§ 12.10. РАСЧЕТ УКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДА ПО СХЕМЕ ГИБКОЙ НИТИ

При укладке трубопроводов небольших диаметров ($D<300$ мм) на большие глубины (несколько сотен метров), когда влияние изгибной жесткости трубы мало по сравнению с влиянием осевой силы, для получения основных зависимостей можно использовать расчетную схему гибкой нити. Кроме того, представляется возможным использовать основные расчетные зависимости гибкой нити и для глубоководных трубопроводов диаметром более 300 мм на участках, где угол наклона достигает значительной величины.

Выбор для указанных выше целей уравнения гибкой нити обусловливается прежде всего тем, что основные ее параметры, в том числе и производные, выражаются простыми зависимостями в явном виде.

Если в качестве независимой переменной принять длину гибкой нити s, то основные ее параметры описываются следующими уравнениями:

$$y=\frac{H}{p}\left[\sqrt{\left(\frac{ps}{H}\right)^2+1}-1\right]; \tag{12.57}$$

$$x=\frac{H}{p}\operatorname{sh}\frac{ps}{H}; \tag{12.58}$$

$$s=\frac{H}{p}\sqrt{\frac{py}{H}\left(\frac{py}{H}-2\right)}; \tag{12.59}$$

$$\theta=\operatorname{arctg}\frac{ps}{H};$$

$$T=\frac{H}{\cos\theta}=H\sqrt{\left(\frac{ps}{H}\right)^2+1}; \tag{12.60}$$

$$M=\frac{pEI}{H\left[1+\left(\frac{ps}{H}\right)^2\right]}, \tag{12.61}$$

где x и y — соответственно абсцисса и ордината гибкой нити; H — горизонтальная составляющая осевой силы; T — осевая сила; p — распределенная сила тяжести гибкой нити; θ — угол наклона гибкой нити к оси x.

Уравнения (12.57)—(12.61) могут быть использованы в качестве исходных для решения численными методами нелинейного уравнения (12.22) и при решении задачи, приведенной в § 12.7.

Рассмотрим основные расчетные зависимости по схеме гибкой нити применительно к укладке глубоководных трубопроводов небольшого диаметра.

Уравнение гибкой нити в декартовых координатах

$$y=\frac{H}{p}\left(\operatorname{ch}\frac{p}{H}x-1\right). \tag{12.62}$$

Производные уравнения (12.62)

$$\frac{dy}{dx}=\operatorname{tg}\theta=\operatorname{sh}\frac{p}{H}x=\sqrt{\left(\frac{p}{H}y\right)^2+2\frac{p}{H}y}; \tag{12.63}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2}=\frac{p}{H}\operatorname{ch}\frac{p}{H}x. \tag{12.64}$$

В точке касания трубопровода и морского дна ($x=0$)

$$\frac{d^2y}{dx^2}=\frac{1}{\rho_0}=\frac{p}{H}, \tag{12.65}$$

зависимость (12.65) можно представить в виде

$$\frac{\rho_0}{h}=\frac{H}{ph}, \tag{12.66}$$

где h — глубина погружения трубопровода.

Радиус кривизны связан с напряжениями от изгиба трубы $\sigma_и$ зависимостью

$$\rho_0=\frac{ED_н}{2\sigma_и}, \tag{12.67}$$

где $D_н$ — наружный диаметр трубы.

Объединяя выражения (12.67) и (12.65), получаем

$$\sigma_и=\frac{pED_н}{2H}. \tag{12.68}$$

По формуле (12.68) определяем минимальное значение H, ограничивающее в трубопроводе допустимые напряжения. Напряжение в погружаемом трубопроводе можно регулировать изменением натяжения, создаваемого трубоукладочной баржей.

Поскольку $T=H/\cos\theta$ и $\operatorname{tg}\theta=dy/dx$, осевое натяжение трубопровода будет

$$T=H\sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}. \tag{12.69}$$

После подстановки значений dy/dx из (12.63) и $\operatorname{ch} px/H$ из (12.62) формула (12.69) примет вид

$$T=H+py. \tag{12.70}$$

На поверхности воды $y=h$ и из формулы (12.70) следует, что

$$\frac{T}{ph}=1+\frac{H}{ph},$$