

РИС. 11.34.
Схема укладки трубопровода, концы которого расположены на разных уровнях

На рис. 11.32 приведены графики зависимостей $\bar{h}$ и $f(\bar{l})$ от $\bar{l}$. Последовательность расчета такая же, как и в п. 1.

4. *Укладка трубопровода, концы которого поддерживаются плавучими опорами* (рис. 11.33).

Укладка трубопровода по этому способу выполняется в такой последовательности: трубопровод заводят в створ, один конец его прикрепляется тросом к анкеру, к другому его концу прикладывают расчетное тяговое усилие с помощью лебедки, установленной на берегу или барже; погружение трубопровода на дно осуществляется заливом водой, отстропкой понтонов, уменьшением числа промежуточных опор или увеличением длины тросовых подвесок у плавучих опор. Вместо плавучих опор концы трубопровода могут опираться на грунт береговых участков.

За расчетную схему укладки трубопровода принимают стержень, испытывающий продольно-поперечный изгиб. Уравнение упругой линии такого трубопровода имеет вид

$$y^{IV} - \frac{H}{EI} y^{II} + \frac{p}{EI} = 0 \qquad (11.118)$$

Общее решение уравнения (11.118)

$$y = C_1 \operatorname{ch} nx + C_2 \operatorname{sh} nx + \frac{qx^2}{2H} + C_3 x + C_4. \qquad (11.119)$$

Располагая оси координат в середине пролета, для граничных условий $x=0$, $y=0$ и $y^{I}=0$; $x=\pm l/2$, $y^{II}=0$, получаем

$$y = \frac{p}{Hn^2 \operatorname{ch}\frac{nl}{2}} (1 - \operatorname{ch} nx) + \frac{px^2}{2H}; \qquad (11.120)$$

$$y^{I} = -\frac{p}{Hn \operatorname{ch}\frac{nl}{2}} \operatorname{sh} nx + \frac{px}{H}; \qquad (11.121)$$

$$M = EI \frac{p}{H}\left(1 - \frac{\operatorname{ch} nx}{\operatorname{ch}\frac{nl}{2}}\right). \qquad (11.122)$$

При $x=l/2$ из уравнений (11.120) и (11.121) получаем максимальную глубину погружения и угол наклона конца трубопровода:

$$h = \frac{p}{Hn^2}\left[\frac{\bar{l}^2}{8} - \operatorname{th}\frac{\bar{l}}{2} \operatorname{th}\frac{\bar{l}}{4}\right];$$

$$y^{I}_{\frac{l}{2}} = \frac{p}{Hn}\left(\frac{\bar{l}}{2} - \operatorname{th}\frac{\bar{l}}{2}\right).$$

Максимальный изгибающий момент и соответствующее напряжение σ в трубопроводе определяется по формуле (11.122) при $x=0$

$$\sigma = \frac{p}{n^2 W} \operatorname{th}\frac{\bar{l}}{2} th\frac{\bar{l}}{4}. \qquad (11.123)$$

5. *Укладка трубопровода, концы которого расположены на разных уровнях* (рис. 11.34).

При опирании трубопровода на береговые участки с различными высотными отметками или опускании трубопровода с плавучих опор тросовыми подвесками различной длины основные расчетные формулы для определения напряжений и глубины укладки могут быть получены из общего решения уравнения (11.118) при следующих граничных условиях:

при $x=0$, $y=0$ и $y^{II}=0$ (11.124)

при $x=l$, $y=h_1$ и $y^{II}=0$.

Упругая линия трубы с учетом условий (11.124)

$$y = \frac{p}{Hn^2}\left[1 - \operatorname{ch} nx + \operatorname{th}\frac{nl}{2} \operatorname{sh} nx + \frac{(nx)^2}{2}\right] +$$

$$+\left(\frac{h}{l} - \frac{pl}{2H}\right)x. \qquad (11.125)$$

Абсциссу наиболее низко расположенной точки трубопровода можно получить, приравняв нулю первую производную выражения (11.125), или построением кривой непосредственно по выражению (11.125).

Максимальные напряжения σ в трубопроводе вычисляются по формуле (11.123).