Обозначая объем тормозных понтонов, приходящийся на единицу длины трубопровода, через $V_т$ и глубину погружения конца участка трубопровода с тормозными понтонами через $h_т$, можно получить подъемную силу тормозных понтонов $Q_т$ для участка $h_т > h_0$:

$$Q_т = H_h - H_0 = V_т\left[h_0 + (h_0 + 10)\ln\frac{h_т + 10}{h_0 + 10}\right]. \qquad (12.84)$$

При $h_т \leqslant h_0$ $Q_т = V_т h_т$.

Как следует из формулы (12.84), подъемная сила тормозных понтонов зависит от натяжения трубопровода. С увеличением натяжения уменьшаются кривизна трубопровода и глубина погружения понтонов, соответственно возрастает плавучесть понтонов, и трубопровод поднимается. Наоборот, с уменьшением натяжения подъемная сила понтонов уменьшается, при определенном натяжении подъемная сила тормозных понтонов становится недостаточной, и трубопровод погружается.

Координаты и длину упругой линии для нижнего участка S-образной кривой можно определить из решения нелинейного дифференциального уравнения первого порядка (12.77). Это уравнение может быть проинтегрировано численными методами. Для верхнего участка S-образной кривой, если начало координат разместить на поверхности воды и направить ось x влево, а ось y вниз, основные расчетные параметры можно получить из уравнения гибкой нити с распределенной нагрузкой интенсивностью $p - V_1$

$$y = \frac{H}{p - V_1}\left(\operatorname{ch}\frac{p - V_1}{H}x - 1\right).$$

Минимальные радиусы кривизны трубопровода, укладываемого по принятой расчетной схеме, будут в точке касания трубопровода дна ρ_0 и поверхности воды $\rho_п$, радиусы кривизны определяются по формулам

$$\rho_0 = \frac{H_0}{p}; \qquad (12.85)$$

$$\rho_п = \frac{H_h}{V_1 + V_т - p}. \qquad (12.86)$$

Из выражения (12.85) следует, что при постоянном натяжении для уменьшения напряжений (увеличения ρ_0) необходимо уменьшать массу трубопровода в воде p, а для увеличения радиуса кривизны $\rho_п$ — ограничивать подъемную силу основных и тормозных понтонов.

Радиусы кривизны ρ_0 и $\rho_п$ должны быть больше допустимого радиуса кривизны, определяемого по формуле

$$\rho_д = \frac{ED_н}{2R_1},$$

где R_1 — расчетное сопротивление материала трубы.

Увеличение глубины укладки трубопровода обусловливает увеличение массы трубы в воде p, так как для обеспечения устойчивости от внешнего гидростатического давления приходится увеличивать толщину стенки трубопровода. Значительная масса трубопровода при укладке на больших глубинах требует создания значительных натяжений, что осложняет укладку трубопровода, и поэтому необходимо массу трубопровода снижать путем использования большого числа понтонов.

Преимущество метода S-образной кривой — возможность укладки трубопроводов на большую глубину (до нескольких километров). Поскольку плети трубопровода монтируются на берегу, облегчается его монтаж и испытание, уменьшается объем монтажных работ, выполняемых в море, а вместе с ним уменьшается опасность повреждения трубопровода во время шторма. Перед возникновением шторма трубопровод может быть погружен на неопасную глубину, а после улучшения погоды вновь поднят на поверхность. Эти операции значительно облегчаются в результате применения понтонов с переменной плавучестью. По мере подъема понтоны восстанавливают свою плавучесть, и трубопровод принимает первоначальную форму, что позволяет продолжать работы по соединению очередной плети. Для соединения плетей требуется стыковочное судно небольшого водоизмещения. Уменьшение напряжений в трубопроводе, возникающих при подъеме концов стыкуемых плетей над поверхностью воды, и уменьшение размеров стыковочного судна можно достичь соединением плетей на поверхности воды или под водой с применением специальных герметичных камер. Соединение концов стыкуемых плетей может быть выполнено сваркой или с помощью механического резьбового крепления. Резьбовое соединение может оказаться предпочтительным для трубопроводов небольших диаметров.

§ 12.12. УКЛАДКА ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОДДЕРЖИВАЮЩЕГО ТРОСА

Как уже отмечалось, для снижения напряжений, возникающих от изгиба подводных трубопроводов при укладке их с поверхности воды на большие глубины, могут применяться различного типа стрингеры, устройства для создания натяжения трубопровода и понтоны, регулирующие массу трубопровода под водой. Однако не всегда перечисленные способы эффективны. В начальный момент укладки создание натяжения в трубопроводе становится затруднительным из-за необходимости заякоривания в дно его нижнего конца. В некоторых случаях, например при соединении погружаемого трубопровода с ранее уложенным, необходимо снижать натяжения до минимального значения. Увеличение радиуса кривизны погружаемого трубопровода в этих условиях можно получить с помощью метода,