Подставляя в формулу (11.35) вместо $-M_l$ и $-Q_l$ значения выражения (11.29) и (11.30), получим значения безразмерных максимальных напряжений на участке b в зависимости от функций А. Н. Крылова

$$\bar{\sigma}_b = \frac{2\sigma_b \beta^2 W}{\omega} = \frac{m}{n_2^2}\left[2n_2(k_3 n_1 - k_2) + (k_2 n_1 - k_1)^2\right], \tag{11.36}$$

где

$$m = \frac{q}{\omega}; \qquad n_2 = \frac{q}{q_1}.$$

Подставляя зависимости (11.28) — (11.30) в формулы (11.11) и (11.12), получаем два уравнения для определения длины участков $\bar{a}$ и $\bar{c}$, которые можно представить в безразмерном виде:

$$\bar{a}^2 = 2\frac{q_1}{\omega}\left[\frac{n_2 c^2}{2} + (k_2 n_1 - k_1)\bar{c} + k_3 n_1 - k_2\right]; \tag{11.37}$$

$$\bar{a}^3 = 6\frac{q_1}{\omega}\left[\frac{n_2 \bar{c}^3}{6} + (k_2 n_1 - k_1)\frac{\bar{c}^2}{2} + \right.$$

$$\left. + (k_3 n_1 - k_2)\bar{c} - \frac{k_0 n_1}{4} - k_3\right]. \tag{11.38}$$

Глубина укладки трубопровода определяется подстановкой выражений (11.28)—(11.30) в уравнение (11.17)

$$h = \frac{q_1}{\beta^4 EI}\left[-\left(\frac{k_0 n_1}{4} + k_3\right)\bar{c} + (k_3 n_1 - k_2)\frac{\bar{c}^2}{2} + \right.$$

$$\left. + (k_2 n_1 - k_1)\frac{\bar{c}^3}{6} + \frac{n_2 \bar{c}^4}{24} - \frac{\omega \bar{a}^4}{q_1 24}\right]. \tag{11.39}$$

Максимальные напряжения на участке a равны

$$\sigma_a = \frac{R^2}{2pW}, \tag{11.40}$$

где $R = pc - \omega b + Q_l$ — реакция в точке касания трубопровода и дна.

Эти напряжения после подстановки выражения (11.30) в (11.40) можно представить в безразмерном виде:

$$\bar{\sigma}_a = \frac{2\sigma_a \beta^2 W}{\omega} = \frac{1}{1-m}\left[\bar{a} - m\bar{c} - \frac{q_1}{\omega}(n_1 k_2 - k_1)\right]^2. \tag{11.41}$$

Пример 2. Определить допустимую глубину укладки трубопровода в момент отрыва его плавающего конца от поверхности воды. Параметры трубопровода соответствуют приведенным в примере на стр. 266.

Из трансцендентного уравнения (11.36) для $\bar{\sigma}_b = 0{,}981$; $m = 0{,}739$, $n_1 = 0{,}1397$ и $n_2 = 2{,}227$ находим аргумент функций А. Н. Крылова $\beta l = 2{,}105$, а значения функций по таблице или по формулам (11.31)—(11.34): $k_0 = -2{,}12036$; $k_1 = 0{,}76296$; $k_2 = 1{,}73969$; $k_3 = 1{,}41064$

Из совместного решения уравнений (11.37) и (11.38) для вычисленных k_0, k_1, k_2 и k_3 находим $\bar{c} = 5{,}167$ и $\bar{a} = 4{,}112$. По формуле (11.39) определяем $h = 11{,}14$ м.

Размерная длина участков: $a = \bar{a}/\beta = 103{,}03$ м; $c = \bar{c}/\beta = 129{,}47$ м; $l = \bar{l}/\beta = 52{,}74$ м. Допустимая глубина водоема $h_в = h + D = 12{,}16$ м. Проверяется максимальное напряжение на участке a по формуле (11.41): $\bar{\sigma}_a = 0{,}832$, что составляет 84,8% от максимального напряжения на участке b.

Вычисленная допустимая глубина водоема по данной расчетной схеме $h_в = 12{,}16$ м на 1,68 м превышает глубину $h_в = 10{,}48$ м, вычисленную с учетом полубесконечной длины плавающего участка трубопровода (см. пример на стр. 266). Это означает, что максимальные напряжения в трубопроводе на участке b при одинаковой глубине укладки уменьшаются по сравнению с расчетной схемой на рис. 11.8, *б*.

Рассмотрим завершающую стадию погружения трубопровода (позиция *4*, рис. 11.7), когда длина участка трубопровода, находящегося на плаву, равна нулю ($l = 0$). В этом случае на участке трубопровода b напряжения уменьшаются, а на участке a возрастают. Расчетная схема завершающей стадии погружения трубопровода приведена на рис. 11.18. Для этой расчетной схемы уравнения прогиба и его производных по методу начальных параметров примут вид:

$$EIh = \frac{Rc^3}{6} - \frac{pc^4}{24} + \frac{\omega b^4}{24}; \tag{11.42}$$

$$EIy_c^{\mathrm{I}} = \frac{Rc^2}{2} - \frac{pc^3}{6} + \frac{\omega b^3}{6}; \tag{11.43}$$

$$EIy_c^{\mathrm{II}} = M_c = Rc - \frac{pc^2}{2} + \frac{\omega b^2}{2} = 0; \tag{11.44}$$

$$EIy_c^{\mathrm{III}} = Q_c = R - pc + \omega b = 0. \tag{11.45}$$

Реакция грунта в точке касания трубопровода и дна водоема R через максимальные напряжения σ_a на участке a будет

$$R = \sqrt{2p\sigma_a W}. \tag{11.46}$$

Решая совместно уравнения (11.44) и (11.45), получаем длины участков c и b:

$$c = \frac{R}{p}\left(1 + \sqrt{\frac{1}{m}}\right); \tag{11.47}$$

$$b = \frac{R}{\omega}\sqrt{\frac{1}{m}}. \tag{11.48}$$

Пример 3. Определить допустимую глубину при завершающей стадии погружения трубопровода для параметров, приведенных в примере на стр. 266.

По формуле (11.46) для $\sigma_a = 3050$ кгс/см² находим $R = 9964{,}3$ кгс. По формулам (11.47) и (11.48) определяем длины участков: $c = 105{,}097$ м и $b = 14{,}783$ м.