную схему, поскольку она лучше соответствует действительным условиям по сравнению с первой.

§ 11.3. РАСЧЕТ УКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДА СПОСОБОМ СВОБОДНОГО ПОГРУЖЕНИЯ В НАЧАЛЬНЫЙ И КОНЕЧНЫЙ ЭТАПЫ ПОГРУЖЕНИЯ

1. Начальный этап погружения.

При строительстве подводных переходов значительной протяженности и морских трубопроводов иногда возникает необходимость погрузить на дно водоема плеть трубопровода, находящуюся на плаву.

В начальной стадии погружения заливом воды или отстропкой понтонов трубопровод испытывает консольный изгиб (рис. 11.16, *а*). В этом случае наибольшие напряжения возникают, когда погружаемый конец трубопровода приближается ко дну водоема. Расчетная схема консольного изгиба трубопровода представлена на рис. 11.16, *б*, отличие ее от ранее рассмотренной в § 11.2 расчетной схемы по форме S-образной кривой заключается лишь в граничных условиях для конца трубопровода, находящегося вблизи дна водоема.

Располагая оси координат, как показано на рис. 11.16, *б*, и принимая граничные условия для конца трубопровода, расположенного вблизи дна, $x=c$ $y^{II}=0$ и $y^{III}=0$, получаем по методу начальных параметров следующие зависимости для прогиба, изгибающего момента и поперечной силы:

$$EIh=-EIy_0'c-\frac{M_0c^2}{2}-\frac{Q_0c^3}{6}+\frac{qc^4}{24}-\frac{\omega a^4}{24}; \tag{11.17}$$

$$-M_0-Q_0c+\frac{qc^2}{2}-\frac{\omega a^2}{2}=0; \tag{11.18}$$

$$-Q_0+qc-\omega a=0. \tag{11.19}$$

Значения начальных параметров y_0' и M_0 с учетом упругой податливости плавающего участка трубопровода определяют по формулам (11.10).

Выражения (11.18) и (11.19) представим в безразмерных параметрах

$$\bar{a}^2-2\bar{a}(\bar{c}+1)+m(\bar{c}+1)^2=0; \tag{11.20}$$

$$\bar{Q}_0=m\bar{c}-\bar{a}. \tag{11.21}$$

Максимальные напряжения в трубопроводе на участке b равны

$$\bar{\sigma}_b=\frac{\bar{Q}_0^2}{m}+2\bar{Q}_0+m. \tag{11.22}$$

Подставляя выражение (11.21) в (11.22), получаем

$$\bar{a}^2-2m\bar{a}(\bar{c}+1)+m^2(\bar{c}+1)^2+m\bar{\sigma}_b=0. \tag{11.23}$$

Решая совместно уравнения (11.20) и (11.23), получаем безразмерные длины погруженного участка трубопровода $\bar{c}$ и участка $\bar{a}$ с отрицательной плавучестью в виде

$$\bar{c}=\sqrt{\frac{m\bar{\sigma}_b}{(1-m)[2(1-\sqrt{1-m}-m]}}-1; \tag{11.24}$$

$$\bar{a}=(1-\sqrt{1-m})\sqrt{\frac{m\bar{\sigma}_b}{(1-m)[2(1-\sqrt{1-m}-m]}}. \tag{11.25}$$

Подставив в уравнение (11.17) значения начальных параметров по формуле (11.10), приведя его к безразмерному виду с учетом выражения (11.21), получим безразмерную глубину укладки трубопровода

$$\bar{h}=\frac{2\bar{c}}{m}\left[(m\bar{c}-\bar{a})\left(\frac{\bar{c}^2}{3}+\bar{c}+1\right)-\right.$$
$$\left.-m\left(\frac{\bar{c}^3}{12}-\frac{\bar{c}}{12}-1\right)+\frac{\bar{a}^4}{12\bar{c}}\right]. \tag{11.26}$$

Безразмерное максимальное напряжение на участке трубопровода, расположенного на плаву, находят подстановкой выражения (11.21) в формулу (11.14) для $\bar{\sigma}_п$:

$$\bar{\sigma}_п=\sqrt{m^2+2m(m\bar{c}-\bar{a})+2(m\bar{c}-\bar{a})^2}\,e^{-\operatorname{arc\,tg}\frac{\bar{a}-m\bar{c}}{m(\bar{c}-1)-\bar{a}}} \tag{11.27}$$

Если значение безразмерной поперечной силы $\bar{Q}_0$, вычисленное по формуле (11.21), положительное, то $\bar{\sigma}_b>\bar{\sigma}_п$. При $\bar{Q}_0<0$ максимальное напряжение на участке трубопровода, расположенного на плаву, превышает максимальное напряжение на участке b, т. е. $\bar{\sigma}_п>\bar{\sigma}_b$. При $\bar{Q}_0=0$ $\bar{\sigma}_b=\bar{\sigma}_п$.

Расчет допустимой глубины погружения выполняется в следующем порядке:

1) задаются допустимым значением напряжения $\sigma_д$, определяют $\bar{\sigma}_b=2\beta^2\sigma_д W/\omega$, $\beta^2=\sqrt{\frac{q}{4y_0EI}}$ и $m=q/\omega$;

2) по формулам (11.24) и (11.25) находят значения $\bar{c}$ и $\bar{a}$;

3) вычисляют $\bar{Q}_0$ по формуле (11.21). Если $\bar{Q}_0\geqslant 0$, то $\bar{\sigma}_b\geqslant\bar{\sigma}_п$ и по выражению (11.26) подстановкой вычисленных значений $\bar{c}$ и $\bar{a}$ определяют безразмерную допустимую глубину укладки трубопровода;

4) если $\bar{Q}_0<0$, то $\bar{\sigma}_b<\bar{\sigma}_п$, и расчет выполняют заново