


Рис. 11.22.
Расчетная схема погружаемого трубопровода

с требуемой глубиной укладки трубопровода и погружают его заливом воды или отстропкой понтонов.

Ниже приводится способ расчета максимально допустимой глубины укладки подводных трубопроводов с поверхности воды с применением натяжения.

Расчетная схема погружаемого трубопровода представляется в виде упругого стержня, испытывающего продольно-поперечный изгиб и состоящего из трех участков (рис. 11.22). Первый участок $a$ имеет отрицательную плавучесть $p$, второй участок $b$ — положительную $q$ и третий, частично погруженный, рассматривается как стержень на упругом основании.

Рассмотрим случай, когда трубопровод укладывается на горизонтальное дно, что соответствует равенству нулю изгибающего момента и угла поворота в точке касания трубы и дна водоема. Тогда для полностью погруженного участка трубопровода (рис. 11.22) уравнение упругой линии по методу начальных параметров примет вид

$$y_1=\frac{R_1}{nH}(\operatorname{sh} nx_1-nx_1)+\frac{P}{H}\left(\frac{x_1^2}{2}+\frac{1-\operatorname{ch} nx_1}{n^2}\right)-\frac{\omega}{H}\left[\frac{(x_1-a)^2}{2}+\right.$$
$$\left.+\frac{1-\operatorname{ch} n(x_1-a)}{n^2}\right], \qquad (11.68)$$

где $R_1$ — реакция в точке касания трубопровода и дна водоема; $H$ — продольная растягивающая сила в трубопроводе; $n^2=H/EI$; $\omega=p+q$; $EI$ — жесткость трубы при изгибе.

Для третьего участка трубопровода (см. рис. 11.22) уравнение упругой линии (общее решение дифференциального уравнения растянуто-изогнутого стержня на упругом основании) представляется в виде

$$y_3=\left(C_1e^{\alpha x_3}+C_2e^{-\alpha x_3}\right)\cos\beta_1x_3+\left(C_3e^{\alpha x_3}+C_4e^{-\alpha x_3}\right)\sin\beta_1x_3, \qquad (11.69)$$

где $C_1$, $C_2$, $C_3$ и $C_4$ — произвольные постоянные;

$$\alpha=\sqrt{\sqrt{\frac{k_{cp}}{4EI}}+\frac{H}{4EI}}; \qquad (11.70)$$

$$\beta_1=\sqrt{\sqrt{\frac{k_{cp}}{4EI}}-\frac{H}{4EI}};$$



$k_{cp}$ — усредненный коэффициент упругости основания [см. формулу (11.8)].

Используя граничные условия при $x_3=0$; $y_3=-y_0$ и при $x_3\to\infty$ $y_3\to0$, получаем значения производных уравнения (11.69) на границе второго и третьего участков в виде

$$y_c^{I}=\alpha y_0+\beta_1C_1;$$
$$y_c^{II}=-(\alpha^2-\beta_1^2)\,y_0-2\alpha\beta_1C_1; \qquad (11.71)$$
$$y_c^{III}=\alpha(\alpha^2+3\beta_1^2)\,y_0+\beta_1(3\alpha^2-\beta_1^2)\,C_1.$$

Приравнивая значения первой, второй и третьей производных выражения (11.68) при $x=c$ к соответствующим значениям производных из формулы (11.71), получаем трансцендентные уравнения для определения безразмерной длины полностью погруженного участка трубопровода $nc$ и безразмерной длины второго участка $nb$:

$$nb=-\operatorname{ar\,th}\frac{1}{A}+\frac{1}{\sqrt{A^2-1}}\operatorname{ar\,ch}\left[\left(\frac{p}{\omega}A-\frac{nR_1}{\omega}\right)\operatorname{ch} nc+\right.$$
$$\left.+\left(\frac{p}{\omega}-\frac{nR_1}{\omega}A\right)\operatorname{sh} nc+\frac{q}{\omega}\left(A-\frac{n}{2\alpha}\right)\right]; \qquad (11.72)$$
$$nR_1\operatorname{ch} nc-p\operatorname{sh} nc+\omega\operatorname{sh} nb+A_1(pnc-\omega nb)+A_2=0,$$

где

$$A=\frac{3\alpha^2-\beta_1^2}{2\alpha n}; \qquad A_1=\frac{3\alpha^2-\beta_1^2}{\alpha^2-\beta_1^2};$$
$$A_2=A_1nR_1+2\alpha nHy_0.$$

В зависимости от величин $p$, $q$, $H$, $EI$ и глубины погружения трубопровода $h$ максимальный изгибающий момент возможен на любом из трех участков.

Определение участка, на котором возникает максимальный изгибающий момент, осуществляется построением эпюры изгибающих моментов.

Как показывают расчеты, ориентировочно можно принимать максимальным изгибающий момент на первом участке трубопровода при $p/q\geqslant1$, а на втором и третьем участках — при $p/q<1$.

Координата максимального изгибающего момента на первом участке определяется по формуле

$$nx=\operatorname{ar\,th}\frac{nR_1}{p}, \qquad (11.73)$$

полученной из условия равенства нулю третьей производной упругой оси трубы. Подставляя выражение (11.73) в уравнение