новения колебаний или диапазон изменения приведенной скорости, при котором будут происходить колебания трубопровода.

Для ориентировочной оценки возникновения колебаний подводных трубопроводов можно использовать величину безразмерного параметра демпфирования

$$\bar{\delta} = \frac{2m\delta}{\rho D^2}, \qquad (5.11)$$

где m — масса единицы длины трубопровода с учетом присоединенной массы жидкости $m_{пр}$, массы изоляции, балластировки и продукта, заполняющего трубу; ρ — плотность окружающей трубопровод воды.

Критическое значение $\bar{\delta}_{кр}$, выше которого не наблюдается колебаний в направлении потока, равно 1,2. Для колебаний в поперечном к потоку направлении $\bar{\delta}_{кр} = 17$.

С увеличением $\bar{\delta}$ уменьшается диапазон приведенной скорости $\bar{v} = v/nD = 1/\mathrm{Sh}$, при котором происходят колебания подводного трубопровода. При значениях приведенной скорости $\bar{v} > 4$ иногда происходят колебания с частотой срыва вихрей, отличающейся от частоты собственных колебаний трубопровода, а $\bar{v} < 1{,}2$ колебания цилиндрических конструкций не наблюдаются.

§ 5.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ

Определение собственной частоты колебаний подводных трубопроводов необходимо для выполнения динамического расчета и установления условий возникновения резонансных колебаний.

Рассматривая трубопровод как стержень с шарнирно или жестко закрепленными концами, собственную частоту его колебаний можно определить по известным формулам. Например, собственная частота колебаний стержня с шарнирными опорами

$$n_{ш} = \frac{\pi}{2l^2}\sqrt{\frac{EI}{m}}; \qquad (5.12)$$

для стержня с жестко закрепленными концами

$$n_{ж} = \frac{4{,}73^2}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{EI}{m}}, \qquad (5.13)$$

где EI — изгибная жесткость стержня (трубы); l — длина стержня; m — масса единицы длины стержня.

На практике реальными закреплениями концевых участков труб часто является грунтовая засыпка. Такое закрепление характеризуется податливостью, допускающей перемещения сечений трубопровода у закреплений. Поэтому и собственные частоты колебаний трубопроводов с реальными закреплениями должны отличаться от частот, определяемых по формулам (5.12) и (5.13). Для оценки влияний реальных закреплений на собственную частоту колебаний трубопровода нами выполнены экспериментальные исследования. Опыты проводились на магистральном нефтепроводе диаметром $D = 529$ мм с толщиной стенки 8 мм. Всего было выполнено семь опытов с различными участками засыпки трубопровода грунтом:

1-й опыт — засыпка плотным грунтом до оси трубы на прилегающих участках;

2- и 3-й опыты — засыпка слоем рыхлого грунта высотой 0,9 м, считая от оси трубы;

4-, 5-, 6- и 7-й опыты — засыпка слоем уплотненного грунта (грунт уплотнялся бульдозером) $h = 2$ м с длиной провисающих участков l, соответственно равных 43,1; 34,3; 28,8 и 22,4 м.

Из результатов опытов следует, что колебания трубопровода происходят не только на провисающем участке, но и на прилегающих к нему подземных участках.

В табл. 5.1 приведены экспериментальные значения частот свободных колебаний трубопровода $n_э$ и значения частот $n_ш$ и $n_ж$, вычисленные по формулам (5.12) и (5.13). В опытах 1, 2, 3, 4 (см. табл. 5.1) частоты $n_э$ значительно выше $n_ш$ и близки к $n_ж$. Это объясняется тем, что основание трубопровода на прилегающих участках представляло собой плотный высохший грунт ненарушенной структуры, и дополнительная засыпка (рыхлым в опытах 2 и 3 и уплотненным в опыте 4) грунтом незначительно повлияла на изменение собственной частоты колебаний.

В опытах 5, 6 и 7 среднее значение коэффициента постели грунта на прилегающих участках составляло приблизительно 5 кгс/см³, в этих опытах частоты $n_э$ значительно отличаются от $n_ш$ и $n_ж$.

ТАБЛИЦА 5.1

Номер опыта	l, м	k, кгс/см³	Частота колебаний, Гц			
			$n_э$	$n_у$	$n_ш$	$n_ж$
1	43,1	16	0,960	0,969	0,480	1,088
2	43,1	16	0,972	0,969	0,480	1,088
3	43,1	16	0,990	0,969	0,480	1,088
4	43,1	16	1,090	0,969	0,480	1,088
5	34,3	5	1,455	1,36	0,761	1,720
6	28,8	5	1,950	1,83	1,082	2,370
7	22,4	5	2,660	2,83	1,785	4,040