где $n=c/a$, $c=a+b$ — полная длина погруженного в воду участка трубопровода.

Зависимость n от отношения p/q представлена на графике рис. 11.10.

Глубина погружения трубопровода h (в см) вычисляется по формуле

$$h=\frac{\sigma_д^2\delta}{3150\psi^2 r_{ср}}, \qquad (11.3)$$

где $\sigma_д$ — допустимое напряжение, равное расчетному сопротивлению материала труб (в кгс/см^2); δ — толщина стенки труб (в см); $r_{ср}$ — средний радиус трубы (в см); ψ — коэффициент, принимаемый равным ψ_a при $p/q>1$ и ψ_b при $p/q<1$.

Порядок расчета по приведенным формулам следующий:

1) для заданных h и p/q определяют значение максимального изгибающего момента при $p/q>1$ по формуле (11.1) и при $p/q<1$ по формуле (11.1′);

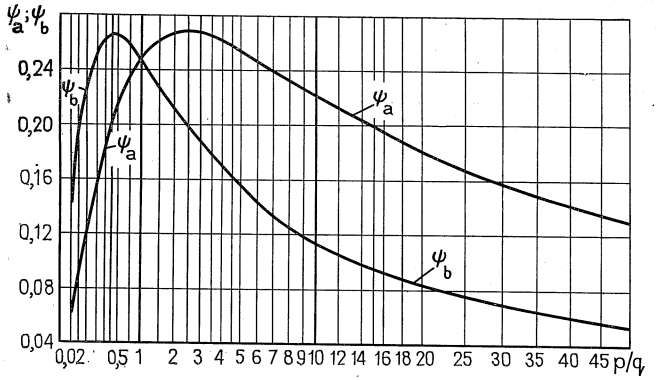
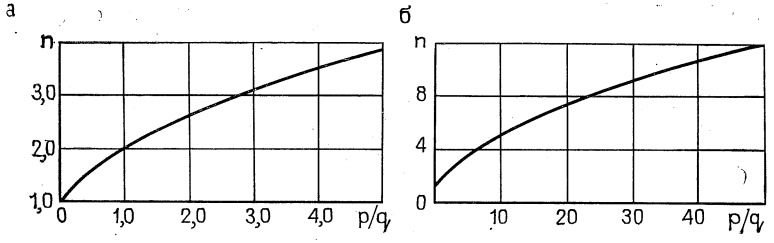


РИС. 11.9.
График зависимости коэффициентов ψ_a и ψ_b от отношения p/q

РИС. 11.10.
График зависимости n от p/q:
$а-0<\frac{p}{q}<5$; $б-0<\frac{p}{q}<50$



2) находят величину максимального напряжения в трубопроводе

$$\sigma_{max}=\frac{M}{W}, \qquad (11.4)$$

где W — осевой момент сопротивления сечения трубы;

3) сравнивают σ_{max} с величиной допустимого напряжения $\sigma_д$. Если $\sigma_{max}\leqslant\sigma_д$, то погружение трубопровода возможно. Далее определяют значения остальных параметров: n — по графику рис. 11.10; a — по формуле (11.2); $c=an$; h — по формуле (11.3). Если $\sigma_{max}>\sigma_д$, то принимают меры к уменьшению σ_{max} изменением отношения p/q.

2. *Расчет укладки трубопровода с учетом ненулевых граничных условий в точке его выхода на поверхность воды.*

Как показывают эксперименты, а также натурные наблюдения за укладкой трубопроводов, нулевые граничные условия для конца трубопровода, находящегося на поверхности воды ($x=0$, см. рис. 11.8, *б*), не выполняются. Неучет этого фактора в некоторых случаях приводит к значительным неточностям при определении допустимой глубины укладки трубопровода, максимальных напряжений и длины погруженных в воду участков трубы a и c.

Для определения действительного напряженного состояния и параметров укладки представим трубопровод как балку с тремя участками (рис. 11.8, *в*): на первый участок a действует нагрузка интенсивностью p, на второй участок b — нагрузка интенсивностью q и третий, частично погруженный, находящийся на поверхности воды, рассматривается как балка на упругом основании.

Дифференциальное уравнение изгиба трубопровода для третьего участка (см. рис. 11.8, *в*) имеет вид

$$EIy^{IV}+ky=0, \qquad (11.5)$$

где k — коэффициент, характеризующий упругость основания.

Поскольку поперечное сечение трубопровода не прямоугольное, то коэффициент упругости k является функцией перемещения

$$k=2\gamma\sqrt{(y+a_0)(D-y-a_0)}, \qquad (11.6)$$

где γ — удельный вес воды; a_0 — начальная осадка трубопровода, находящегося на плаву (рис. 11.11).

Подставляя выражение (11.6) в уравнение (11.5), получаем

$$EIy^{IV}+2\gamma\int_0^z\sqrt{(y+a_0)(D-y-a_0)}\,dy=0. \qquad (11.7)$$

Решения такого нелинейного дифференциального уравнения в замкнутом виде не имеется. Поэтому вместо точного значения