в этом диапазоне чисел Рейнольдса в спектре поперечной силы и неустановившегося давления при $Sh \approx 0{,}27 \div 0{,}3$ появляется пик с периодической составляющей на фоне случайного процесса.

При колебаниях трубопроводов частота ПГС зависит не только от числа Рейнольдса, но и от гидроупругих свойств колеблющейся системы, которые характеризуются гидродинамическими, упругими, инерционными силами, силами сопротивления колебаниям, а также типом шероховатости поверхности трубопровода. Возникновение и частота гидроупругих колебаний цилиндров при критическом режиме обтекания пока еще недостаточно полно исследованы. Установлено, что спектр нерегулярных сил при колеблющемся цилиндре изменяется значительнее, чем при неподвижном цилиндре. Явление захвата колебаний при критическом режиме обтекания выражено значительно сильнее по сравнению с докритическим режимом и происходит в более широком интервале отношений частот n/n_c, где n — частота колебаний цилиндра в воде; n_c — собственная частота колебательной системы.

В проведенных нами опытах [10] при $Re \approx Re_{кр.1}$ явление захвата колебаний наблюдалось при $n/n_c = 0{,}5 \div 1{,}95$, а значения чисел Струхаля $Sh = nD/v$ приближались к $Sh = n_c D/v$. При больших значениях n/n_c (в опытах $n/n_c = 2{,}5 \div 3{,}5$) $Sh = 0{,}2$. Области захвата колебаний в докритическом и критическом диапазонах чисел Рейнольдса при прочих равных условиях зависят от соотношения величин и частот ПГС, возникающих вследствие срыва вихрей с поверхности неподвижного цилиндра с частотой $n_н$ и колеблющегося цилиндра с частотой n. Взаимодействие этих сил и обусловливает явление захвата колебаний.

В работах [13, 31] приводятся результаты исследований обтекания цилиндров при $Re = 7 \cdot 10^4 \div 1{,}5 \cdot 10^6$, совершающих вынужденные колебания (вынужденные колебания создавались с помощью вибрационного стенда). Кинематическое число Струхаля, составленное по частоте вынуждающей силы $n_к$, изменялось в пределах $Sh_к = n_к D/v = 0 \div 0{,}28$. График зависимости числа Струхаля, составленного по частоте срыва вихрей Sh от $Sh_к$, представлен на рис. 5.2. При $Sh_к = 0 \div 0{,}04$ $Sh = 0{,}2$, т. е. частоты срыва вихрей с колеблющегося и неподвижного цилиндров равны; при увеличении $Sh_к$ от 0,04 до 0,1 происходит частичный захват срыва вихрей колебаниями цилиндра и Sh уменьшается от 0,2 до 0,1. В диапазоне $Sh_к = 0{,}1 \div 0{,}28$ происходит полный захват частотами колебаний цилиндра $n_к$ частот срыва вихрей n ($n_к = n$ или $Sh_к = Sh$). Из приведенных данных следует, что синхронизация частоты срыва вихрей с частотой вынужденных колебаний происходит в широком диапазоне скоростей потока ($Sh = 0{,}04 \div 0{,}28$).

У подводных трубопроводов колебания возникают в результате действия потока воды, а не в результате принудительного

воздействия (с помощью вибрационного стенда и других приспособлений), и, очевидно, синхронизация частоты срыва вихрей с частотой собственных колебаний трубопровода будет происходить в меньшем диапазоне скоростей потока.

Следует отметить, что область захвата колебаний, полученная авторами и другими исследователями, не всегда будет соответствовать условиям практики, так как она зависит не только от Sh_c, но и от Re, величины рассеяния энергии при колебаниях, отношения объемных весов трубопровода и окружающей жидкости, шероховатости поверхности трубопровода.

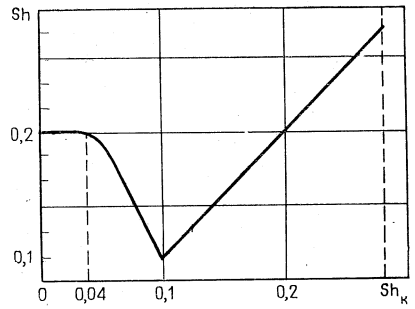


РИС. 5.2.
Изменение безразмерной частоты срыва вихрей sh в зависимости от безразмерной частоты вынужденных колебаний цилиндра $Sh_к$

От рассеяния энергии существенно зависит протяженность зоны захвата колебаний. При большом значении демпфирования (когда амплитуды колебаний малы) частота колебаний цилиндра совпадает с частотой образования вихрей, и синхронизации частоты колебаний с собственной частотой конструкции не происходит. При среднем значении демпфирования амплитуды колебаний возрастают, в определенном интервале скоростей потока происходит захват частоты образования вихрей и наступает синхронизация частоты колебаний с собственной частотой конструкции. При малом демпфировании колебания происходят с большими амплитудами и в большом интервале скоростей потока с синхронизацией частоты колебаний с собственной частотой конструкции.

Экспериментальные исследования колебаний проводились в основном с цилиндрами, имеющими гладкую поверхность, а на практике поверхность трубопровода может иметь различную шероховатость: футеровку, бетонированное покрытие, балластировку отдельными пригрузами. Поскольку при критическом режиме, который представляет наибольший интерес для практики, срыв вихрей нерегулярный и легко поддается изменению, шероховатость поверхности трубопровода оказывает существенное влияние на срыв вихрей и колебание трубопровода. Футеровка, образуя острые грани на поверхности трубопровода, будет оказывать значительное влияние на срыв вихрей и стабилизировать положение точек отрыва потока. По-видимому, спектр нестационарных сил для футерованных трубопроводов при $Sh = 0{,}2$ будет более высоким, чем для гладких цилиндров.