течений на трубопровод определяем по формулам (3.25) и (3.26) также для двух случаев:

а) $P_{xp} = 0{,}099 \cdot 0{,}5 \cdot \cos^2 \frac{\pi}{3} + 0{,}00945 \cdot 1 = 0{,}02183$ тс/м,

$$P_{zp} = 0{,}0183 \cdot 0{,}5 \cdot \cos^2 \frac{\pi}{3} + 0{,}00567 \cdot 1 = 0{,}00796 \text{ тс/м};$$

б) $P_{xp} = 0{,}0483 \cdot 0{,}5 \cdot \cos^2 \frac{\pi}{3} + 0{,}00995 \cdot 1 = 0{,}01549$ тс/м,

$$P_{zp} = 0{,}0869 \cdot 0{,}5 \cdot \cos^2 \frac{\pi}{3} + 0{,}00567 \cdot 1 = 0{,}01653 \text{ тс/м}.$$

В расчетах приняты $k_{сн}=0{,}5$, угол подхода волн к оси газопровода для четвертого участка $\beta_{в4}=\pi/3$ (принят из построения плана рефракции на рис. 4.3).

Величину пригрузки для обеспечения устойчивости газопровода на сдвиг и всплытие для рассматриваемых случаев расчетной волновой нагрузки подсчитываем по формуле (4.39). Поскольку газопровод не имеет криволинейных участков ($q_и=0$ и $q_н=0$), то

$$Б \geqslant \frac{P_{xp}}{\operatorname{tg}\varphi} + p_{zp}.$$

Определяем по формуле (4.31) $A=428{,}6$ кгс/м; $Q=200$ кгс/м. Для случая «а»

$$Б = \frac{21{,}8 \cdot 1{,}1}{0{,}45} + 7{,}96 + 428{,}6 - 200 = 289{,}8 \text{ кгс/м}.$$

Для случая «б»

$$Б = \frac{15{,}49 \cdot 1{,}1}{0{,}45} + 16{,}53 + 428{,}6 - 200 = 282{,}9 \text{ кгс/м}.$$

Принимаем бóльшее значение $Б$, т. е. $Б=289{,}9$ кгс/м. Приняв $\gamma_б=2{,}6$ тс/м^3, определяем наружный диаметр покрытия по формуле

$$D_б = \sqrt{\frac{4Б}{\pi(\gamma_б - \gamma_в)} + D_{из}^2}. \qquad (4.40)$$

Выполнив вычисления, получаем $D_б=0{,}72$ м. Толщина бетонного покрытия составляет $^1/_2(72 \text{ см} - 53 \text{ см}) = 9{,}5$ см.

Для других участков газопровода расчет балластировки выполняется аналогично.

ГЛАВА 5. КОЛЕБАНИЯ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

§ 5.1. МЕХАНИЗМ КОЛЕБАНИЙ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Колебания круглых цилиндров в потоке жидкости с давних пор привлекают внимание многих исследователей. Это объясняется прежде всего широким применением разнообразных конструкций круглоцилиндрической формы.

Колебаниям подвержены дымовые и вентиляционные трубы промышленных предприятий, перископы подводных лодок, воздушные и подводные нефте- и газопроводы, мачты, антенные устройства, провода линий связи и электропередачи, канаты подвесных мостов и другие конструкции сооружений.

Задача о колебаниях подводных трубопроводов в настоящее время является актуальной, поскольку, как показывает практика, колебания трубопроводов со значительной амплитудой могут привести к усталостному разрушению материала трубы, бетонного или цементного покрытия. Повреждение колеблющегося трубопровода возможно также и при ударах о донные скальные породы.

Колебания трубопроводов при обтекании их установившимся потоком жидкости обусловливаются переменной во времени и направлении гидродинамической силой, возникающей вследствие срыва вихрей с поверхности трубы. Переменная гидродинамическая сила воздействует на трубопровод как в направлении потока (продольная составляющая, переменная сила лобового сопротивления), так и в поперечном к нему направлении (поперечная составляющая).

Рассмотрим образование и отделение вихрей при различных числах Рейнольдса. При малых значениях Re поток обтекает цилиндр плавно и не отделяется от него, при больших числах Re позади цилиндра образуется два симметричных неподвижных вихря. С увеличением Re эти вихри вытягиваются вниз по течению, и наконец, при $\mathrm{Re} \approx 40$ становятся асимметричными и отрываются от цилиндра. Для $\mathrm{Re} > 150$ отрыв вихрей нерегулярен и при $\mathrm{Re} > 300$ вихревое движение в следе за цилиндром затухает. При больших числах Re (порядка $\mathrm{Re} > 10^5$) происходит другое существенное изменение потока: пограничный слой становится турбулентным и отрывается от поверхности в задней части цилиндра. Образующийся за цилиндром вихревой след характеризуется нестационарностью: нерегулярными турбулентными пульсациями скорости в следе и наличием