Значения C_x и C_y, определенные экспериментальным путем, будут соответствовать натурным значениям C_x и C_y, если соблюдены условия моделирования.

При $s>D$ выполнение условий моделирования сводится к установлению зависимости коэффициентов сопротивлений от следующих безразмерных параметров:

$$C_x=f\left(\mathrm{Re},\ \mathrm{Fr},\ \frac{h}{D},\ \varepsilon,\ k\right). \tag{3.7}$$

При $s<D$

$$C_x(C_y)=f\left(\mathrm{Re},\ \mathrm{Fr},\ \frac{h}{D},\ \frac{s}{D},\ I,\ \varepsilon,\ k\right), \tag{3.8}$$

где $\mathrm{Fr}=\frac{v^2}{gH}$ — число Фруда (g — ускорение силы тяжести, H — глубина потока); h — расстояние от свободной поверхности потока до верхней образующей трубопровода; I — параметр градиента скоростей потока; ε — степень турбулентности потока; k — параметр шероховатости поверхности цилиндра.

Основными параметрами при моделировании шероховатости цилиндра были приняты для футерованной поверхности: отношение ширины футеровочной рейки к высоте $b_р/h_р$, отношение расстояния между рейками к ширине $c/b_р$ и относительная шероховатость цилиндра $h_р/D$; для бетонированной поверхности модели — относительная шероховатость k/D, где k — средний размер абсолютной шероховатости.

Эксперименты выполнялись в гидравлическом лотке (длина 12 м, ширина 1 м, высота 1,5 м). Диаметры моделей труб (мм): $D=278$; 108; 56,5. Пределы изменения параметров: $\mathrm{Re}=2{,}5\times10^3\div5\times10^5$; $\mathrm{Fr}=0{,}009\div0{,}89$; $h/D=0{,}6\div10{,}0$; $s/D=0\div2{,}5$.

Силовое воздействие потока на цилиндры и скорости измерялись специальными приборами, сконструированными на основе электрического метода измерений деформаций с применением тензометров сопротивления.

Исследованиями установлено, что подводные трубопроводы в зависимости от их расположения относительно дна и свободной поверхности реки подвергаются различному по величине силовому воздействию потока.

Получены значения C_x и C_y для цилиндров с различной шероховатостью их поверхности. Значительное влияние шероховатости поверхности цилиндров на C_x отмечено лишь в кризисной по Re зоне (зоне резкого уменьшения C_x при $\mathrm{Re}>\sim10^5$).

Наибольшие значения C_x и C_y при прочих равных условиях имеют футерованные цилиндры, наименьшие — цилиндры, покрытые полихлорвиниловой изоляцией; C_x и C_y для бетонированных цилиндров занимают промежуточное положение между

значениями C_x и C_y для футерованных и покрытых полихлорвиниловой изоляцией труб.

Обобщая результаты опытов, выполненных нами, и ранее выполненных исследований для практических расчетов подводных трубопроводов, можно рекомендовать следующие значения коэффициента лобового сопротивления:

для трубопроводов с гладким и синтетическими покрытиями или с гладкой металлической поверхностью C_x определяется по графику зависимости $C_x=f(\mathrm{Re})$ (см. рис. 3.8), полученной Визельсбергером и Рошко;

для шероховатых (футерованных и обетонированных) трубопроводов $C_x=1{,}2$ при $\mathrm{Re}=10^4\div10^5$, т. е. как и для гладких трубопроводов, и $C_x=1{,}0$ при $\mathrm{Re}=10^5\div10^7$.

Значения C_x для различных шероховатостей (различное состояние футеровки, обетонирование) поверхности трубопроводов при $\mathrm{Re}=10^5\div10^7$, очевидно, будут отличаться и даже зависеть от Re, но рекомендуемое нами постоянное значение $C_x=1$ удобно в практических расчетах, а возможное завышенное значение C_x по сравнению с истинным его значением $C_x=1$ будет увеличивать лишь запас устойчивости трубопровода на сдвиг.

Выше были даны рекомендации о величине C_x в случае отсутствия влияния дна и свободной поверхности потока. Как показывают результаты опытов, близость дна и свободной поверхности приводит к увеличению коэффициента лобового сопротивления.

Для практических расчетов значение C_x при $s/D<1$ следует принимать как и для $C_x>1$, учитывая возможно завышенное рекомендованное значение C_x при $s/D>1$ для $\mathrm{Re}=10^5\div10^7$ (s — расстояние от нижней образующей трубопровода до дна реки).

При $s/D<1$ на трубопровод действует подъемная сила. Коэффициент подъемной силы C_y увеличивается с уменьшением s/D и принимает наибольшее значение при $s/D=0$.

В практических расчетах значение C_y следует принимать равным 0,6 при $s/D=0$. При $1>s/D>0$ значение C_y принимается по графику зависимости $C_{y_s}/C_{y_{s=0}}$ от s/D (рис. 3.10), где C_{y_s} — коэффициент подъемной силы для трубопровода, расположенного на расстоянии s от дна. При определенных числах Фруда $\mathrm{Fr}=v^2/gh$ и h/D наблюдается подпор и искривление свободной поверхности, и вследствие этого возникает дополнительная волновая составляющая воздействия потока на трубопровод. Абсолютный максимум волнового сопротивления при обтекании тел, погруженных на величину $h/D>0{,}2$, появляется при значениях Fr, близких к единице.

В практических расчетах влияние свободной поверхности потока на коэффициент лобового сопротивления следует учитывать при $h/D<4$. Значение коэффициента лобового сопротивле-