

УДК 532.58.81

© 2001 г. В.П. КАРЛИКОВ, Н.Т. РЕЗНИЧЕНКО, Г.И. ШОЛОМОВИЧ

## О ДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТАХ ОБТЕКАНИЯ В ТРУБАХ КОЛЕБЛЮЩИХСЯ ТЕЛ, СИЛЬНО ЗАГРОМОЖДАЮЩИХ ПОТОК

Экспериментально исследовано нестационарное и стационарное обтекание шара в цилиндрической трубе при очень большом загромождении им потока. Нестационарное обтекание изучено в случае регулярных поперечных автоколебаний шара, сопровождающихся ударным взаимодействием его со стенкой трубы. При стационарном режиме обтекания центр шара зафиксирован на оси трубы. Найдены зависимости местного сопротивления, вызываемого шаром, и его коэффициента сопротивления от основных безразмерных определяющих параметров. Сделано сравнение этих динамических характеристик в стационарном и нестационарном случаях.

Результаты проведенного ранее авторами экспериментального изучения особенностей обтекания водой в круглых цилиндрических трубах шаров, сильно загромождающих поток и обладающих возможностью свободного перемещения лишь в поперечном к нему направлении, описаны в [1]. В рассмотренных диапазонах чисел Рейнольдса  $10^4 \leq Re = VD/\nu \leq 10^5$  ( $V$  – скорость потока воды в трубе,  $D$  – диаметр шара,  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости), относительного стеснения потока  $0,1 \leq S = \delta/D \leq 0,35$  ( $\delta$  – величина максимального зазора между шаром и стенкой трубы) и отношения плотности шара к плотности воды  $1,2 \leq \rho = \rho_s/\rho_w \leq 8,6$  было установлено наличие регулярного автоколебательного режима поперечного перемещения шара в потоке, сопровождающегося ударным взаимодействием его со стенкой трубы. Механизм поддержания этих колебаний существенно иной, чем в случае обтекания шаров безграничным или слабо ограниченным потоком. Оказалось, что безразмерная частота автоколебаний  $Sh = fD/V$  ( $f$  – частота колебаний) существенно зависит только от относительного стеснения потока шаром  $S$  и относительной плотности шара  $\rho$ . Обработка на основе анализа размерностей данных экспериментов позволила получить приближенную зависимость между этими безразмерными параметрами:  $Sh \approx 0,07S^{-1,5}\rho^{-0,2}$ . Было обнаружено также, что образование за шаром хорошо развитой симметричной кавитационной полости приводит к прекращению ударного взаимодействия шара со стенкой трубы.

Настоящая работа содержит описание результатов экспериментального изучения некоторых динамических характеристик автоколебательного режима нестационарного обтекания тел в трубопроводах. Для указанных выше диапазонов значений параметров  $\rho$  и  $S$  приведены зависимости от числа Рейнольдса средних по времени значений коэффициента гидравлического сопротивления участка круглого цилиндрического трубопровода в случае автоколебаний в нем шара и его коэффициента сопротивления. Дано сравнение этих коэффициентов с их значениями при стационарном обтекании тех же шаров, зафиксированных на оси трубы.

**1. Описание установки и методики экспериментов.** Схема использованной установки показана на фиг. 1. Вода, расход которой при значениях, больших  $150 \text{ см}^3/\text{с}$ ,

Фиг. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – турборасходомер, 2 – труба, 3 – точка измерения давления, 4 – основание, 5 – шар, 6 – опорный стержень, 7 – продольные вырезы в стенке трубы, 8 – направляющая вставка, 9 – силоизмеритель,  $W$  – уровень воды

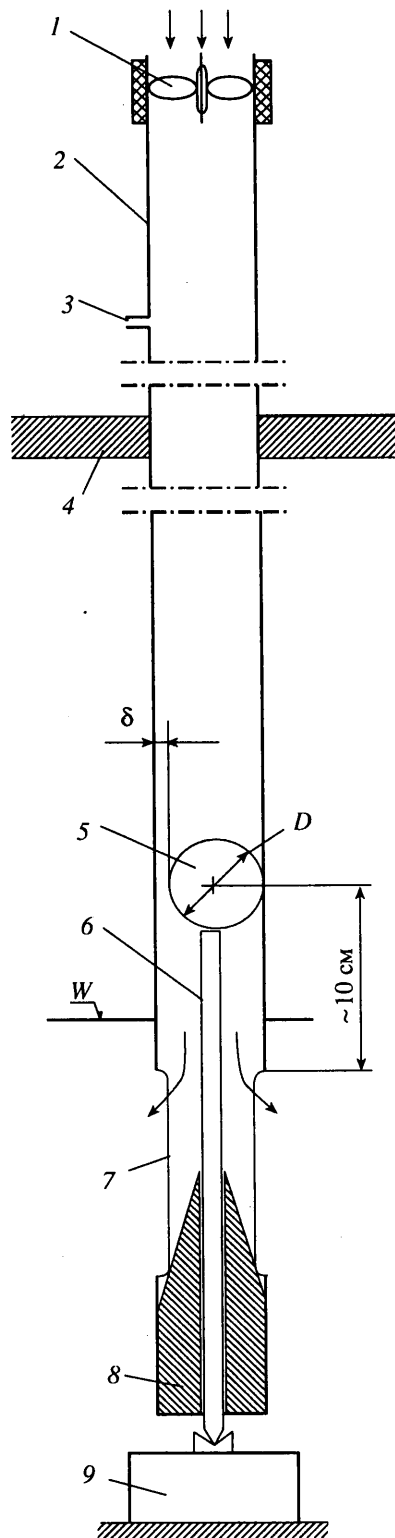
измерялся турборасходомером 1, а при меньших весовым способом, подавалась в жестко закрепленную в массивном основании 4 вертикальную трубу 2 круглого поперечного сечения с внутренним диаметром  $d = 1,57$  см. Нижний конец ее был погружен в бак с фиксированным уровнем поверхности воды.

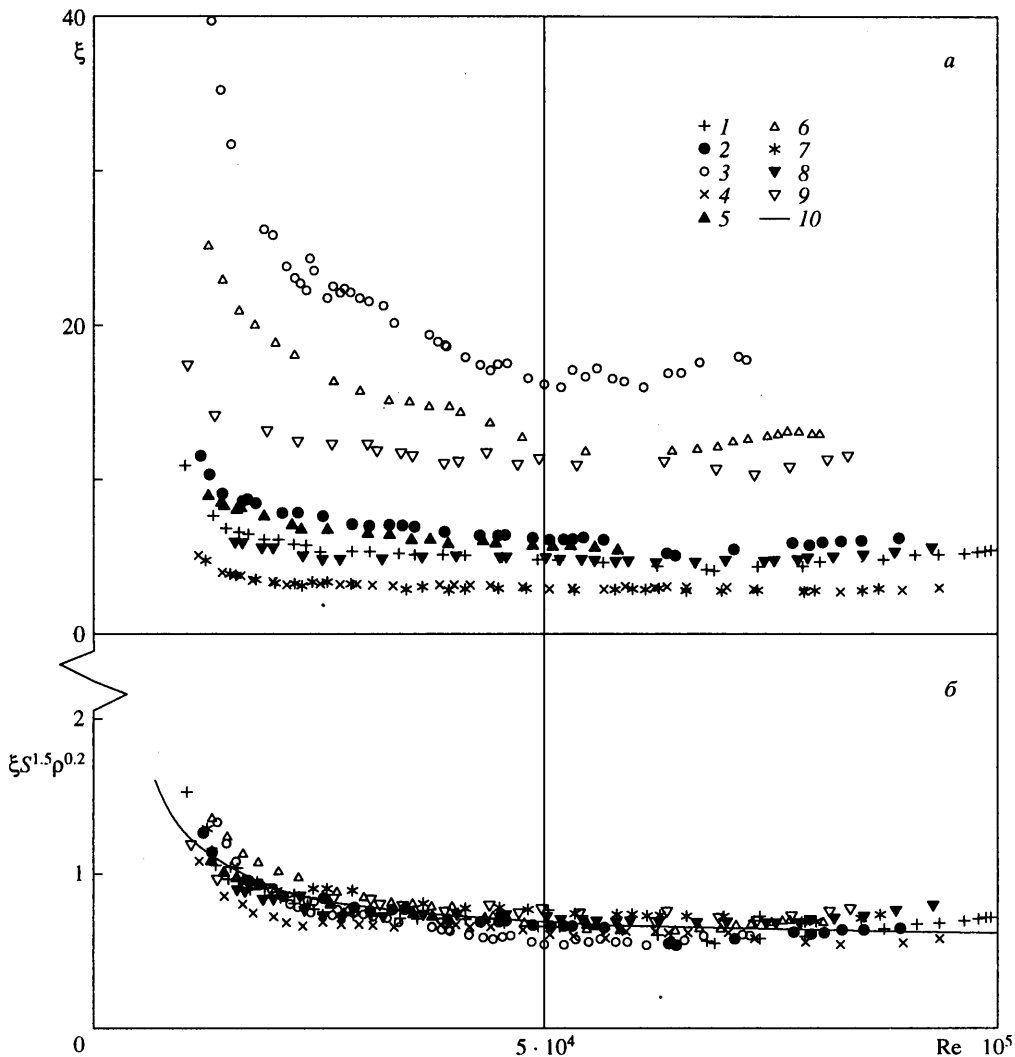
В трубе, на некотором расстоянии от нижнего конца помещался шар 5, который свободно опирался на стержень 6, проходящий через центрирующую вставку 8. Конструкция установки в отличие от описанной в [1] не только фиксировала положение шара в трубе по вертикали, не накладывая при этом ограничений на его колебания в горизонтальной плоскости, но и позволяла измерять силу, действующую на шар. Была предусмотрена также возможность закрепления шара на стержне и проведения опытов с неподвижными шарами, центры которых располагались на оси трубы.

Для определения среднего значения коэффициента гидравлического сопротивления участка трубы с шаром  $\xi = 2\Delta p/(\rho_w V^2)$  измерялось осредненное по времени давление в точке 3 и вычислялась разность  $\Delta p$  между этим и атмосферным давлением (с учетом разницы в уровнях воды). Расстояние от точки 3 до центра шара равнялось 50 см ( $\sim 32d$ ).

С целью уменьшения погрешности определения величины  $\xi$  вследствие загромождения сечения трубы центрирующей вставкой в стенках трубы ниже шара (на расстоянии  $\sim 7d$  от его центра) были сделаны продольные вырезы 7. Специально проведенные при наличии таких вырезов эксперименты с центрирующей вставкой и без нее показали, что значения  $\xi$  в обоих случаях практически одинаковы. Глубина затопления верхней границы вырезов равнялась  $\sim 2d$ .

Нижний конец стержня 6 воздействовал на силоизмеритель 9. Полученное значение осредненной по времени силы  $X$  использовалось для вычисления среднего значения коэффициента сопротивления шара  $C_x = 8X/(\rho_w V^2 \pi D^2)$ . В опытах с шарами, изготовленными из разных материалов, учитывалось соответствующее начальное показание силоизмерителя, зависящее от веса и объема шара.

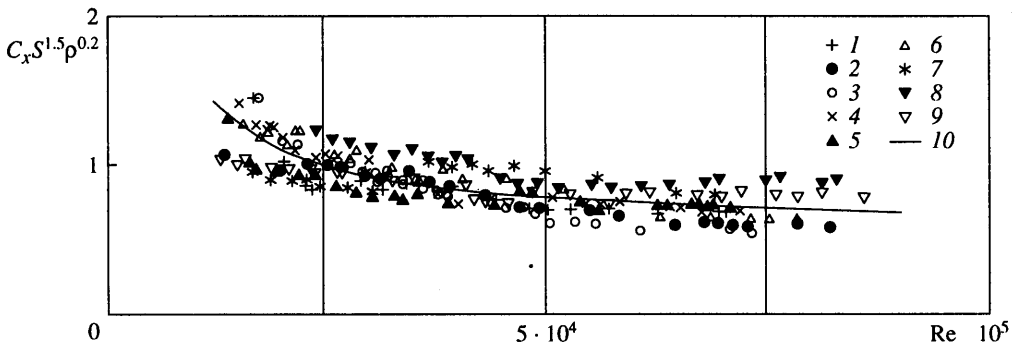




Фиг. 2. Зависимости коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  (а) и величины  $\xi S^{1.5} \rho^{0.2}$  (б) от числа Рейнольдса для участка круглой цилиндрической трубы с колеблющимся поперек потока шаром. Экспериментальные точки 1–3 соответствуют значениям  $\rho = 1.26$  и  $S = 0.260, 0.212, 0.101$ ; точки 4–6 –  $\rho = 2.70$  и  $S = 0.313, 0.212, 0.125$ ; точки 7–9 –  $\rho = 8.57$  и  $S = 0.313, 0.212, 0.125$ . Линия 10 – зависимость (2.1)

Экспериментально определенная собственная частота силоизмерителя составляла  $0,9$  Гц, т.е. была в  $50$ – $100$  раз меньше, чем наблюдавшаяся в опытах частота интенсивных колебаний шара. Это обеспечивало осреднение по времени величины силы сопротивления с необходимой точностью. В опытах с измерением силы  $X$  трение при перемещении стержня внутри центрирующей вставки  $8$  было достаточно малым, что являлось следствием наличия вибрации, вызываемой ударами шара о стенку трубы, и использования специального материала для изготовления вставки.

В опытах исследовалось обтекание шаров, изготовленных из пластмассы, дюрала и латуни с относительной плотностью  $\rho = \rho_s / \rho_w = 1,26; 2,70$  и  $8,57$ . Диаметры шаров были близки соответственно к  $1,2; 1,3$  и  $1,4$  см. При обработке результатов экспериментов для каждого из шаров учитывались их точные размеры, отличающиеся от



Фиг. 3. Зависимость величины  $C_x S^{1.5} \rho^{0.2}$  от числа Рейнольдса для колеблющихся шаров. Экспериментальные точки 1–3 соответствуют значениям  $\rho = 1.26$  и  $S = 0.324, 0.212, 0.101$ ; 4–6 –  $\rho = 2.70$  и  $S = 0.324, 0.221, 0.125$ ; 7–9 –  $\rho = 8.57$  и  $S = 0.313, 0.235, 0.125$ . Линией 10 показана зависимость (2.3)

указанных на десятые доли миллиметра, что при имевших место в опытах малых зазорах  $\delta$  оказалось существенным. Точные значения относительных максимальных зазоров  $S = \delta/D$  указаны в пояснениях к фигурам, на которых представлены экспериментальные данные. В настоящей работе в качестве характерного линейного размера при вычислении числа Рейнольдса используется диаметр трубы  $d$ .

**2. Результаты экспериментов.** Экспериментальные значения коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi = 2\Delta p / (\rho_w V^2)$  для свободно колеблющихся шаров, соответствующих девяти парам комбинаций безразмерных параметров  $S$  и  $\rho$ , приведены на фиг. 2, а, а на фиг. 2, б – соответствующие им значения величины  $\xi S^{1.5} \rho^{0.2}$ .

Показанная на фиг. 2, б сплошной линией зависимость от  $Re$

$$\xi S^{1.5} \rho^{0.2} = 0,53 + 7400/Re \quad (2.1)$$

получена на основе регрессионного анализа всех экспериментальных точек при достаточно высоком значении коэффициента корреляции, равном  $r = 0,88$ .

Из анализа этих и представленных в [1] результатов следует важный вывод о том, что характер зависимости коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  и числа  $Sh$  от  $\rho$  и  $S$  одинаков. Это позволило представить зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от чисел Струхала и Рейнольдса в виде

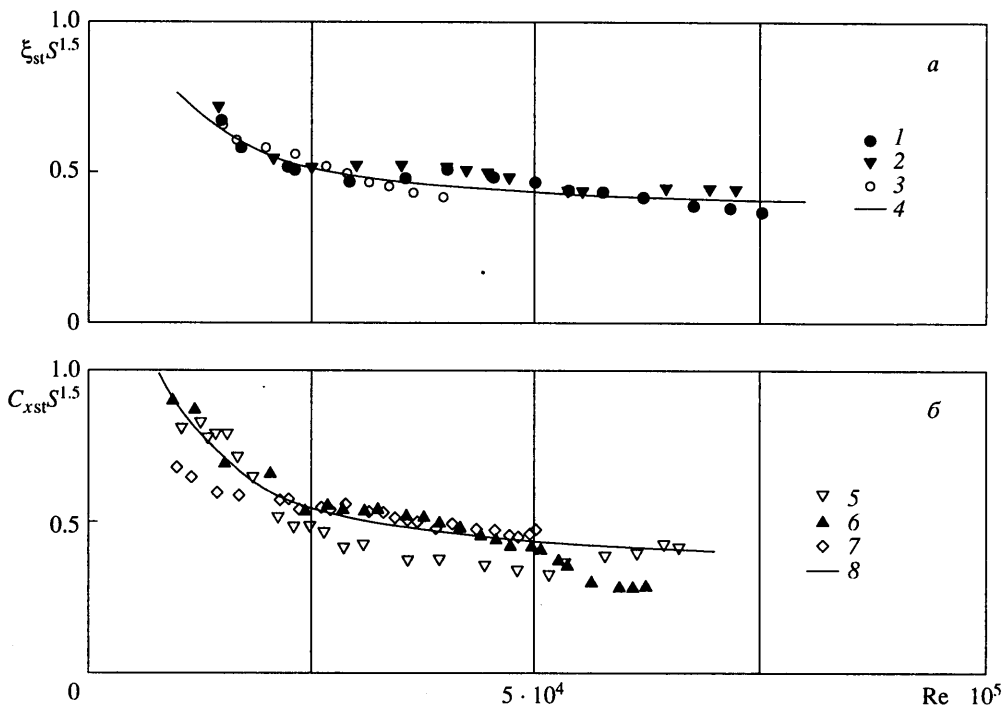
$$\xi = Sh(8 + 110000/Re) \quad (2.2)$$

На фиг. 3 показаны после аналогичной обработки результаты всех опытов по определению коэффициента сопротивления  $C_x$  для свободно колеблющихся шаров. Оказалось, что все приведенные здесь значения величины  $C_x S^{1.5} \rho^{0.2}$  могут быть аппроксимированы линией

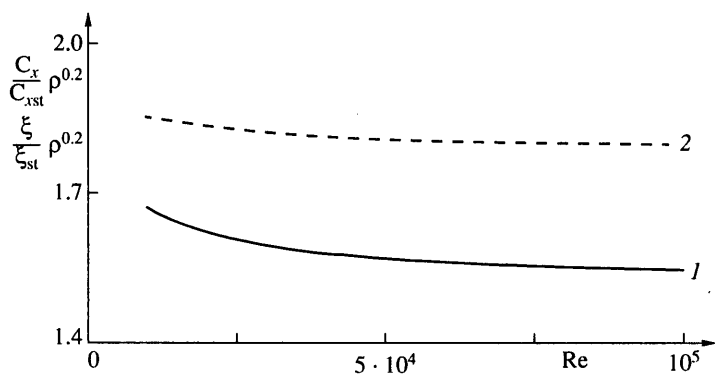
$$C_x S^{1.5} \rho^{0.2} = 0,57 + 10600/Re \quad (2.3)$$

с коэффициентом корреляции  $r = 0,83$ , достаточным для вывода о возможности использования этой зависимости. Снижение величины  $r$  может быть связано, например, с невозможностью полного устранения трения между опорным стрержнем (6) и направляющей вставкой (8) при измерении силы  $X$ .

На фиг. 4, а приведены экспериментальные данные по определению зависимости от числа Рейнольдса значения коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi_{st}$  того же участка трубы в случае стационарного обтекания неподвижных шаров разного размера размещаемых на ее оси, а на фиг. 4, б – результаты определения их коэффициента сопротивления  $C_{xst}$ .



Фиг. 4. Зависимость величины  $\xi_{st} S^{1.5}$  от числа  $Re$  для участка круглой цилиндрической трубы с установленным на ее оси неподвижным шаром (а). Экспериментальные точки 1–3 соответствуют значениям  $S = 0.313, 0.212, 0.125$ . Линией 4 показана зависимость (2.4). Зависимость величины  $C_{xst} S^{1.5}$  от  $Re$  для неподвижных шаров, расположенных на оси трубы (б). Экспериментальные точки 5–7 соответствуют значениям  $S = 0.313; 0.221$  и  $0.150$ . Линией 8 показана зависимость (2.4)



Фиг. 5. Зависимости величин  $(\xi/\xi_{st})\rho^{0.2}$  (линия 1) и  $(C_x/C_{xst})\rho^{0.2}$  (линия 2) от  $Re$ , вычисленные по аппроксимационным формулам для  $\xi, C_x, \xi_{st}$  и  $C_{xst}$

Re	$\frac{\xi}{\xi_{st}} \rho^{0,2}$	$\frac{\xi}{\xi_{st}}$		
		$\rho = 1,26$	2,70	8,57
20000	1,622	1,55	1,33	1,06
40000	1,580	1,51	1,30	1,03
60000	1,562	1,49	1,28	1,02
80000	1,551	1,48	1,27	1,01
100000	1,545	1,47	1,27	1,01

Из анализа представленных в таком виде результатов следует, что значения этих коэффициентов можно считать пропорциональными величине  $S^{-1,5}$ . Как показано на фиг. 4, а и б, все экспериментальные точки могут быть представлены регрессионными линиями

$$\xi_{st} S^{1,5} = 0,35 + \frac{4100}{Re}, \quad C_{xst} S^{1,5} = 0,32 + \frac{5600}{Re} \quad (2.4)$$

с коэффициентами корреляции  $r = 0,93$  и  $0,90$  соответственно.

Представляет интерес сравнение значений коэффициентов  $\xi$  и  $C_x$  при обтекании колеблющихся шаров с их значениями  $\xi_{st}$  и  $C_{xst}$  в случае стационарного обтекания этих же шаров, зафиксированных на оси трубы. Из приведенных выше результатов следует, что в рассмотренном диапазоне значений Re отношения этих параметров не зависят от величины относительного стеснения потока  $S$  и являются обратно пропорциональными относительной плотности шаров  $\rho$  в степени 0,2.

На фиг. 5 показаны зависимости от числа Рейнольдса величин  $(\xi/\xi_{st})\rho^{0,2}$  и  $(C_x/C_{xst})\rho^{0,2}$ , вычисленные по указанным выше аппроксимационным формулам для  $\xi$ ,  $C_x$ ,  $\xi_{st}$  и  $C_{xst}$ . Колебание шаров всегда приводит к повышению значений  $\xi$  и  $C_x$ , зависящему от относительной плотности материала шара. Для пластмассового шара, например, при  $Re = 10^5$  значение коэффициента гидравлического сопротивления возрастает на 50%. Значения  $\xi/\xi_{st}$  для нескольких других значений  $\rho$  и Re даны в таблице.

Описанные в настоящей работе результаты относятся главным образом к режимам бескавитационного обтекания шаров. Переход к режимам с частичной естественной кавитацией в окрестности шара, которые при больших стеснениях потока, как правило, наблюдались в конце рассмотренного диапазона значений числа Рейнольдса, не приводил к нарушению непрерывности и монотонного характера получаемых зависимостей.

Специальное исследование показало, что в условиях проводимых опытов искомые динамические характеристики не зависят от длины консольного участка  $L$  трубопровода и упругопластических свойств материалов, из которых были изготовлены труба и шары.

**Заключение.** Средние по времени значения коэффициента местного сопротивления трубопровода  $\xi$  и коэффициента сопротивления  $C_x$  шара, обтекаемого в трубопроводе в автоколебательном режиме свободного перемещения поперек потока с ударным взаимодействием со стенкой трубы, полностью определяются значениями числа Струхала и числа Рейнольдса.

В рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса  $10^4 \leq Re \leq 10^5$  коэффициент  $\xi$  для участка трубы с колеблющимся в нем шаром, безразмерная частота автоколебаний  $Sh$  и коэффициент  $C_x$  одинаково зависят от относительной плотности шаров  $\rho$  и относительной величины зазора между шаром и стенкой трубы  $S$ , т.е. значение каждого из них пропорционально  $\rho^{-0,2}$  и  $S^{-1,5}$ .

В отличие от числа  $Sh$  коэффициенты  $\xi$  и  $C_x$  меняются при изменении числа  $Re$  в указанном диапазоне его значений. Эта зависимость может быть представлена в виде  $a + b/Re$ , где  $a$  и  $b$  – константы.

При стационарном обтекании шара в трубе его коэффициент сопротивления  $C_{xst}$  и коэффициент гидравлического сопротивления участка трубы с шаром  $\xi_{st}$  зависят от относительного стеснения потока  $S$  так же, как и при автоколебаниях этого шара, т.е. они пропорциональны  $S^{-1.5}$ .

Наличие колебаний шаров всегда приводит к повышению значений  $\xi$  и  $C_x$ , величина которого зависит от относительной плотности шара  $\rho$  и числа  $Re$ . С уменьшением  $\rho$  влияние колебаний шара становится все более существенным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 98-01-00152).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карликов В.П., Резниченко Н.Т., Шоломович Г.И. Об автоколебаниях тел плохообтекаемой формы при сильном загромождении ими потока в трубе // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 2. С. 136–143.

Москва

Поступила в редакцию  
14.IX.2000