§ 12.7. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ УКЛАДКЕ ГЛУБОКОВОДНЫХ МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Регулирование напряженного состояния подводных трубопроводов, укладываемых погружением, можно осуществить изменением натяжения или отрицательной плавучести трубопровода. При строительстве глубоководных трубопроводов больших диаметров существующие методы их укладки могут оказаться неприемлемыми из-за необходимости создания значительного усилия натяжения. На больших глубинах, достигающих нескольких сотен метров, якорная система трубоукладочных барж не всегда может обеспечить безопасный уровень напряжений в трубопроводе. Следовательно, уменьшение напряжений в провисающем участке трубопровода путем регулирования натяжения с трубоукладочной баржи может оказаться практически трудно выполнимым или даже невозможным. Уменьшение напряжений в процессе укладки трубопровода, а также снижение тягового усилия до приемлемых значений целесообразно осуществлять регулированием плавучести на провисающем участке трубопровода.

Отрицательная плавучесть уложенного на морское дно трубопровода должна обеспечивать его устойчивость на сдвиг и всплытие. Поэтому очевидно, что регулирование плавучести провисающего участка трубопровода следует осуществлять с помощью временных понтонов. Изменением отрицательной плавучести по длине трубопровода можно достичь желаемого распределения изгибающих моментов или напряжений в трубопроводе. Регулирование плавучести трубопровода можно обеспечить подбором размеров понтонов, изменением расстояний между ними, специальными методами, а также автоматическим управлением по заданной программе.

Приведем расчет распределения плавучести понтонов по длине провисающего участка трубопровода [32].

Дифференцируя уравнение (12.21) по s, получаем

$$\frac{d^2M}{ds^2} = [H\cos\theta(s) - (R_0 - p(s)\cdot s)\sin\theta(s)]\frac{d\theta(s)}{ds} - p\cos\theta(s). \quad (12.39)$$

В уравнении (12.39) выражение, стоящее в квадратных скобках, представляет собой продольное усилие в трубопроводе $T(s)$

$$T(s) = H\cos\theta(s) - (R_0 - p(s)\cdot s)\sin\theta(s). \quad (12.40)$$

Подставляя зависимость (12.40) в уравнение (12.39), получаем

$$\frac{d^2M(s)}{ds^2} - \frac{T(s)}{EI}M(s) = -p(s)\cos\theta(s). \quad (12.41)$$

Зависимость между изгибающим моментом и углом наклона трубопровода имеет вид

$$\frac{d\theta(s)}{ds} = \frac{M(s)}{EI}. \quad (12.42)$$

При укладке глубоководных трубопроводов их продольное усилие незначительно отличается от продольного усилия, соответствующего гибкой нити, т. е. можно принять

$$T(s) = \frac{H}{\cos\theta(s)}. \quad (12.43)$$

Обычно для обеспечения безопасной укладки задаются минимальным тяговым усилием H баржи.

После подстановки выражения (12.43) в уравнение (12.41) получим зависимость для отрицательной плавучести трубопровода

$$p(s) = \frac{H\cdot M(s)}{EI\cos^2\theta(s)} - \frac{1}{\cos\theta(s)}\cdot\frac{d^2M(s)}{ds^2}. \quad (12.44)$$

Задаваясь приемлемым распределением изгибающего момента $M(s)$ и интегрируя уравнение (12.42), можно найти соответствующее значение угла поворота $\theta(s)$. Вместо $M(s)$ можно задавать желаемую форму упругой линии трубопровода, определяемую углом наклона $\theta(s)$ или прогибами $y(s)$. Используя заданные функции для изгибающего момента $M(s)$ и найденные выражения угла поворота $\theta(s)$, по формуле (12.41) можно найти расчетные зависимости для отрицательной плавучести трубопровода, а затем вычислить интенсивность усилий, создаваемых временными понтонами.

Эпюра изгибающих моментов при укладке глубоководных трубопроводов с постоянной по длине трубы отрицательной плавучестью p обычно имеет вид, показанный на рис. 12.25. На рисунке изображена эпюра для провисающего участка трубопровода от морского дна до нижнего конца стрингера. Следует отметить, что вид этой эпюры существенно зависит от натяжения H, глубины укладки h, жесткости трубы EI и отрицательной плавучести p.

При решении рассматриваемой задачи эпюрой изгибающих моментов можно варьировать в широком диапазоне, но практически ее удобней задавать в виде трех участков:

первый соответствует увеличению изгибающего момента; второй — постоянному значению момента; третий — уменьшению его.

Первый участок длиной s_1 соответствует небольшой глубине погружения, изгибающий момент на этом участке возрастает от нуля до наибольшего допустимого значения M_{max}. Изгибаю-