личину и частоту ПГС. Кроме того, необходимо установить механизм, регулирующий и поддерживающий колебания трубопровода при обтекании его равномерным потоком жидкости.

Из результатов опытов [10] следует, что в докритическом режиме частота ПГС для неподвижного и колеблющегося цилиндра периодична, линейно зависит от скорости потока. Значительное влияние колебаний на частоту срыва вихрей наблюдается лишь в резонансной области, в которой происходит так называемое явление «захвата» колебаний (частота колебаний цилиндра вблизи собственных частот может быть непериодичной. Здесь могут происходить биения либо нерегулярные колебания цилиндров).

Учитывая сказанное выше, можно сделать вывод, что для гладких цилиндров и трубопроводов с различной шероховатостью при докритическом режиме обтекания колебания под действием периодической силы приближаются к вынужденным. Это подтверждается периодическим срывом вихрей как с неподвижного, так и с колеблющегося цилиндра, а также значительно меньшим по сравнению с критическим режимом влиянием перемещений на частоту и величину переменной поперечной силы.

ПГС, действующая на неподвижный гладкий трубопровод при критическом режиме, является случайной. Колебания трубопровода под действием случайных сил будут происходить с собственной частотой колеблющейся системы.

Вихревой след за колеблющимся цилиндром зависит от амплитуды колебаний. При значительных амплитудах колебаний регулярные составляющие пульсации скорости существенно увеличиваются.

При колебаниях цилиндра вихревой след перестраивается, происходит синхронизация отрывов вихрей по длине цилиндра и изменение величины ПГС. Возможность возникновения колебаний в критическом диапазоне чисел Рейнольдса зависит от спектра частот переменной поперечной силы (пульсаций давления на поверхности трубопровода) и близости преобладающих частот этой силы к собственной частоте колебаний трубопровода.

Колебания могут возникнуть и от внешних воздействий (например, судовых и ветровых волн, давлений от подводных взрывов и т. д.) и затем продолжаться сколь угодно долго при отсутствии этих воздействий. Колебания поддерживаются вихрями, срывающимися в крайних положениях трубопровода и являющимися не причиной возникновения колебаний, а следствием их. Поэтому колебания гладкого трубопровода, а также бетонированного в критическом диапазоне чисел Рейнольдса следует рассматривать как самовозбуждаемые.

Для футерованных трубопроводов (футеровочные рейки расположены параллельно оси трубопровода) переменная попе-

речная сила будет, по-видимому, периодична как для неподвижного, так и колеблющегося трубопровода при всех режимах его обтекания: докритическом, критическом и закритическом. При колебаниях поперечная сила определяется вихрями, срывающимися в крайних положениях трубопровода, и вихрями, явившимися первопричиной возникновения колебания.

Если для гладких трубопроводов при критическом режиме колебания происходят только с собственной частотой, то колебания футерованных трубопроводов могут происходить с собственной частотой и частотой вихрей, срывающихся с неподвижного трубопровода.

Таким образом, обобщая результаты исследований по обтеканию цилиндрических конструкций потоком жидкости, можно сделать выводы:

1) механизм колебаний подводных трубопроводов представляет собой гидроупругое явление и зависит от гидродинамических, упругих, инерционных сил и сил сопротивления колеблющейся системы, от режима обтекания (числа Рейнольдса) и типа шероховатости поверхности трубопровода;

2) в докритическом диапазоне чисел Рейнольдса колебания подводных трубопроводов с различными типами шероховатостей их поверхности приближаются по типу к вынужденным колебаниям;

3) при критическом режиме обтекания колебания гладких, бетонированных и футерованных (рейки непараллельны оси трубы) трубопроводов являются самовозбуждаемыми. Колебания трубопроводов в основном происходят с собственной частотой. Имеет место ярко выраженный гидроупругий характер колебаний вследствие существенной зависимости частоты и величины ПГС от амплитуды колебаний;

4) при закритическом режиме обтекания трубопроводов с различной шероховатостью их поверхности и при критическом режиме обтекания футерованных трубопроводов (рейки расположены параллельно продольной оси трубы и симметрично относительно вектора скорости потока) механизм колебаний можно отнести к смешанному типу, занимающему промежуточное положение между вынужденными и самовозбуждаемыми колебаниями. Колебания могут происходить с частотой срыва вихрей, характерной для неколеблющегося трубопровода, и при значительных амплитудах колебаний — с частотой собственных колебаний трубопровода.

§ 5.2. ЧАСТОТА ПЕРЕМЕННОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛЫ

Сложный механизм обтекания цилиндров при различных числах Рейнольдса не позволяет пока еще получить достаточно точные величину и частоту ПГС. Поэтому наиболее полную