Наибольшее воздействие оказывают волны и течения, имеющие перпендикулярное направление к продольной оси укладываемого трубопровода. Наименьшее воздействие испытывает трубопровод от волн и течений, имеющих направление, параллельное продольной оси трубопровода. При воздействии на трубоукладочное судно ветра и течений в трубопроводе возникают дополнительные динамические напряжения.

Поскольку направление волн и течений может быть различным относительно продольной оси трубопровода, при подсчете суммарных напряжений необходимо учитывать векторную сумму напряжений от всех воздействий.

## § 12.9. ВОЗДЕЙСТВИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОДВОДНЫЙ ТРУБОПРОВОД

При укладке на большие глубины значительное влияние на напряженное состояние подводного трубопровода оказывает внешнее гидростатическое давление. Под действием этого давления в трубопроводе возникают кольцевые сжимающие напряжения. Если поперечное сечение трубопровода имеет начальную овальность, обусловленную допусками при изготовлении труб или появившуюся при транспортировке и монтаже, то под действием внешнего гидростатического давления возникают дополнительные изгибающие моменты, увеличивающие кольцевые напряжения в трубопроводе.

Сжимающие кольцевые напряжения в трубопроводе от воздействия гидростатического давления определяются по формуле

$$\sigma_{кц} = -\frac{pD}{2\delta} - \frac{3p}{2}\left(\frac{D}{\delta}\right)^2 \frac{\Delta}{D} \frac{1}{1-\dfrac{p}{p_{кр}}}, \qquad (12.52)$$

где $p$ — внешнее гидростатическое давление; $D$ — наружный диаметр трубопровода; $\delta$ — толщина стенки трубы; $\Delta$ — начальная овальность трубопровода, определяемая как разность между наибольшим и наименьшим наружными диаметрами в одном сечении трубы

$$\Delta = D_{max} - D_{min};$$

$p_{кр}$ — критическое давление, при котором происходит потеря устойчивости круговой цилиндрической оболочки

$$p_{кр} = \frac{2E}{1-\mu^2}\left(\frac{\delta}{D}\right)^3, \qquad (12.53)$$

где $E$ и $\mu$ — модуль упругости и коэффициента Пуассона материала трубы.

Кроме напряжений от внешнего гидростатического давления в процессе укладки в трубопроводе возникают значительные



продольные напряжения от изгиба трубы. Максимальные напряжения имеют место на нижнем вогнутом участке вблизи морского дна. Совместное воздействие изгибающего момента, усилий натяжения трубы и внешнего гидростатического давления значительно увеличивает опасность сплющивания поперечного сечения трубопровода, и потеря его устойчивости происходит при значительно меньших глубинах укладки по сравнению с воздействием только одного гидростатического давления.

Принимая условие прочности трубопровода в виде

$$\sigma_{кц}^2 + \sigma_{пр}^2 - \sigma_{кц}\sigma_{пр} = R_1^2,$$

где $\sigma_{пр}$ — продольные напряжения, определяются как сумма напряжений от изгиба трубопровода и продольных усилий от его натяжения при укладке баржи или протаскиванием; $R_1$ — расчетное сопротивление материала трубы, получаем следующее выражение для кольцевых напряжений:

$$\sigma_{кц} = -\frac{R_1}{2}\left[\sqrt{4-3\left(\frac{\sigma_{пр}}{R_1}\right)^2} - \frac{\sigma_{пр}}{R_1}\right]. \qquad (12.54)$$

Допустимое давление, действующее на подводный трубопровод, можно получить, приравнивая выражение (12.52) к (12.54)

$$p = \frac{p_{кр}}{2}\left[1 + \frac{3}{2}\frac{\Delta}{\delta} + C\left(\frac{D}{\delta}\right)^2\right] \times$$

$$\times\left[1 - \sqrt{1 - \frac{4C}{\left(\dfrac{\delta}{D} + \dfrac{3}{2}\dfrac{\Delta}{D} + C\dfrac{D}{\delta}\right)^2}}\right], \qquad (12.55)$$

где

$$C = \frac{1-\mu^2}{2}\frac{R_1}{E}\left[\sqrt{4-3\left(\frac{\sigma_{пр}}{R_1}\right)^2} - \frac{\sigma_{пр}}{R_1}\right]. \qquad (12.56)$$

**Пример.** Определить максимально допустимое наружное гидростатическое давление $p$ на подводный трубопровод для следующих параметров: $D=1020$ мм; $\delta=14$ мм; $\Delta=14{,}91$ мм; $R_1=2808$ кгс/см$^2$; $\sigma_{пр}=2000$ кгс/см$^2$; $E=2{,}1\cdot10^6$ кгс/см$^2$; $\mu=0{,}3$.

Значения критического давления по формуле (12.53) и коэффициента $C$ по (12.56) составят:

$$p_{кр} = 13{,}8 \text{ кгс/см}^2, \quad C = 5{,}244\cdot10^{-3}.$$

Допустимое наружное гидростатическое давление по формуле (12.55) $p=8{,}006$ кгс/см$^2$, что соответствует расположению трубопровода на глубине

$$h = \frac{p}{\gamma_в} = 80{,}06 \text{ м при } \gamma_в = 0{,}001 \text{ кгс/см}^3.$$

Если продольное напряжение в трубопроводе $\sigma_{пр}=2500$ кгс/см$^2$, то $C=2{,}332\cdot10^{-4}$, $p=4{,}913$ кгс/см$^2$ и $h=49{,}13$ м.

Для трубопровода $D=1020$ мм, $\delta=9$ мм, $\sigma_{пр}=2500$ кгс/см$^2$ при тех же значениях остальных параметров $p=1{,}598$ кгс/см$^2$ и $h=15{,}98$ м.