изгибающих моментов, получаем, что максимальному моменту на первом участке соответствует значение реакции

$$R_1 = \sqrt{\sigma W (2p - n^2 \sigma W)}. \qquad (11.74)$$

При максимальном изгибающем моменте на втором участке для упрощения расчетов начало координат следует поместить на конце второго участка и направить ось x влево, как показано на рис. 11.22. Уравнение упругой линии трубопровода в этом случае по методу начальных параметров примет вид

$$y_2 = -y_0 - y_c^{\mathrm{I}} \frac{\operatorname{sh} nx_2}{n} - \frac{M_c}{H}(1 - \operatorname{ch} nx_2) + \frac{R_2}{nH}(nx_2 - \operatorname{sh} nx_2) -$$
$$- \frac{q}{H}\left(\frac{x_2^2}{2} + \frac{1 - \operatorname{ch} nx_2}{n^2}\right) + \frac{\omega}{H}\left[\frac{(x_2 - b)^2}{2} + \frac{1 - \operatorname{ch} n(x_2 - b)}{n^2}\right]. \qquad (11.75)$$

Выполняя аналогичные преобразования, как и в случае максимального изгибающего момента на первом участке, получим два трансцендентных уравнения для определения nc и na:

$$na = \operatorname{ar\,ch} \frac{1}{\omega}\left\{\left[q + \frac{2\alpha n^2}{\alpha^2 + \beta_1^2} R_2 + (3\alpha^2 - \beta_1^2) y_0 H\right] \operatorname{ch} nc - \right.$$
$$\left. - [2\alpha n y_0 H - n A_1 R_2] \operatorname{sh} nc + p\right\};$$
$$\omega(na - \operatorname{sh} na) + \left[q + \frac{2\alpha n^2}{\alpha^2 + \beta_1^2} R_2 + (3\alpha^2 - \beta_1^2) y_0 H\right] \operatorname{sh} nc -$$
$$- (2\alpha n y_0 H + n A_1 R_2) \operatorname{ch} nc - qnc + nR_2 = 0, \qquad (11.76)$$

где реакция на границе второго и третьего участков

$$R_2 = -\frac{2\alpha q}{\alpha^2 + \beta_1^2} \pm$$
$$\pm \sqrt{\left(\frac{2\alpha q}{\alpha^2 + \beta_1^2}\right)^2 + [n(\alpha^2 + \beta_1^2) y_0 EI]^2 + 2\sigma W q - (\sigma W n)^2 -}$$
$$\overline{- 2(3\alpha^2 - \beta_1^2) q y_0 EI}. \qquad (11.77)$$

Из двух значений R_2, вычисленных по формуле (11.77), принимают положительное, удовлетворяющее условиям (11.76) и $c > a$. При отрицательном значении R_2 максимальный момент возникает на третьем участке, и R_2 находят по максимальному изгибающему моменту на третьем участке по формуле, полученной из второй производной выражения (11.69),

$$R_2 = \frac{2\beta_1 (\alpha^2 + \beta_1^2) EI}{n^2 \sin \beta_1 x - 4\alpha\beta \cos \beta_1 x} \times \left[\frac{\sigma W}{e^{-\alpha x} EI} + (3\alpha^2 - \beta_1^2) y_0 \cos \beta_1 x + \right.$$
$$\left. + \frac{\alpha}{\beta_1}(3\beta_1^2 - \alpha^2) y_0 \sin \beta_1 x\right], \qquad (11.78)$$

где x определяется из условия равенства нулю третьей производной выражения (11.69).

Расчет допустимой глубины укладки подводных трубопроводов выполняется в следующем порядке:

1) по величине p/q предварительно определяют участок, на котором возникает максимальный изгибающий момент. Ориентировочно можно считать, что при $p/q \geqslant 1$ максимальный изгибающий момент возникает на первом участке, при $p/q < 1$ — на втором или третьем участке;

2) при максимальном изгибающем моменте на первом участке значения nc и nb определяют по (11.72) с учетом выражения (11.74); при максимальном изгибающем моменте на втором участке значения nc и na определяются по (11.76) с учетом R_2 по выражению (11.77) и при максимальном изгибающем моменте на третьем участке эти значения определяются по (11.76) с учетом R_2 по выражению (11.78);

3) строят эпюру изгибающих моментов и окончательно уточняют, какому участку соответствует максимальный изгибающий момент. Если подтверждается предварительно принятое положение максимального изгибающего момента, то допустимая глубина укладки трубопровода определяется с учетом вычисленных значений a, b, c, R_1 и R_2 по формуле (11.68) или (11.75) при $x = c$.

Если максимальный изгибающий момент не соответствует предварительно выбранному участку, то выполняется повторный расчет с учетом действительного положения максимального изгибающего момента;

4) глубину водоема $h_{\text{в}}$, на которую возможна укладка трубопровода, определяют из выражений

$$h_{\text{в}} = h_1 + D,$$
$$h_{\text{в}} = h_2 + D - y_0, \qquad (11.79)$$

где h_1 и h_2 — глубина погружения трубопровода, определяемая соответственно по формулам (11.68) и (11.75); D — внешний диаметр трубопровода.

Пример. Определить максимальную глубину водоема, на которую возможна укладка трубопровода. Исходные данные: $D = 50{,}8$ см; $p = 1{,}144$ кгс/см; $q = 0{,}766$ кгс/см; $y_0 = 20$ см; $\sigma = 2440$ кгс/см^2; $W = 1823$ см^3; $EI = 9{,}723 \cdot 10^{10}$ кгс·см^2; $H = 10\,000$ кгс.

Поскольку $p/q = 1{,}144/0{,}766 = 1{,}493 > 1$, считаем максимальным изгибающий момент на первом участке.

По формуле (11.74) находим $R_1 = 2833{,}5$ кгс.

Из решения трансцендентных уравнений (11.72) получаем $nc = 4{,}16$ и $nb = 2{,}118$.

Проверка показывает, что максимальный изгибающий момент соответствует первому участку, тогда по формуле (11.68) при $x = c$ и $x = a = b$ получаем $h_1 = 15{,}26$ м.

По формуле (11.79) вычисляем максимальную глубину водоема, на которую возможна укладка трубопровода $h_{\text{в}} = 15{,}26 + 0{,}508 = 15{,}768$ м.

Следует отметить, что при отсутствии натяжения $H = 0$, $h_{\text{в}} = 10$ м.