

РИС. 3.9.
Расположение точки отрыва потока s на поверхности цилиндра:
$а$ — при $Re=Re_{кр}$; $б$ — при $Re<Re_{кр}$

соответствующие тем же положениям точек отрыва при их естественном перемещении, достигнутом изменением Re. Для тел с острыми ребрами кризиса обтекания не наблюдается, так как угловые точки сечения являются точками срыва потока, и при изменении скорости не может происходить перемещение точек отрыва и связанного с этим изменения сопротивления. Поэтому устройство различных ребер или пластин на поверхности цилиндра, а для подводных трубопроводов футеровки, значительно увеличивает лобовое сопротивление на кризисных и закризисных режимах обтекания.

За нижним кризисным переходом при $2\cdot10^5<Re_{кр\,1}<5\cdot10^5$, при котором C_x для гладкого цилиндра уменьшается от 1,2 до 0,3, следует еще один верхний переход при $10^6<Re_{кр\,2}<3{,}5\cdot10^6$ с увеличением C_x от 0,3 до 0,7. Диапазон чисел $3{,}5\cdot10^6<Re<10^7$ характеризуется постоянным значением $C_x=0{,}7$.

Изменение C_x при $Re>10^6$ также объясняется распределением давления и положением точки отрыва потока на поверхности цилиндра. В зоне верхнего кризисного перехода $10^6<Re_{кр}<3{,}5\cdot10^6$ кильватер вновь «открывается», но ширина его остается меньше диаметра; точка турбулентного отделения потока перемещается к передней части цилиндра ($\theta>90°$) и становится неподвижной при $3{,}5\cdot10^6<Re<10^7$.

Учитывая приведенную выше зависимость C_x от Re и особенности механизма поперечного обтекания круглого цилиндра при различных числах Re, можно выделить три режима обтекания цилиндров: докритический при $Re\leqslant2\cdot10^5$, критический $2\cdot10^5<Re\leqslant3{,}5\cdot10^6$ с кризисными зависимостями C_x при $Re_{кр1}$ и $Re_{кр2}$ и закритический при $Re>3{,}5\cdot10^6$.

При докритическом режиме обтекания пограничный слой на цилиндре сохраняется ламинарным до точки отрыва, отрыв потока происходит при ламинарном пограничном слое. При критическом режиме обтекания пограничный слой частично сохраняется ламинарным, но отрыв потока происходит в зоне турбулентного течения в пристеночной области. Некоторые исследователи [43] высказывают предположение о наличии ламинарного разделительного подслоя, за которым следует турбулентное отделение потока. В закритическом режиме пограничный слой на цилиндре турбулентный за исключением небольшой области в районе передней критической точки, и отделение потока чисто турбулентное.

Указанные диапазоны чисел Re для каждого режима обтекания соответствуют гладкой поверхности цилиндра. Шероховатость поверхности цилиндра значительно влияет на параметры пограничного слоя, увеличение относительной шероховатости цилиндра приводит к более раннему переходу ламинарного слоя в турбулентный, влияет на положение точки отрыва пограничного слоя от обтекаемой поверхности.

Основные особенности обтекания шероховатых цилиндров по сравнению с гладкими цилиндрами заключаются в том, что критическая зона наступает при меньших числах Re и снижение C_x в критической зоне меньше (см. рис. 3.8).

Особенностью зависимости $C_x=f(Re)$ для шероховатых цилиндров является уменьшение критического диапазона чисел Re, кроме того, закритический режим обтекания наступает при числах Re, меньших по сравнению с Re для гладкой поверхности.

Чем больше относительная шероховатость поверхности цилиндров, тем при меньших Re наступает закритический режим. Кроме того, с увеличением относительной шероховатости увеличивается коэффициент лобового сопротивления C_x в закритической области (см. рис. 3.8).

Подводные трубопроводы могут иметь различные покрытия. Описанные выше закономерности обтекания цилиндров с шероховатой поверхностью позволяют сделать вывод, что коэффициент лобового сопротивления C_x зависит от типа шероховатости поверхности трубопровода.

При расположении трубопровода на расстоянии от дна $s>D$ на него действует сила лобового сопротивления

$$P_x=\frac{1}{2}C_x\rho v^2 D. \qquad (3.5)$$

Если трубопровод расположен на дне или вблизи дна ($s<D$), на него кроме силы лобового сопротивления R_x действует и подъемная сила P_y, возникающая в результате влияния дна за счет несимметричного распределения давления по поверхности трубы и значительного изменения градиента скоростей потока вблизи дна реки:

$$P_y=\frac{1}{2}C_y\rho v^2 D. \qquad (3.6)$$

Для установления коэффициентов лобового сопротивления C_x и подъемной силы C_y применительно к подводным трубопроводам авторами [10] выполнены экспериментальные исследования обтекания цилиндров с футерованной, бетонированной и гладкой поверхностями.