

УДК 532.58.81

© 2000 г. В.П. КАРЛИКОВ, Н.Т. РЕЗНИЧЕНКО, Г.И. ШОЛОМОВИЧ

ОБ АВТОКОЛЕБАНИЯХ ТЕЛ ПЛОХООБТЕКАЕМОЙ ФОРМЫ ПРИ СИЛЬНОМ ЗАГРОМОЖДЕНИИ ИМИ ПОТОКА В ТРУБЕ

Приведены результаты экспериментального исследования обтекания в круглой цилиндрической трубе шара, сильно загромождающего поток и обладающего возможностью свободного перемещения лишь в поперечном к потоку направлении. Рассматривался только случай интенсивных колебаний, когда имело место ударное взаимодействие шара со стенкой трубы. Опыты проводились в диапазоне значений числа Рейнольдса $10^4 \leq Re \leq 10^5$ в стальной и медной трубах при нескольких значениях массы шара и величины максимального зазора между шаром и стенкой трубы. Для измерения частоты автоколебаний разработан способ, основанный на регистрации ее только при резонансных режимах, возникающих при совпадении частоты колебаний шара с собственной частотой колебаний трубы. Была осуществлена кинофотосъемка течений в окрестности шаров при различных расходах воды. Выявлены основные безразмерные параметры, характеризующие рассматриваемое явление, и с приемлемой точностью установлено универсальное соотношение, связывающее их с безразмерной частотой автоколебаний.

Исследование поведения и нестационарного обтекания размещенных в трубопроводах тел плохообтекаемой формы, существенно загромождающих поток и обладающих возможностью свободного перемещения только в поперечном к натекающему потоку направлению, является сложной, малоизученной и представляющей значительный научный и практический интерес гидродинамической проблемой.

Весьма полный обзор результатов многочисленных исследований свободных и вынужденных колебаний плохообтекаемых тел в потоках представлен в справочнике [1]. Значительное место в нем уделено результатам исследований протяженных цилиндров с различной формой поперечного сечения, причем, как правило, рассматриваются случаи незначительного загромождения или полного его отсутствия. Подробный анализ большого числа работ, в которых изучалось колебание в безграничном потоке цилиндров с круглым поперечным сечением, содержится в [2].

В ряде работ (см., например, библиографию в [3]) рассматривалось только стационарное обтекание тел с загромождением потока, причем относительная величина его не превышала 0,5. Основной целью этих исследований являлось отыскание наиболее совершенной методики внесения поправок в результаты силовых измерений при испытаниях в аэродинамических трубах.

Проведенные авторами опыты показывают, что при сильном загромождении потока в круглой трубе телами плохообтекаемой формы, обладающими свободой перемещения в поперечном направлении, уже при относительных загромождениях, превышающих 0,6, существуют широкие диапазоны значений определяющих параметров (расходов, плотностей тел и жидкости и др.), в которых наблюдается режим автоколебаний обтекаемых тел, сопровождающийся интенсивным периодическим соударением их со стенкой трубопровода, а в случае капельной жидкости и регулярным возникновением за ними высокоскоростных кавитирующих струй [4].

Фиг. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – расходомер, 2 – массивное основание, 3 – труба, 4 – шар, 5 – нить, 6 – уровень воды, 7 – датчик вибраций

Исследование таких режимов обтекания важно не только в связи с их недостаточной изученностью, но и с практическими приложениями, поскольку такие течения могут сопровождаться вибрацией трубопровода, сильным шумом, разрушением стенки трубопровода как вследствие ударов тела, так и из-за кавитационной эрозии.

Некоторые из этих эффектов наблюдались и даже специально создавались в бурильных колоннах нефтяных скважин для освобождения их от прихватов, для интенсификации процесса разрушения гидратно-парафиновых пробок в газовых скважинах Уренгойского месторождения [5]. Однако эффективность их использования не была высокой из-за отсутствия информации о закономерностях указанного явления.

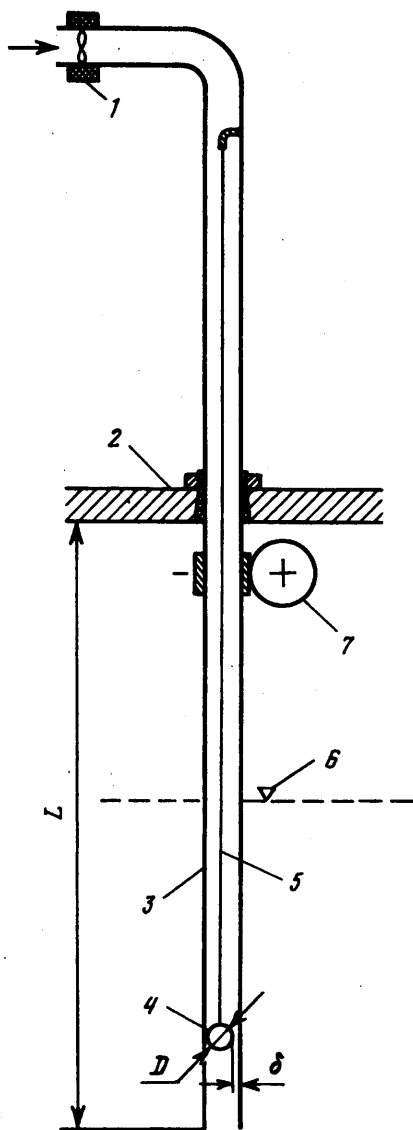
Еще одним примером проявления отмеченных выше эффектов является случай обтекания неисправных элементов в запорных устройствах (вентилях) обычного водопровода.

Особый интерес представляют резонансные режимы, возникающие при совпадении частот колебаний обтекаемых тел с собственной частотой трубопровода, когда указанные эффекты резко усиливаются.

Настоящая работа содержит некоторые результаты проводимых в Институте механики МГУ фундаментальных исследований указанных нестационарных режимов обтекания тел. Их цель – расширение представления о механизме явления возбуждения автоколебаний тел, выявление характера зависимости частоты колебаний и наблюдаемых динамических эффектов от основных определяющих параметров, установление зависимости значения критического числа Рейнольдса и коэффициента сопротивления от степени загромождения потока, а также получение выводов о возможности практического использования или устранения таких режимов обтекания тел.

В работе описаны исследования частоты поперечных автоколебаний тел сферической формы (шаров) при большом загромождении ими потока воды в круглой цилиндрической трубе, консольно закрепленной в массивном основании. Изучалась зависимость частоты таких автоколебаний от расхода воды, относительной плотности тел, степени загромождения потока, параметров, характеризующих упругие и пластические свойства материалов шаров и использованных труб, в случае интенсивных колебаний, когда имеет место ударное взаимодействие между шаром и стенкой трубы.

Для получения представления о характере течения в окрестности тела и его поведения при различных расходах воды проведены специальные опыты в цилиндри-



ческой трубе из оргстекла. В этом случае проводилась киносъемка, а также фото-съемка с временем экспозиции $2 \cdot 10^{-6}$ с.

1. Описание установки. Схема использованной установки приведена на фиг. 1. Вода, расход которой измерялся турборасходомером, подавалась в жестко закрепленную в массивном основании вертикальную трубу круглого поперечного сечения с внутренним диаметром d , в которой на некотором расстоянии от конца ее консольного участка помещался шар с диаметром $D = d - \delta$, где δ – величина максимального зазора между шаром и стенкой трубы. Продольному перемещению шара препятствовала подвеска его на тонкой нити достаточно большой длины ($\approx 65d$), которая допускала свободное поперечное перемещение шара. Специально проведенные опыты показали несущественность при выбранной длине нити вклада от силы натяжения ее в совокупность боковых сил, действующих на шар.

Способ закрепления трубы позволял легко изменять длину ее консольного участка L и, следовательно, частоту собственных колебаний этого участка. Нижняя часть трубы погружалась в воду в баке с фиксированным уровнем ее поверхности. Длина погруженной части трубы при изменении L , естественно, также менялась. Вблизи основания к трубе был прикреплен датчик из комплекта аппаратуры ВИ-6 для измерения частоты вибраций трубы. Эксперименты выполнялись с медной и стальной трубами, имевшими внутренний диаметр, равный 1,57 см.

Исследования проводились с шарами, изготовленными из трех различных материалов (пластмасса, дюралюминий, латунь), имеющих относительную плотность $\rho = \rho_s/\rho_w = 1,44; 2,88$ и $8,66$, где ρ_w – плотность воды.

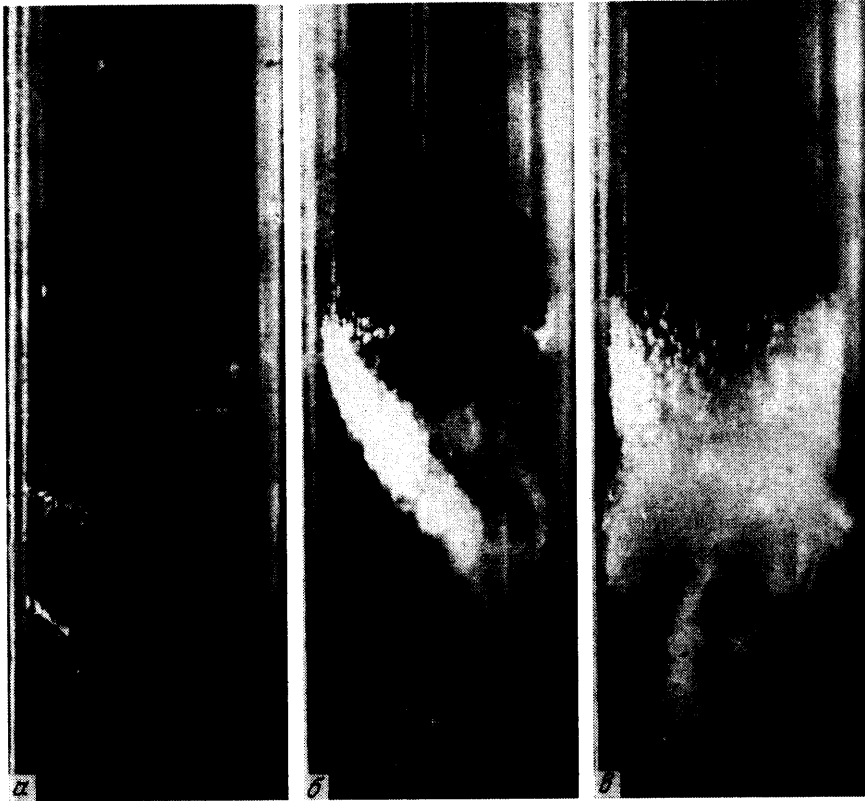
В опытах использовались по три шара из каждого материала, диаметры которых $D = 1,37; 1,29$ и $1,20$ см, а относительные максимальные зазоры $S = \delta/D = 0,15; 0,22$ и $0,31$, что соответствовало значениям относительного загромождения по площади сечения $B = D^2/d^2 = 0,76; 0,67$ и $0,58$.

2. Методика измерений. Значительное внимание было уделено выбору способа регистрации частоты автоколебаний. После анализа и апробации большого числа известных способов был разработан и использован новый способ, состоящий в регистрации вынужденных колебаний консольного участка трубы с обтекаемым вблизи его конца шаром. Было установлено, что наибольшая достоверность результатов при этом достигается в случае, когда измерение частоты колебаний осуществляется при резонансных режимах, т.е. при совпадении собственных частот колебаний шара и этого участка трубы, поскольку именно при таких режимах запись колебаний наиболее легко поддается расшифровке [6].

Для получения зависимости частоты колебаний шара от расхода воды проводилась серия опытов при различных значениях собственной частоты колебаний консольного участка трубы, что обеспечивалось за счет изменения его длины от 20 до 60 см.

При фиксированной длине консольной части трубы L и плавном изменении расхода жидкости Q от его значения, при котором возникает ударное взаимодействие шара со стенкой трубы, до позволяемой экспериментальной установкой максимальной величины с помощью шлейфового осциллографа регистрировалась вызванная колебаниями шара вибрация этой части трубы. На осциллограмме заметно выделялись участки записи с существенно увеличенными амплитудами, что было связано в резонансными, возникающими при совпадении частоты колебаний шара с частотой основного тона собственных колебаний консольной части трубы или кратными ей частотами. Величина расхода жидкости, соответствовавшая первому участку с резонансной частотой, фиксировалась и при этом расходе производилась запись вибраций с увеличенной скоростью протяжки ленты осциллографа. По этой записи определялась частота колебаний шара. Далее указанная процедура повторялась при другой длине L .

Для того чтобы убедиться, что в рассматриваемых случаях именно первый резонансный участок соответствовал частоте основного тона собственных колебаний консольной части трубы, была выполнена оценка ее значений во всем исследованном

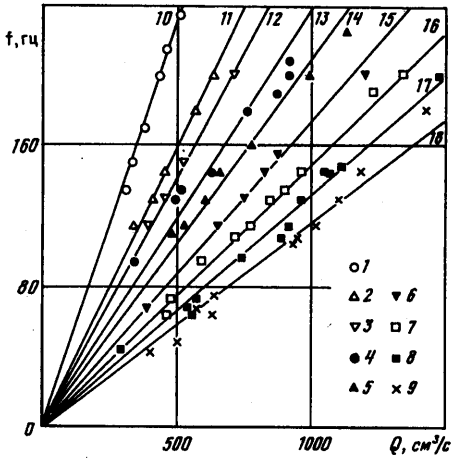


Фиг. 2. Фотографии режимов течения в окрестности шара, сделанные с экспозицией $2 \cdot 10^{-6}$ с при разных расходах воды: *а, б* – колеблющиеся шары, *в* – стабилизированное течение без колебаний с развитой кавитационной полостью

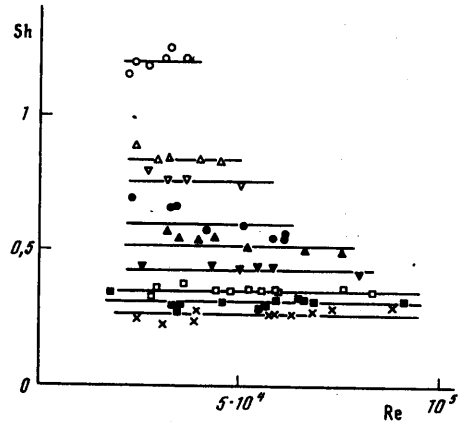
диапазоне длин L . Эти значения были определены и расчетом [7], и экспериментально, путем измерения частоты свободных колебаний консольного участка трубы, вызванных нанесением поперечного удара по ее концу. Поскольку этот участок трубы погружен в воду, при расчетном определении собственной частоты учитывалось присутствие заполняющей его воды, а также наличие соответствующей присоединенной массы.

Величина диапазона измеренных частот колебаний шаров была лимитирована либо прекращением ударов о стенку трубы в связи с достижением развитого кавитационного режима обтекания, когда течение становится стационарным, либо, если такой режим не достигнут, диапазоном рассмотренных значений длин консольного участка трубы.

3. Результаты опытов. Представление о некоторых возможных режимах обтекания дают фотоснимки, сделанные с экспозицией $2 \cdot 10^{-6}$ с при трех значениях расхода $Q_1 < Q_2 < Q_3$ (фиг. 2). Первые два из них относятся к течениям, сопровождающимся ударным взаимодействием шара со стенкой трубы. На снимке 2, *а* хорошо заметна слева последовательность двух кольцевых вихрей в потоке, образовавшихся, по-видимому, при срыве потока с шара со стороны проточной части в моменты предыдущих ударов его о противоположную часть стенки трубы, а также аналогичные вихри справа, возникшие незадолго до момента съемки. Ядра этих вихрей стали видимыми из-за наполнения их насыщенным паром воды и воздухом, содержащимся в значительном количестве в водопроводной воде.



Фиг. 3



Фиг. 4

Фиг. 3. Зависимости частоты колебаний от расхода жидкости для шаров при $S = 0,15$ и $\rho = 1,44; 2,88; 8,66$ (точки 1–3), $S = 0,22$ и $\rho = 1,44; 2,88; 8,66$ (точки 4–6), $S = 0,31$ и $\rho = 1,44; 2,88; 8,66$ (точки 7–9). Прямые 10–18 – аппроксимации этих зависимостей по методу наименьших квадратов

Фиг. 4. Зависимости числа Струхала $Sh = fD/V_0$ от числа Рейнольдса $Re = V_0D/\nu$. Обозначения экспериментальных точек те же, что на фиг. 3. Прямые соответствуют линейным аппроксимациям на той же фигуре

На снимке 2, б в окрестности шара наблюдается присоединенная к левой его стороне локальная кавитационная полость, начинающаяся в узкой части проточного участка и затем отклоняющаяся в область пониженного давления за шаром.

На снимке 2, в хорошо видна практически симметричная развитая каверна. Колебания шара при этом уже отсутствуют, т.е. наличие полностью развитой каверны за шаром стабилизирует течение в его окрестности. Структура поверхности кавитационных полостей на снимках является характерной для обычных стационарных каверн за гладкими телами при фотосъемке с малым временем экспозиции.

Экспериментальные зависимости частоты колебаний f от расхода Q для всех испытанных шаров и труб показаны на фиг. 3.

Анализ этих результатов свидетельствует о наличии для каждой пары значений рассмотренных комбинаций S и ρ прямой пропорциональной зависимости частоты колебаний от расхода и, следовательно, от средней скорости потока в трубе $V_0 = 4Q/\pi d^2$. При этом среднее квадратичное отклонение значений коэффициента пропорциональности для любой из экспериментальных точек не превышает 10%.

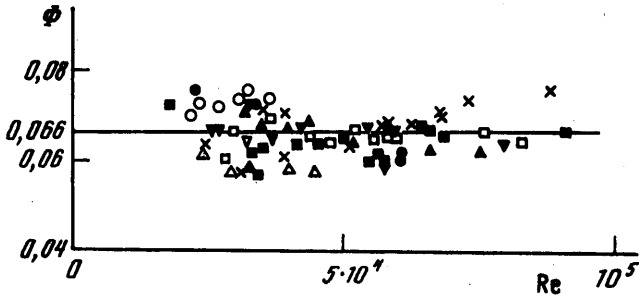
Из общих соображений $f = f(\delta, d, V_0, \rho_w, \rho_s, \nu, \epsilon_i, p_d)$, где ν – кинематический коэффициент вязкости, ϵ_i – параметры, характеризующие упругие и пластические свойства материалов, из которых изготовлены шары и трубы, p_d – давление насыщенных паров воды.

Из теории размерностей следует, что безразмерная частота автоколебаний – число Струхала

$$Sh = \frac{fD}{V_0} = \varphi(Re, \rho, S, E_i, \sigma), \quad Re = \frac{V_0 D}{\nu}, \quad E_i = \frac{\epsilon_i}{\rho_w V_0^2}$$

где Re – число Рейнольдса, σ – число кавитации.

На фиг. 4 представлена зависимость $Sh = Sh(Re)$ при фиксированных значениях остальных безразмерных параметров. Слабая зависимость Sh от Re находится в соот-



Фиг. 5. Значения величины $\Phi = (\delta/D)^{1,5}(\rho_s/\rho_w)^{0,19}Sh$ для всей совокупности экспериментальных данных. Обозначения экспериментальных точек те же, что на фиг. 3. Прямая соответствует значению этой величины, найденному методом наименьших квадратов

ветствии с установленной в опытах прямой пропорциональностью размерной частоты f скорости V_0 . Это позволяет сделать вывод о практическом отсутствии зависимости безразмерной частоты в исследованном диапазоне определяющих параметров и от параметров E_i и σ , содержащих V_0 , а также от их отношения, поскольку результаты опытов с разными значениями ϵ_i и режимных параметров совпадают.

В результате дальнейшего анализа была установлена зависимость (фиг. 5)

$$\left(\frac{\delta}{D}\right)^{1,5} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right)^{0,19} Sh \approx K = 0,066 \quad (1)$$

В этом выражении показатели степеней, как и значение $K = 0,066$, для всей совокупности экспериментальных данных найдены с помощью метода наименьших квадратов. Отклонение значений K от $0,066$ в различных опытах с вероятностью 95% не превосходит $0,0097$, т.е. составляет не более 14,7% величины K , а среднеквадратичная погрешность определения самой величины K при этом равна $0,0012$, т.е. 1,8%.

Универсальное соотношение (1), связывающее число Струхали с параметром δ/D , характеризующим относительное стеснение потока, и отношением плотностей шара и воды, для практических целей можно представить в виде

$$Sh \approx 0,07 \left(\frac{\delta}{D}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right)^{-\frac{1}{5}} \approx 0,2(1-B)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right)^{-\frac{1}{5}}$$

Таким образом, в случае очень больших загромождений потока ($\delta/D \ll 1$) и ударного взаимодействия со стенкой трубы существенными безразмерными параметрами, определяющими характер колебаний шаров, являются только геометрический параметр, связанный со степенью стеснения потока, и отношение плотностей шара и воды, т.е. параметр, учитывающий их инерционные свойства.

По поводу обнаруженного и требующего специального изучения отсутствия зависимости безразмерной частоты от параметров Re , E_i и σ можно высказать ряд следующих соображений общего характера.

Обтекание протяженных цилиндров поперечным безграничным потоком как в стационарном, так и в режиме с колебаниями сопровождается формированием в их окрестности и последующем отрывом от них вихрей, образующих далее либо вихревой упорядоченный след, либо становящихся составной частью турбулентного следа [1]. Именно это обстоятельство вызывает перераспределение давлений на поверхности цилиндров, обеспечивающее возникновение поперечных сил, являющихся

причиной колебаний. Течение в окрестности цилиндра, следовательно, и безразмерная частота его колебаний в случае безграничного потока могут зависеть от числа Рейнольдса, особенно в докризисном и кризисном режимах.

Однако в изученном случае ограниченного стенками потока при очень большом загромождении его наиболее существенную роль в создании поперечных сил, действующих на шар и стенку трубы, играет течение с большими градиентами давления в сильно стесненном участке проточной части, геометрия которого зависит от размера шара и меняется с изменением его положения в трубе. Это течение и поток в трубе являются существенно турбулентными, чем и объясняется практическое отсутствие зависимости числа Струхала от числа Рейнольдса.

Кроме того, здесь имеет место весьма своеобразное проявление инерционных свойств жидкости, поскольку присоединенная масса шара теперь существенно зависит не только от его размера, но и от расстояния между ним и стенкой трубы.

Хорошо известный "отгалкивающий" эффект стенки, обусловленный инерционностью воды, может являться фактором, сильно влияющим на характер ударного взаимодействия шара со стенкой трубы, превращая удар, например, в абсолютно неупругий или в удар с очень небольшим коэффициентом восстановления. Вследствие этого различие в упругих и пластических свойствах материалов шаров и труб, а значит, и параметры E , могут быть несущественными.

Наконец, можно объяснить несущественность вклада кавитационных эффектов в величину боковых сил в начальной стадии кавитации тем, что пониженное давление в кормовой половине шара, в тех ее частях, где нет кавитации, мало отличается от давления в области кавитации, а основной вклад в величину боковых сил, очевидно, связан с распределением давлений в головной части шара, которое не должно существенно зависеть от числа кавитации.

При режимах, когда развитые кавитационные полости поочередно возникают с разных сторон шара, сделать какие-либо выводы о роли кавитации затруднительно, поскольку диапазон существования таких режимов весьма узок и переход к симметричной каверне, стабилизирующей течение, происходит очень быстро, что и проявляется в экспериментах как мгновенное прекращение колебаний. Вопрос о вкладе кавитации в рассматриваемый процесс требует специального изучения.

Все приведенные соображения о возможных причинах несущественности ряда безразмерных определяющих параметров имеют отношение только к кинематической характеристике – частоте колебаний шара. Наоборот, при рассмотрении проблемы определения силы сопротивления, которую испытывают стационарно обтекаемые и колеблющиеся тела при очень большом загромождении потока, при решении вопроса о величине критического значения числа Рейнольдса, о величине местного сопротивления, вызываемого колеблющимся телом, влияние некоторых из указанных безразмерных параметров может оказаться определяющим.

Заключение. При обтекании шаров, сильно загромождающих поток воды внутри цилиндрической трубы и обладающих возможностью свободно перемещаться в поперечном направлении, существуют устойчивые автоколебательные режимы, сопровождающиеся интенсивным ударным взаимодействием со стенкой трубы.

Установлено принципиальное отличие природы боковых сил, вызывающих поперечные колебания плохообтекаемых тел, в рассмотренном случае от случая обтекания их безграничным или малостесненным потоком жидкости или газа.

В отличие от безграничного потока, где поперечные силы обусловлены главным образом распределением давления на поверхности обтекаемого тела, связанным с отрывом вихрей и образованием вихревого спутного следа, в рассмотренном случае соответствующее распределение давления связано в основном с характером высокоградиентного течения в проточной части между телом и стенкой трубы.

Это течение существенно зависит от поперечных размеров тела и трубы, от расхода жидкости в ней, от меняющейся со временем формы проточной части и от инерционных свойств тела и жидкости.

В случае капельной жидкости в этом потоке может возникать кавитация, которая при интенсивном ее развитии становится даже основной причиной стабилизации потока и прекращения колебаний.

Установлена прямая пропорциональность частоты автоколебаний шаров средней скорости потока воды в трубе и получено в результате обработки данных экспериментов простое приближенное соотношение, связывающее безразмерную частоту автоколебаний (число Струхали) со степенью относительного загромождения потока и отношением плотности шара и воды. Это соотношение свидетельствует о недогнотворности представленной в [5] приближенной формулы, найденной в квазистационарной постановке без учета наличия у шара присоединенной массы.

Указаны возможные причины практической независимости в исследованных диапазонах значений определяющих параметров числа Струхали от числа Рейнольдса, от безразмерных параметров, характеризующих упругие и пластические свойства материалов шаров и труб, и от числа кавитации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 98-01-00152).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девнин С.А. Аэромеханика плохообтекаемых конструкций. Л.: Судостроение, 1983. 331 с.
2. Мэррис А. Обзор исследований по вихревым дорожкам, периодическим следам и индуцированным явлениям вибрации // Теоретические основы инженерных расчетов. 1964. № 2. С. 23–28.
3. Фаррел К., Карраскуэл С., Гювен О., Пател В. Влияние стенок аэродинамической трубы на обтекание круглых цилиндров и моделей градирни // Теоретические основы инженерных расчетов. 1977. № 3. С. 124–136.
4. Иванников В.И., Карликов В.П. и др. Исследование струйно-вибрационного способа разрушения материалов // Отчет Ин-та механики МГУ. 1991. № 4099. 51 с.
5. Лохин В.В., Манвелов Э.А., Погосян В.А. и др. Принцип действия и частота колебаний гидровибратора // Проблемы технологии сооружения газовых и газоконденсатных скважин. Сб. научных трудов ВНИИГАЗ. М. 1985. С. 60–63.
6. Карликов В.П., Миронов А.Е., Резниченко Н.Т., Шоломович Г.И. Резонансный метод определения частоты поперечных колебаний плохообтекаемых тел, сильно загромождающих поток в трубе // Отчет Института механики МГУ. 1998. № 4536. 22 с.
7. Ананьев И.В. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем. М.-Л.: ОГИЗ, Гостехиздат. 1946. 290 с.

Москва

Поступила в редакцию
15.VI.1999