давления, а также категории участка. Приведенные в СНиП II-45-75 коэффициенты даже при всей их условности не отражают особенностей загрузки и работы подводных трубопроводов и поэтому не могут использоваться при расчете последних.

Подводный трубопроводов подвергается как внутреннему давлению продукта, так и давлению окружающей его воды. При этом сразу после укладки действует только внешнее давление и лишь после ввода трубопровода в эксплуатацию в нем создается внутреннее давление, которое компенсирует внешнее давление воды. Следовательно, трубопровод необходимо рассчитывать на прочность не только на внутреннее, но и на внешнее давление.

Второй особенностью некоторых подводных трубопроводов является то, что их нельзя испытать на повышенное давление перед укладкой под воду, поскольку многие схемы укладки не дают возможность это сделать. Испытывать же подводные трубопроводы после их укладки со значительным превышением давления по сравнению с рабочим опасно, особенно для глубоководных трубопроводов. Дело в том, что любой разрыв глубоководного трубопровода очень сложно, а иногда и невозможно ликвидировать. Поэтому метод расчета и метод испытаний (до укладки) должны обеспечивать неразрушимость труб при всех режимах эксплуатации трубопровода.

6. Расчет толщины стенки труб по внешнему давлению.

От внешнего давления возникают кольцевые сжимающие напряжения, определяемые по формуле (4.21). Как известно из теории упругости, при равномерно распределенной по периметру кольца нагрузке q при некотором ее значении происходит потеря устойчивости круговой формы кольца. Эта нагрузка называется критической и имеет вид

$$q_{кр} = \frac{E\delta^3}{4r_{ср}^3}. \tag{4.24}$$

Принимая

$$q_{кр} = n\gamma_в h_в, \tag{4.25}$$

где $h_в$ — высота столба жидкости над верхней образующей трубы с учетом превышения гидростатического уровня за счет волн, из выражений (4.24) и (4.25) можно найти минимальное значение δ, при котором трубопровод будет находиться в критическом состоянии при данном $r_{ср}$ и $h_в$:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{4nr_{ср}^3\gamma_в h_в}{E}}. \tag{4.26}$$

Поскольку $r_{ср}$ величина известная и равная половине среднего диаметра трубопровода, то по формуле (4.26) можно найти минимально допустимую из условия прочности трубопровода на внешнее давление толщину стенки труб. Приведем пример, приняв $n=1{,}2$, $D_{ср}=100$ см ($r_{ср}=50$ см), $\gamma_в=0{,}001$ кгс/см^3, $h_в=7{,}5\cdot10^3$ см, $E=2{,}1\cdot10^6$ кгс/см^2. По формуле (4.26) $\delta=1{,}29$ см, т. е. при глубине укладки трубы на 75 м толщина стенки труб диаметром $D_{ср}=100$ см должна быть не менее 1,29 см, даже если по расчету на внутреннее давление она будет меньше.

7. Расчет толщины стенки труб по внутреннему давлению.

Толщина стенки труб для подводных трубопроводов на внутреннее давление (без учета продольных сил) должна определяться по формуле

$$\delta = \frac{p_{исп} D_н}{2(R + p_{исп})} + \delta_1, \tag{4.27}$$

где R — расчетное сопротивление металла труб; δ_1 — технологический допуск при изготовлении труб на заводе, устанавливаемый ТУ на изготовление труб; p — испытательное давление.

Для подводных трубопроводов в качестве расчетного сопротивления R необходимо принимать математическое ожидание предела текучести $\bar{\sigma}_т$, определенное по испытаниям стандартных образцов, вырезанных из труб.

Тогда формула (4.27) примет вид

$$\delta = \frac{p_{исп} D_н}{2(\bar{\sigma}_т + p_{исп})}. \tag{4.27'}$$

Испытательное давление $p_{исп}$ должно обеспечить выявление дефектов, не обнаруженных физическими методами контроля. Так, нами установлено, что при характеристике безопасности трубопровода 0,999 (определяется по рекомендациям работы трубопровода [6]) предварительное испытание труб должно производиться на давление 1,6 $p_{раб}$. Остановимся далее на соотношении между $p_{исп}$ и $p_{раб}$. Для подводных трубопроводов под рабочим следует понимать избыточное давление внутри труб, равное разнице между расчетным внутренним эксплуатационным давлением $p_{экс}$ и внешним давлением окружающей трубопровод воды $q_в$, т. е.

$$p_{раб} = p_{экс} - q_в. \tag{4.28}$$

Допустим трубопровод укладывают на глубине 100 м и $p_{экс}=75$ кгс/см^2. Тогда по формуле (4.25) $q_в=1{,}2\cdot0{,}001\cdot10^4=12$ кгс/см^2, а $p_{раб}=63$ кгс/см^2. Соответственно $p_{исп}=1{,}6\cdot63=100{,}8$ кгс/см^2.

Что касается предельного значения испытательного давления, то оно должно быть на уровне математического ожидания предела текучести, т. е. $\bar{\sigma}_т$. При этом значении $p_{исп}$, как пока-