При протаскивании трубопровода с гладкой поверхностью, например с бетонным покрытием, $E_{пас}=0$.

Величина $E_{пас}$ определяется по формуле

$$E_{пас}=aN\left[\frac{\gamma_{ест}t^2}{2}\operatorname{tg}^2\left(45+\frac{\varphi_р}{2}\right)+2ct\operatorname{tg}\left(45+\frac{\varphi_р}{2}\right)\right], \qquad (10.6)$$

где N — число выступающих элементов на поверхности трубы; t — толщина выступающих элементов; $\gamma_{ест}$ — объемный вес грунта в естественном состоянии.

Если выступающими элементами являются одиночные утяжеляющие грузы, то N — число грузов, t — толщина стенки груза, a — длина хорды погруженной в грунт части груза. Если выступающие элементы — футеровочные рейки, то N принимается равным их числу на всей длине трубопровода и t — равным толщине футеровки. При наличии грузов футеровка не учитывается.

В табл. 10.4 приведены значения a для грузов; для футерованного трубопровода без грузов a принимается равным 0,3 $D_н$, где $D_н$ — наружный диаметр снаряженной трубы.

Значение дополнительного сопротивления $T_у$ можно получить, рассматривая процесс взаимодействия трубопровода с грунтом при продольных перемещениях в момент трогания.

В начальный момент приложения тягового усилия T вследствие растяжимости трубы на некотором участке длиной l_1 отсутствует предельное напряженное состояние и имеет место упругое взаимодействие трубы и грунта (рис. 10.18, *а*). Касательные напряжения по контакту с трубой τ_x зависят от перемещений u_x сечений трубопровода. Как показывают эксперименты, с увеличением u_x возрастает τ_x. При значении u_x, равном пре-

ТАБЛИЦА 10.4

Условный диаметр трубопровода, мм	Толщина стенки груза t, см	Длина хорды a, см	Условный диаметр трубопровода, мм	Толщина стенки груза t, см	Длина хорды a, см
400	10	50	700	10	70
	15	60		15	80
	20	70		20	90
500	10	60	800	15	85
	15	70		20	95
	20	80		20	95
600	10	65	1000	15	90
	15	75		20	100
	20	85			

РИС. 10.18. Расчетная схема подводного трубопровода при протаскивании

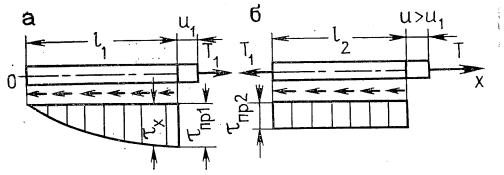
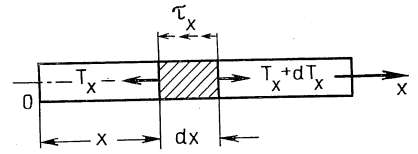


РИС. 10.19 Расчетная схема элемента трубы



дельным упругим перемещениям u_1, τ_x достигает предельных значений $\tau_{пр\,1}$

$$\tau_{пр\,1}=\sigma\operatorname{tg}\varphi_р+c, \qquad (10.7)$$

где $\sigma=q$ — нормальное напряжение в грунте по поверхности контакта с трубой.

Ориентировочные значения $\varphi_р$ и c приведены в СНиП II-15—74.

При $u_x>u_1$ на участке длиной l_2 происходит проскальзывание трубопровода по грунту. Касательные напряжения в грунте τ_x равны предельным значениям $\tau_{пр\,2}$ и распределение их по длине l_2 равномерное (рис. 10.18, *б*):

$$\tau_{пр\,2}=\sigma\operatorname{tg}\varphi_р+c'. \qquad (10.8)$$

где $c'<c$ — восстанавливающаяся часть сцепления при скольжении трубопровода по грунту.

Для подводных трубопроводов давление на грунт от массы трубы под водой незначительно, кроме того, часто применяются разгружающие понтоны, которые еще более уменьшают это давление. Поэтому сцепление c для связных грунтов может быть в несколько раз больше значения $\sigma\operatorname{tg}\varphi$, и изменение c в момент трогания трубопровода будет существенно влиять на величину тягового усилия.

Рассмотрим тяговое усилие $T_у$ в момент трогания с учетом упругого взаимодействия трубы и грунта на участке l_1 протаскиваемого трубопровода. Из условия равновесия элемента трубы dx (рис. 10.19) получим

$$dT_x-a\tau_x dx=0, \qquad (10.9)$$

где T_x — продольное усилие в сечении x.