

УДК 532.58.81

© 2005 г. В. П. КАРЛИКОВ, А. Н. ХОМЯКОВ, Г. И. ШОЛОМОВИЧ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРОВ, СИЛЬНО ЗАГРОМОЖДАЮЩИХ ПОТОК В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

Представлены результаты проводимых в Институте механики МГУ исследований поведения и обтекания свободных тел плохообтекаемой формы, сильно загромождающих поток в трубах или каналах. Изучалось сопротивление круговых цилиндров разных размеров и массы при бескавитационном обтекании их водой в режиме поперечных автоколебаний в плоском канале прямоугольного поперечного сечения. Опыты проводились в диапазонах чисел Рейнольдса (по диаметру цилиндра)  $1.7 \cdot 10^4 \leq Re \leq 7.2 \cdot 10^4$  при относительных загромождениях потока по площади поперечного сечения  $\bar{S}$  в диапазоне  $0.76 \leq \bar{S} \leq 0.9$  и отношениях плотности цилиндров и воды  $1.29 \leq \rho_s/\rho \leq 8.2$ . Рассматривался только случай интенсивных поперечных автоколебаний, сопровождающихся ударным взаимодействием цилиндров со стенкой канала. Получена зависимость среднего за период значения коэффициента сопротивления цилиндров  $C_x$  от основных безразмерных определяющих параметров. Уточнена указанная в [1] зависимость для безразмерной частоты автоколебаний. Сделано сопоставление кинематических и динамических особенностей обтекания в режиме поперечных автоколебаний шаров в цилиндрических трубах и цилиндров в плоских каналах.

*Ключевые слова:* обтекание круговых цилиндров, автоколебания, сильное загромождение, частота автоколебаний, коэффициент сопротивления.

Обзор исследований нестационарного обтекания тел в трубах и каналах содержится в [2, 3]. К наименее изученным относится случай, когда тела являются плохообтекаемыми, сильно загромождают поток и обладают при этом свободой перемещения в поперечном к нему направлении.

Экспериментально изучалось обтекание в бескавитационном режиме водой колеблющихся шаров с различной массой и размерами в цилиндрической трубе [4, 5]. В этих опытах относительное загромождение  $\bar{S}$  изменялось в пределах  $0.6 \leq \bar{S} \leq 0.8$ , а отношение  $\rho_s/\rho$  плотности шаров к плотности воды  $1.2 \leq \rho_s/\rho \leq 8.6$ . В исследованном диапазоне чисел Рейнольдса  $10^4 \leq Re \leq 10^5$  всегда наблюдались автоколебания шаров, сопровождающиеся ударным взаимодействием их со стенкой трубы. Было отмечено, что механизм возбуждения таких автоколебаний связан, главным образом, с характером высокоградиентного течения в проточной части между шаром и стенкой трубы, а не с отрывом вихрей и образованием вихревого спутного следа, как в случае обтекания свободных тел безграничным или малостесненным потоком.

Безразмерная частота автоколебаний шаров  $Sh$  (число Струхалия) и среднее за период значение их коэффициента сопротивления  $C_x$  в этих опытах оказались существенно зависящими от относительного загромождения шарами потока и от относительной плотности материалов, из которых они были изготовлены. Опыты свидетельствовали о пренебрежимо слабой зависимости числа Струхалия и достаточно заметной зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса.

Серия аналогичных исследований проводилась и с цилиндрами различной массы и размеров, колеблющимися при очень больших загромождениях потока в плоском ка-

нале [1]. Рассматривалось обтекание при числах Рейнольдса  $Re = vD/\nu$  в диапазоне  $1.5 \cdot 10^4 \leq Re \leq 6.5 \cdot 10^4$ . Здесь  $v$  – средняя скорость потока в канале,  $D$  – диаметр цилиндра,  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости. Степень относительного стеснения потока характеризовалась в этих опытах значением параметра  $\bar{\delta} = \delta/D$ , где  $\delta$  – разность между шириной канала и диаметром цилиндра. Этот параметр связан с относительным загромождением потока по площади поперечного сечения  $\bar{S}$  соотношением  $\bar{S} = 1/(1 + \delta)$ . Было получено приближенное соотношение, связывающее число Струхала  $Sh = fD/\nu$  ( $f$  – частота автоколебаний) только с величинами  $\bar{\delta}$  и  $\rho_c/\rho$ , т.е., как и в случае автоколебаний шаров, оказалось возможным пренебречь с определенной точностью зависимостью числа Струхала от числа Рейнольдса. Приближенный теоретический анализ частоты автоколебательных режимов перемещения цилиндров в каналах сделан в [6].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального изучения динамической характеристики – среднего за период значения коэффициента сопротивления цилиндров, свободно колеблющихся поперек потока воды в плоском канале.

Поскольку в этой серии опытов использовалась новая усовершенствованная система сбора и обработки результатов измерений, позволившая существенно увеличить число опытов, а также осуществить более тщательную градуировку измерительных устройств, была уточнена и приведенная в [1] зависимость для основной кинематической характеристики – числа Струхала.

**1. Экспериментальный стенд и система измерений.** Конструкция экспериментального стенда во многом совпадает с описанной в [1]. Рабочий участок проточной части представлял собой вертикальный канал длиной 70 см прямоугольного поперечного сечения с размерами  $51 \times 21$  мм. Существенное различие состояло лишь в том, что нить, на которой подвешивался цилиндр, теперь присоединялась к датчику, позволяющему измерить силу, действующую на цилиндр в направлении натекающего потока.

Для того чтобы на величине измеряемой силы не могло сказываться изменение статического давления, узел ввода нити в рабочий участок был выполнен в виде сильфонной коробочки, состоявшей из двух сообщающихся одинаковых сильфонов, которые при изменении давления в системе создавали равные по величине силы противоположного знака.

Скорость потока измерялась с помощью расходомера – ротационного датчика расхода; сила, действующая на цилиндр, – датчиком силы (У9В/0.5 kN). Частота автоколебаний цилиндра определялась фотоприемником, фиксирующим число пересечений луча лазера колеблющимся цилиндром.

Сигналы от датчиков, расходомера, фотоприемника через усилители поступали в аналого-цифровой преобразователь и компьютер. Вся измерительная аппаратура подключалась к источнику питания.

Как и ранее в [1], опыты проводились с цилиндрами из пластмассы, дюралюминия и латуни. В приводимой таблице указаны номер цилиндра  $N$ , его диаметр  $D$ , объем  $V$ , масса  $M$  и соответствующие им значения относительной плотности  $\rho_c/\rho$  и параметра  $\bar{\delta}$ . Измерение силы потребовало усовершенствования способа крепления нити к цилиндрам, что вызвало необходимость введения в них дополнительных металлических (стальных) вставок. Это привело к некоторому изменению значений средней плотности цилиндров по сравнению с указанными в [1].

**2. Результаты опытов.** Эксперименты выполнялись при значениях режимных параметров, исключавших возникновение естественной кавитации в окрестности цилиндров. В этом случае из анализа размерностей следует, что искомые параметры –

Материал цилиндра	$N$	$D$ , мм	$V$ , см <sup>3</sup>	$M$ , г	$\rho_c/\rho$	$\delta/D$
Пластик	1	38.9	24.36	31.51	1.29	0.31
»	2	41.5	27.32	35.21	1.29	0.23
»	3	45.9	33.26	42.90	1.29	0.11
Дюраль	4	41.5	27.46	77.31	2.82	0.23
»	5	45.9	33.42	94.20	2.82	0.11
Латунь	6	38.9	24.13	197.80	8.20	0.31
»	7	41.5	27.46	225.20	8.20	0.23
»	8	45.9	33.76	277.10	8.20	0.11

число Струхала  $Sh$  и среднее за период значение коэффициента сопротивления  $C_x$  могут быть представлены в виде

$$Sh = \frac{fD}{v} = \varphi\left(\text{Re}, \frac{\rho_c}{\rho}, \frac{\delta}{D}, E_i\right), \quad C_x = \frac{2X}{\rho v^2 DH} = \psi\left(\text{Re}, \frac{\rho_c}{\rho}, \frac{\delta}{D}, E_i\right)$$

Здесь  $H$  – высота цилиндров,  $E_i = \varepsilon_i/(\rho v^2)$  – безразмерные параметры, характеризующие упругие свойства материалов.

Обработка с помощью метода наименьших квадратов найденных в новой серии опытов значений безразмерной частоты автоколебаний при  $1.5 \cdot 10^4 \leq 7.2 \leq 10^4$  позволяет аппроксимировать совокупность экспериментальных точек на фиг. 1 линией 1 и получить для числа Струхала следующее приближенное универсальное соотношение:

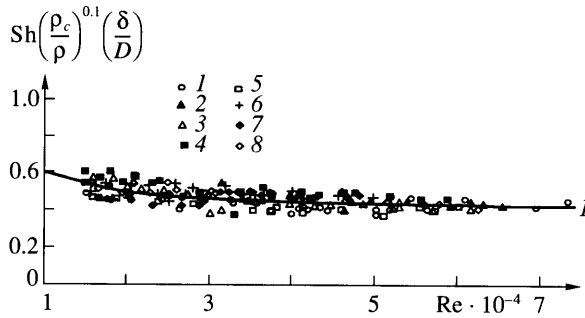
$$Sh \approx \left(\frac{\delta}{D}\right)^{-1} \left(\frac{\rho_c}{\rho}\right)^{-0.1} \left(0.4 + \frac{2100}{\text{Re}}\right)$$

несколько отличающееся от указанного в [1], которое имело вид

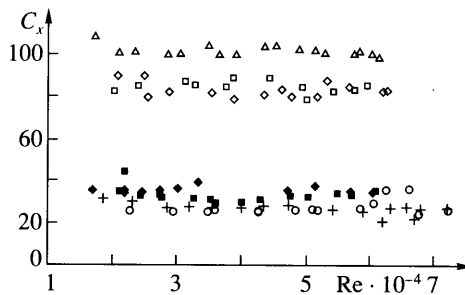
$$Sh \approx \left(\frac{\delta}{D}\right)^{-0.97} \left(\frac{\rho_c}{\rho}\right)^{-0.17} 0.42$$

Таким образом, усовершенствование методики измерения параметров и обработки результатов позволило выявить наличие определенной зависимости безразмерной частоты автоколебаний от числа Рейнольдса, более заметной в первой половине диапазона его значений. Зависимость числа Струхала от величины относительного зазора между цилиндром и стенкой рабочей части  $\delta/D$  практически не изменилась (показатель стал равным  $-1$  вместо  $-0.97$ ), в то время как зависимость от отношения плотности колеблющегося цилиндра к плотности воды оказалась более слабой, чем было указано в [1] (показатель равен  $-0.1$  вместо  $-0.17$ ). В пределах точности проводившихся измерений зависимость числа Струхала от параметров  $E_i$ , как и в опытах с шарами, в исследованных диапазонах автоколебательных режимов не была выявлена. Оценка пренебрежимо малых вкладов в измеряемые характеристики, связанных с наличием нити и трения на торцевых участках цилиндров, сделана в [1].

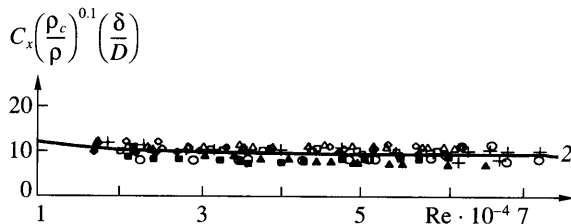
Найденная в опытах при  $1.7 \cdot 10^4 \leq \text{Re} \leq 7.2 \cdot 10^4$  совокупность средних за период значений коэффициента сопротивления цилиндра  $C_x$  от параметров  $\rho_c/\rho$ ,  $\delta/D$  и  $\text{Re}$  показана на фиг. 2. Эти значения на порядок и более превышают получаемые обычно



Фиг. 1. Универсальная зависимость числа Струхали  $Sh$  от  $\delta/D$ ,  $\rho_c/\rho$  и  $Re$ . Нумерация точек соответствует таблице



Фиг. 2. Средние за период значения коэффициента сопротивления  $C_x$  при различных  $\delta/D$ ,  $\rho_c/\rho$  и  $Re$ . Обозначения те же, что на фиг. 1



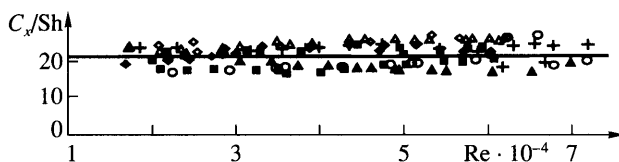
Фиг. 3. Универсальная зависимость среднего за период значения коэффициента сопротивления  $C_x$  от  $\delta/D$ ,  $\rho_c/\rho$  и  $Re$ . Обозначения те же, что на фиг. 1

в этом диапазоне чисел  $Re$  при стационарном обтекании цилиндров нестесненным потоком.

Совокупность этих точек можно аппроксимировать показанной на фиг. 3 линией 2 приближенной универсальной зависимостью, из которой для  $C_x$  получается формула

$$C_x \approx \left(\frac{\delta}{D}\right)^{-1} \left(\frac{\rho_c}{\rho}\right)^{-0.1} \left(9.1 + \frac{33100}{Re}\right)$$

Таким образом, как и в случае обтекания колеблющихся шаров в цилиндрической трубе, коэффициент сопротивления  $C_x$  и число Струхали  $Sh$  в пределах имевшей место точности получения результатов оказались одинаково зависящими от степени



Фиг. 4. Зависимость  $C_x/Sh$  от числа  $Re$ . Обозначения те же, что на фиг. 1

относительного стеснения потока и относительной плотности материала цилиндров (показатели  $\delta/D$  и  $\rho_c/\rho$  совпадают для  $Sh$  и  $C_x$ ).

Обнаруженная весьма слабая зависимость параметров  $Sh$  и  $C_x$  от числа  $Re$  в рассматриваемом диапазоне его значений подчеркивает определяющую роль в изучаемом режиме обтекания инерционного и связанного с распределением давления в проточной части между цилиндрами и стенкой канала механизмов.

Об этом же свидетельствует почти постоянное значение отношения  $C_x/Sh$ , равное приблизительно 21.6 при  $1.7 \cdot 10^4 \leq Re \leq 7.2 \cdot 10^4$  (фиг. 4).

Аналогичное приближенное соотношение  $C_x/Sh \approx 12$  следует также из результатов опытов с обтеканием колеблющихся шаров в цилиндрической трубе [5]. Однако оно выполняется только в некоторой части исследованного там диапазона числа Рейнольдса ( $5.6 \cdot 10^4 \leq Re \leq 10^5$ ).

Слабая зависимость от  $Re$  и прямая пропорциональность коэффициента сопротивления числу Струхала для частоты отрыва вихрей наблюдаются и при стационарном обтекании цилиндров в определенных диапазонах чисел Рейнольдса при отсутствии стеснения потока твердыми границами. Например, в проведенных многими авторами опытах со стационарным обтеканием круглых цилиндров в некоторых докризисных и закризисных областях, а именно диапазонах  $10^4 \leq Re \leq 10^5$  и  $5 \cdot 10^6 \leq Re \leq 10^7$ , имеют место соответственно соотношения  $C_x/Sh \approx 6$  и  $C_x/Sh \approx 3$  [2].

Весьма значительный разброс экспериментальных точек в проведенных опытах с шарами и цилиндрами характерен и для экспериментов со стационарным обтеканием тел, мало стесняющих поток, в диапазонах чисел Рейнольдса, примыкающих к области кризисного режима. Наличие сильного загромождения потока не исключает возникновения аналогичной ситуации и в обсуждаемых опытах.

Достаточно высокая относительная погрешность результатов в рассматриваемых опытах связана, очевидно, и с некоторыми конструктивными особенностями установки, например, использованием для подвески цилиндров упругой нити. Кроме того, она обусловлена и большим числом трудно контролируемых при нестационарном обтекании факторов, связанных с существом изучаемых явлений, такими, как отрывной характер обтекания, степень турбулентности натекающего потока, шероховатость поверхности тел и стенок канала и т.п.

**Заключение.** Среднее за период значение коэффициента сопротивления  $C_x$  цилиндра, обтекаемого без кавитации при  $1.7 \cdot 10^4 \leq Re \leq 7.2 \cdot 10^4$  в плоском канале в автоколебательном режиме свободного перемещения поперек потока с ударным взаимодействием со стенкой канала, как и в случае шаров в цилиндрических трубах, полностью определяется значениями чисел Струхала  $Sh$  и Рейнольдса  $Re$ .

В этом диапазоне чисел  $Re$  коэффициент сопротивления цилиндров  $C_x$  и безразмерная частота автоколебаний  $Sh$  одинаково зависят от относительной плотности цилиндров  $\rho_c/\rho$  и параметра  $\delta/D$ , характеризующего степень стеснения потока. Для определения  $C_x$  и  $Sh$  справедлива формула

$$\left(\frac{\delta}{D}\right)^{-1} \left(\frac{\rho_c}{\rho}\right)^{-0.1} \left(a + \frac{b}{Re}\right)$$

где  $a = 9.1$ ,  $b = 33100$  для  $C_x$  и  $a = 0.4$ ,  $b = 2100$  для  $Sh$ .

В пределах точности проведенных экспериментов установлена прямая пропорциональность коэффициента сопротивления  $C_x$  числу Струхала  $Sh$ .

Авторы благодарят С.Л. Толоконникова за помощь при оформлении статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 05-01-00375) и фонда поддержки ведущих научных школ РФ (проект № НШ-1481.2003.1).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карликов В.П., Лукашевич М.В., Резниченко Н.Т., Шоломович Г.И. Об автоколебаниях свободных цилиндров, сильно загромождающих поток в плоском канале // Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика, механика. 2004. № 3. С. 35–40.
2. Девнин С.А. Аэромеханика плохообтекаемых конструкций. Л.: Судостроение, 1983. 331 с.
3. Мэрис А. Обзор исследований по вихревым дорожкам, периодическим следам и индуцированным явлениям вибрации // Теорет. основы инж. расчетов. 1964. № 2. С. 23–28.
4. Карликов В.П., Резниченко Н.Т., Шоломович Г.И. Об автоколебаниях тел плохообтекаемой формы при сильном загромождении ими потока в трубах // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 2. С. 136–143.
5. Карликов В.П., Резниченко Н.Т., Шоломович Г.И. О динамических эффектах обтекания в трубах колеблющихся тел, сильно загромождающих поток // Изв. РАН. МЖГ. 2001. № 4. С. 122–128.
6. Молодых О.В., Степанов Г.Ю. Расчет поперечных квазистационарных автоколебаний кругового цилиндра при отрывном обтекании несжимаемой жидкостью в плоском канале // Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика, механика. 2004. № 3. С. 40–44.

Москва

Поступила в редакцию  
5.V.2005