

РИС. 12.25.
Эпюра распределения изгибающего момента по длине трубопровода:
1 — эпюра без регулирования плавучести трубопровода; *2* — задаваемая эпюра с регулированием плавучести трубопровода

щий момент на первом участке можно аппроксимировать полиномом третьей степени

$$M_1(s) = M_{\max}\left[a_0 + a_1\frac{s}{s_1} + a_2\left(\frac{s}{s_1}\right)^2 + a_3\left(\frac{s}{s_1}\right)^3\right].$$

Используя условия при $s=0$, $M(0)=0$ и при $s=s_1$ $M(s_1)=M_{\max}$, $\frac{dM(s)}{ds}=0$, $\frac{d^2M(s)}{ds^2}=0$, получаем

$$M_1(s) = M_{\max}\left[3\frac{s}{s_1} - 3\left(\frac{s}{s_1}\right)^2 + \left(\frac{s}{s_1}\right)^3\right]. \quad (12.45)$$

Интегрируя уравнение (12.42) после подстановки выражения (12.45), получаем зависимость для угла поворота

$$\theta_1(s) = \theta_0 + \frac{M_{\max}s_1}{EI}\left[\frac{3}{2}\left(\frac{s}{s_1}\right)^2 - \left(\frac{s}{s_1}\right)^3 + \frac{1}{4}\left(\frac{s}{s_1}\right)^4\right],$$

где θ_0 — угол наклона в точке касания.

Распределение отрицательной плавучести по длине трубопровода для первого участка определяем по формуле (12.44) с учетом зависимости (12.45)

$$p_1(s) = \frac{HM_{\max}}{EI\cos^2\theta_1(s)}\left[3\left(\frac{s}{s_1}\right) - 3\left(\frac{s}{s_1}\right)^2 + \left(\frac{s}{s_1}\right)^3\right] + \frac{6M_{\max}}{s_1^2\cos\theta_1(s)}\left(1 - \frac{s}{s_1}\right).$$

Длина участка s_1 может быть принята равной координате s, в которой изгибающий момент для трубопровода с равномерно распределенной нагрузкой достигает максимального значения (см. рис. 12.25).

Для второго участка $s_2 \geqslant s \geqslant s_1$ изгибающий момент постоянен и равен

$$M_2(s) = M_{\max},$$

выражение для угла поворота имеет вид

$$\theta_2(s) = \frac{M_{\max}}{EI}(s - s_1) + \theta(s_1), \quad (12.46)$$

где $\theta(s_1)$ — угол поворота на границе первого и второго участков, а распределенная нагрузка определяется по формуле

$$p_2(s) = \frac{HM_{\max}}{EI\cos^2\theta_2(s)}. \quad (12.47)$$

Как видно из (12.47), с увеличением θ, а следовательно, и s отрицательная плавучесть $p_2(s)$ трубопровода вместе с понтонами возрастает. Поэтому длину второго участка s_2 можно найти из условия, при котором $p_2(s)$ становится равной отрицательной плавучести трубопровода без понтонов $p_2(s)=p_2$. Тогда, принимая в (12.46) $s=s_2$ и $\theta_2(s)=\theta(s_2)$, получаем длину второго участка

$$s_2 = s_1 + [\theta(s_2) - \theta(s_1)]\frac{EI}{M_{\max}},$$

где $\theta(s_2)$ находим из (12.47) при $p_2(s)=p$:

$$\theta(s_2) = \arccos\sqrt{\frac{HM_{\max}}{EIp}}.$$

Для третьего участка $s_h \geqslant s \geqslant s_2$ отрицательную плавучесть трубопровода принимаем постоянной, т. е. $p_3(s)=p$. Поскольку третий участок характеризуется большими глубинами укладки, прогибы, углы поворота и изгибающий момент погружаемого трубопровода можно принять соответствующими параметрам гибкой нити со смещенным началом координат.

Изгибающий момент и угол поворота для гибкой нити описываются следующими уравнениями:

$$M(s) = \frac{EIp}{H\left[1 + \left(\frac{ps}{H}\right)^2\right]}; \quad (12.48)$$

$$\theta(s) = \operatorname{arctg}\frac{ps}{H}.$$

Однако уравнение (12.48) при $s=s_2$ не удовлетворяет значению $M(s_2)=M_{\max}$. Для выполнения этого условия необходимо сместить начало координат гибкой нити на величину $s_c = s_2 - \Delta s$. После такого смещения соответствующие уравнения гибкой нити будут описывать изгибающий момент и углы поворота для третьего участка погружаемого трубопровода

$$M_3(s) = \frac{EIp}{H\left\{1 + \left[\frac{(s - s_c)p}{H}\right]^2\right\}}; \quad (12.49)$$

$$\theta_3(s) = \theta(s_2) + \operatorname{arctg}\left[\frac{p(s - s_c)}{H}\right] - \operatorname{arctg}\frac{p\Delta s}{H}. \quad (12.50)$$

Общую длину провисающего участка трубопровода $s_h = s_1 + s_2 + s_3$ определяем интегрированием уравнения

$$h = \int_0^{s_h} \sin\theta(s)\,ds$$

до заданной глубины h с учетом полученных функциональных зависимостей для трех участков s_1, s_2 и s_3.