

Вращательные и поступательные колебания цилиндров малого удлинения в воздушном потоке

А. Н. Рябинин, А. А. Велигжанин

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: *Рябинин А. Н., Велигжанин А. А.* Вращательные и поступательные колебания цилиндров малого удлинения в воздушном потоке // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2022. Т. 9 (67). Вып. 4. С. 729–739. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2022.414>

Рассматриваются вращательные и поступательные колебания трех цилиндров, отличающихся отношением длины к диаметру цилиндра (удлинением). Цилиндры подвешивались в рабочей части аэродинамической трубы малых скоростей на проволочной подвеске, содержащей стальные пружины. В равновесном положении ось цилиндров направлена горизонтально и параллельно вектору скорости набегающего потока. Под действием воздушного потока цилиндры могли совершать вращательные или поступательные колебания. К двум пружинам подвески присоединены полупроводниковые тензопреобразователи, измеряющие во время колебаний периодически изменяющееся натяжение пружин. Аналоговый сигнал с тензопреобразователей поступал на РС-осциллограф, который в цифровом виде передавал его на компьютер. После градуировки прибора и расшифровки сигнала определялись частоты и амплитуды поступательных колебаний в вертикальном направлении и вращательных колебаний вокруг горизонтальной оси, проходящей через центр цилиндра и перпендикулярной вектору скорости набегающего потока. Оказалось, что в исследуемом диапазоне удлинений цилиндра происходит переход от вращательных колебаний к поступательным. Цилиндр с удлинением 1.9 под действием ветра совершает установившиеся вращательные колебания, амплитуда которых растет с увеличением скорости воздушного потока. Ранее предложенная математическая модель правильно предсказывает вращательные колебания. Квадрат амплитуды вращательных колебаний является линейной функцией числа Струхала, если скорость воздушного потока достаточно велика. Поступательные колебания цилиндра с удлинением 1.9 являются затухающими. Уменьшение удлинения цилиндра до 1.5 сопровождается уменьшением амплитуд вращательных колебаний. При малых скоростях воздушного потока зарегистрированы поступательные колебания с малой амплитудой. Дальнейшее уменьшение удлинения до 1.0 ведет к полному отсутствию вращательных колебаний. Амплитуда поступательных колебаний растет. Поступательные колебания реализуются в ограниченном диапазоне скоростей воздушного потока.

Ключевые слова: аэродинамическая труба, вращательные колебания, поступательные колебания, тензометрия, цилиндр.

1. Введение. Колебания различных грузов, переносимых вертолетом на внешней подвеске, могут быть опасны, когда амплитуда их колебаний под влиянием воздушного потока превысит допустимые значения. В частности, когда форма переносимого груза представляет собой цилиндр малого удлинения, снабженный стабили-

заторм, реализуются вращательные колебания цилиндра [1, 2]. Груз на подвеске представляет собой физический маятник. Когда частота вращательных колебаний близка к частоте колебаний маятника, возникает неконтролируемое раскачивание груза до опасных значений. Возможны и поперечные колебания, в которых тело движется по дуге большого радиуса, равного длине подвески. Экспериментальному изучению этих явлений посвящена настоящая работа.

Математические модели поступательных колебаний плохо обтекаемых тел в потоке, называемых галопированием, развивались на основе квазистационарного приближения, в котором предполагается, что нормальная аэродинамическая сила зависит только от мгновенного угла атаки. Коэффициент нормальной аэродинамической силы может быть определен в аэродинамической трубе, в которой тело неподвижно закреплено под заданным углом атаки. Одна из первых моделей предложена в статье [3]. В статье предполагалось, что коэффициент нормальной силы можно аппроксимировать полиномом угла атаки. В работе [4] установлено, что для квадратной призмы полином должен быть седьмого порядка. Квазистационарная модель позднее применялась для описания галопирования цилиндров с различным поперечным сечением (треугольным, ромбовидным, прямоугольным) [5–7].

Модель вращательных колебаний цилиндра с отношением длины к диаметру, равным двум, предложена в работах [2, 8]. В этих работах в экспериментах в аэродинамической трубе изучались чисто вращательные колебания. Цилиндр закреплялся таким образом, что возможны были только вращательные колебания вокруг фиксированной оси. В настоящей работе исследуется поведение цилиндров, которые могут совершать как вращательные, так и поступательные колебания.

Помимо галопирования существуют другие механизмы возникновения колебаний плохо обтекаемых тел в воздушном потоке. Например, причиной колебаний может быть периодический вихревой след за телом, который существует за неподвижным телом и (или) формируется в результате колебаний.

2. Экспериментальный метод. Объектом исследования были три круговых цилиндра, отличающиеся отношением длины L к диаметру D . Цилиндры диаметром $D = 140$ мм изготовлены из дерева. Длина цилиндров L составляла 260, 205 и 140 мм. Опыты выполнялись на аэродинамической трубе АТ-12 Санкт-Петербургского государственного университета [9], имеющей открытую рабочую часть. Диаметр выходной части сопла круглого сечения 1.5 м. Модели подвешивались в рабочей части аэродинамической трубы на проволочной подвеске, содержащей стальные пружины. В равновесном положении ось цилиндров направлена параллельно вектору средней скорости набегающего потока. Использовались подвески двух типов.

На рис. 1 изображена схема эксперимента с использованием подвески, содержащей шесть стальных пружин.

Эта подвеска позволяла осуществлять только вращательные колебания относительно горизонтальной оси, проходящей через центр цилиндра и перпендикулярной вектору скорости набегающего потока, и колебания, близкие к поступательным, которые совершаются по дуге большого радиуса (1.3 м). Колебания близки к вертикальным.

Схема эксперимента с подвеской второго типа изображена на рис. 2. Подвеска содержала восемь пружин.

Подвеска позволяла колебаться с шестью степенями свободы, но в эксперименте с цилиндрами с удлинением $L/D = 1.0$ и $L/D = 1.5$ наблюдались только вращатель-

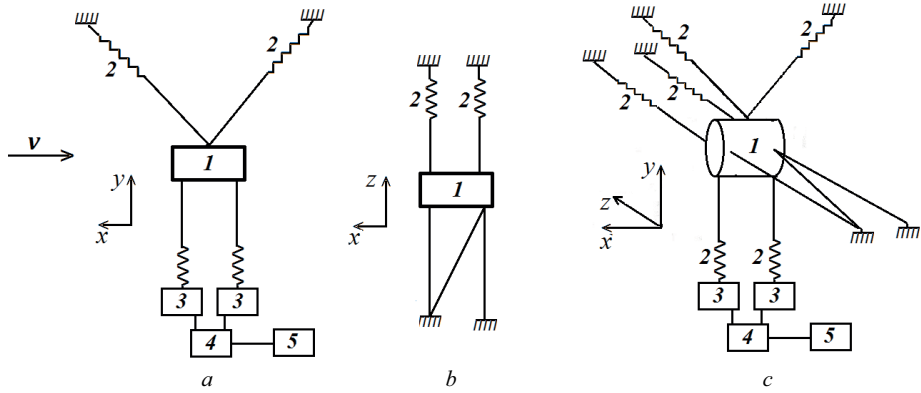


Рис. 1. Схема эксперимента с шестью пружинами: *a* — вид сбоку; *b* — вид сверху; *c* — аксонометрическая проекция; 1 — цилиндр, 2 — пружины, 3 — полупроводниковые тензопреобразователи, 4 — РС-осциллограф, 5 — компьютер.

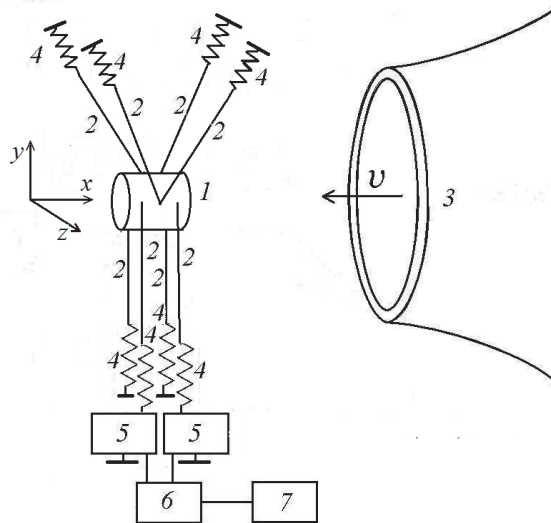


Рис. 2. Схема эксперимента с восемью пружинами: 1 — цилиндр, 2 — проволоочные тяги, 3 — сопло, 4 — пружины, 5 — полупроводниковые тензопреобразователи, 6 — РС-осциллограф, 7 — компьютер.

ные колебания относительно горизонтальной оси, проходящей через центр цилиндра и перпендикулярной вектору скорости набегающего потока, и поступательные колебания в вертикальном направлении. Собственные частоты поступательных и вращательных колебаний зависели в наших экспериментах от массы, моментов инерции моделей, от приведенной жесткости пружинной подвески. Кроме того, частота вращательных колебаний зависела от расстояния между точками крепления нижних тяг подвески. Отношение собственных частот поступательных колебаний не равнялось целому числу. Частоты приводятся ниже.

Полупроводниковые тензопреобразователи С-50 измеряли натяжение двух нижних пружин. РС-осциллограф *Velleman PCS500A* преобразовывал аналоговый сигнал, поступающий с тензопреобразователей, в цифровой и передавал его на компьютер. Данные записывались в файл и затем обрабатывались. Частота опроса тензопреобразователей составляла 100 Гц или 1250 Гц. При частоте опроса 100 Гц сигнал записывался в файл в течение 17 с, файл содержал 1700 измерений. При частоте опроса 1250 Гц в файл в течение 3.3 с записывалось 4095 измерений.

Сигнал пропорционален натяжению пружин. Оказалось, что частота колебаний не зависит от скорости набегающего потока. При отсутствии потока в рабочей части колебания цилиндров на упругой подвеске были затухающими, а частота колебаний в пределах погрешности эксперимента оставалась такой же, как и в колебаниях под воздействием воздушного потока. Этот факт свидетельствует о малости аэродинамических сил по сравнению с упругими силами, действующими со стороны подвески.

Натяжение пружин в экстремумах зависимости сигнала от времени равно натяжению пружин при действии постоянной нагрузки. Поэтому при градуировке, во время которой на цилиндр навешивался груз известной массы, измерялся коэффициент, равный отношению смещения точки крепления тяги, связанной с пружиной к изменению сигнала, пропорционального изменению натяжения пружины. Принималось, что этот коэффициент связывает амплитуду колебаний натяжения с амплитудой колебаний точки крепления тяги.

Все эксперименты повторялись не менее 5 раз.

3. Обработка результатов эксперимента. Принималось, что вертикальная координата точек крепления тяг y_{ji} ($j = 1, 2, i = 1, 2, \dots, n$) в момент времени t_i является суммой гармонической функции $B_j \cos \omega t_i + C_j \sin \omega t_i$, где ω — угловая частота колебаний, постоянной составляющей E_j и случайной величины ξ_{ji} , представляющей собой экспериментальную погрешность:

$$y_{ji} = B_j \cos \omega t_i + C_j \sin \omega t_i + E_j + \xi_{ji}. \quad (1)$$

Случайная величина ξ_{ji} имеет нулевое математическое ожидание. Коэффициенты B_j, C_j, E_j в выражении (1) можно определить методом наименьших квадратов, минимизируя сумму квадратов $\sum_{i=1}^n \xi_{ji}^2$. Определение коэффициентов B_j, C_j, E_j сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. Амплитуды колебаний двух точек крепления тяг вычисляются по формуле $a_j = \sqrt{B_j^2 + C_j^2}$. Можно определить также сдвиг фаз между колебаниями двух точек.

Для чисто поступательных колебаний сдвиг фаз между колебаниями двух точек равен нулю, для чисто вращательных колебаний — π . Точки крепления тяг на цилиндре располагались симметрично относительно центра масс. Поэтому вертикальная координата центра масс $y_i = (y_{1i} + y_{2i})/2$. С учетом выражения (1) можно записать

$$y_i = B \cos \omega t_i + C \sin \omega t_i + E + \xi_i, \quad (2)$$

где $B = (B_1 + B_2)/2$; $C = (C_1 + C_2)/2$; $E = (E_1 + E_2)/2$; $\xi_i = (\xi_{1i} + \xi_{2i})/2$. Методом наименьших квадратов определяются коэффициенты B, C в выражении (2), затем вычисляется амплитуда поступательных колебаний A_y . Удобно представлять амплитуду поступательных колебаний в безразмерном виде:

$$A = \frac{A_y \omega}{v},$$

где v — скорость набегающего потока. Для чисто поступательных колебаний безразмерная таким образом амплитуда представляет собой амплитуду мгновенного угла атаки.

Синус угла наклона цилиндра θ_i в момент времени t_i выражается формулой $\sin \theta_i = (y_{1i} - y_{2i})/l$, где l — расстояние между точками крепления тяг. Тогда с учетом малости угла θ_i имеем

$$\theta_i = B_\theta \cos \omega t_i + C_\theta \sin \omega t_i + E_\theta + \xi_i. \quad (3)$$

Методом наименьших квадратов определяются коэффициенты $B_\theta, C_\theta, E_\theta$ в выражении (3), затем вычисляется амплитуда вращательных колебаний A_θ .

Число n выбиралось таким образом, чтобы выборка охватывала от одного до трех периодов колебаний. Затем полученные значения амплитуды осреднялись, если колебания были установившимися. Далее в статье все амплитуды представлены в безразмерном виде.

4. Цилиндр с удлинением $L/D = 1.9$. В статье [2] приводится математическая модель вращательных колебаний цилиндра, которая получила экспериментальное подтверждение в опытах с цилиндром с удлинением $L/D = 2$. Эксперименты были выполнены с моделью цилиндра, которая имела только одну степень свободы — могла вращаться вокруг оси, проходящей через центр цилиндра и перпендикулярной вектору скорости набегающего потока. Модель предсказывает, что квадрат амплитуды вращательных установившихся колебаний при достаточно большой скорости набегающего потока является линейной функцией числа Струхала Sh :

$$A_\theta^2 = a - bSh, \quad Sh = \frac{L}{vT}, \quad (4)$$

где T — период колебаний.

В опытах с цилиндром с удлинением $L/D = 1.9$ наблюдались только вращательные установившиеся колебания, и, при достаточно большой скорости потока зависимость квадрата амплитуды от числа Струхала близка к линейной зависимости (рис. 3, *a*). Амплитуда вращательных колебаний при увеличении скорости потока асимптотически стремится к постоянной величине. Параметр a — асимптотическое значение квадрата амплитуды колебаний. При очень большой скорости потока демпфированием колебаний в подвеске можно пренебречь. Эксперименты с вращательными колебаниями проводились в диапазоне чисел Рейнольдса от $1 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^5$.

Частота вращательных колебаний цилиндра на упругой подвеске с шестью пружинами равна 6.2 Гц. Частота опроса полупроводниковых тензопреобразователей составляла 1250 Гц. Режимов с постоянной амплитудой поступательных колебаний не наблюдалось. Поступательные затухающие колебания удавалось возбудить, отклоняя цилиндр в вертикальном направлении и затем отпуская. Колебания затухали тем быстрее, чем выше была скорость потока воздуха. Частота поступательных колебаний равна 2.4 Гц. Частота опроса прибора 100 Гц. Эксперименты с поступательными колебаниями проводились в диапазоне чисел Рейнольдса от $7 \cdot 10^4$ до $1.2 \cdot 10^5$. На рис. 3, *b* представлена зависимость логарифмического декремента поступательных колебаний от скорости набегающего потока. На этом графике нанесена точка, полученная при нулевой скорости воздушного потока. Сравнение декрементов поступательных колебаний без потока и в потоке на рис. 3, *b* и 5, *b* позволяет сделать вывод о влиянии аэродинамических сил на затухание колебаний.

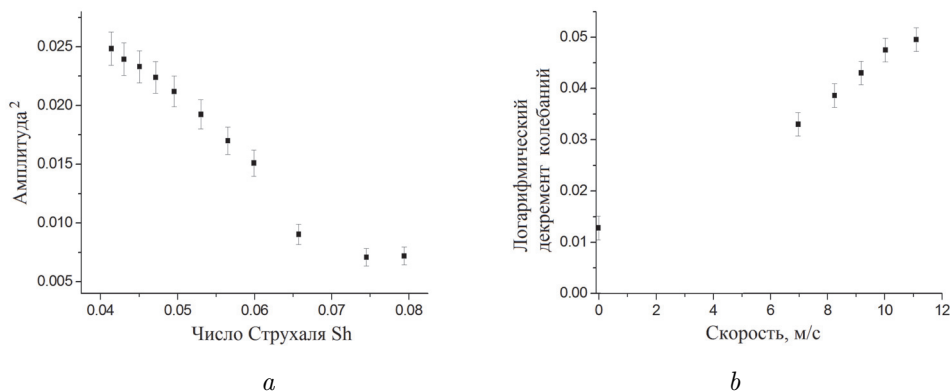


Рис. 3. Колебания цилиндра с удлинением $L/D = 1.9$, подвеска с шестью пружинами: a — зависимость квадрата амплитуды установившихся вращательных колебаний от числа Струхала; b — зависимость логарифмического декремента поступательных колебаний от скорости воздушного потока.

К. Скрутон в 1948 г. сформулировал критерий подобия, которым следует руководствоваться при переносе данных аэродинамического эксперимента по вращательным колебаниям моделей мостов на реальные объекты [10]. Он сделал вывод, что критическая скорость ветра, при которой возникают вращательные колебания, зависит только от формы сооружения и от безразмерной комбинации:

$$\frac{I_{\theta} \delta_{\theta}}{\rho b^4}, \quad (5)$$

где I_{θ} — момент инерции единицы длины конструкции; δ_{θ} — логарифмический декремент вращательных колебаний; b — характерный поперечный размер конструкции; ρ — плотность воздуха. Этот критерий может быть сформулирован и для поступательных колебаний [11]:

$$\frac{m \delta_y}{\rho b^2}, \quad (6)$$

где m — масса единицы длины конструкции; δ_y — логарифмический декремент поступательных колебаний. Последнее выражение, умноженное на числовой коэффициент (чаще всего 2), использовалось многими исследователями под названием числа Скрутона и вошло в стандарт Евросоюза по расчету ветровых нагрузок [12].

В нашей работе изучались тела малого удлинения, но и для таких тел можно по образцу (5) и (6) выписать и применять критерии подобия при моделировании вращательных и поступательных колебаний:

$$Sc_{\theta} = \frac{I_z \delta_{\theta}}{\rho S L^3}, \quad Sc_y = \frac{M \delta_y}{\rho S L}, \quad (7)$$

где I_z — момент инерции; S — площадь поперечного сечения; L — длина цилиндра; M — масса цилиндра.

Число Скрутона Sc_y для поступательных колебаний цилиндра удлинения 1.9 в наших опытах равно 5.9. Число Скрутона Sc_{θ} для вращательных колебаний цилиндра удлинения 1.9 равно 2.3.

На графиках рис. 3 и последующих нанесены 95%-ные доверительные интервалы, определенные с учетом разброса в повторяющихся экспериментальных измерениях.

5. Цилиндр с удлинением $L/D = 1.0$. В отличие от цилиндра с удлинением $L/D = 1.9$ цилиндр с удлинением $L/D = 1.0$ колеблется в потоке только поступательно. Причем колебания происходят в узком интервале малых скоростей воздушного потока. Число Рейнольдса в интервале установившихся поступательных колебаний находится в диапазоне от $5 \cdot 10^4$ до 10^5 . Зависимость безразмерной амплитуды поступательных колебаний от числа Струхала представлена на рис. 4. Зависимость не типична для галопирования. По-видимому, в этом случае имеет место механизм возникновения колебаний, связанный с формированием в следе периодической вихревой цепочки.

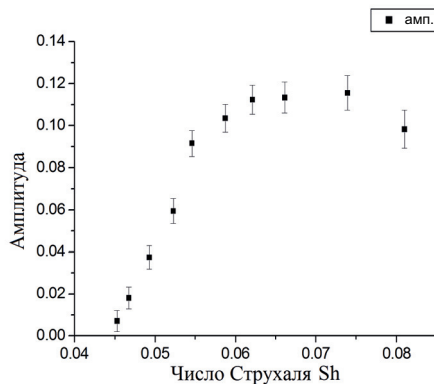


Рис. 4. Зависимость амплитуды поступательных колебаний цилиндра с удлинением $L/D = 1.0$ от числа Струхала, подвеска с семью пружинами. Число Скрудона $Sc_y = 4.4$.

Частота поступательных колебаний цилиндра на подвеске с восемью пружинами составляла 3.3 Гц. Частота опроса тензопреобразователей 100 Гц.

6. Цилиндр с удлинением $L/D = 1.5$. Цилиндр с удлинением $L/D = 1.5$ испытывался с разными типами подвесок. В режимах, которые характеризуются установившимися вращательными колебаниями, амплитуды колебаний были значительно меньше, чем амплитуды вращательных колебаний цилиндра с удлинением $L/D = 1.9$. Частота вращательных колебаний составляла 7.6 и 4.4 Гц на подвесках с шестью и восемью пружинами соответственно. На рис. 5, *a* представлена зависимость квадрата амплитуды вращательных колебаний от числа Струхала. Разными значками отмечены данные, полученные с помощью разных проволочных подвесок, снабженных пружинами. Подвески характеризуются различными приведенной жесткостью и сопротивлением трения. Поэтому точки на графике, относящиеся к разным подвескам, не легли на одну линию. Однако для обеих подвесок имеют место линейные зависимости квадрата амплитуды от числа Струхала.

В случае подвески с восемью пружинами поступательные колебания не наблюдались ($Sc_y = 2.4$). График на рис. 5, *b* показывает зависимость логарифмического декремента колебания от скорости воздушного потока. Декремент растет с увеличе-

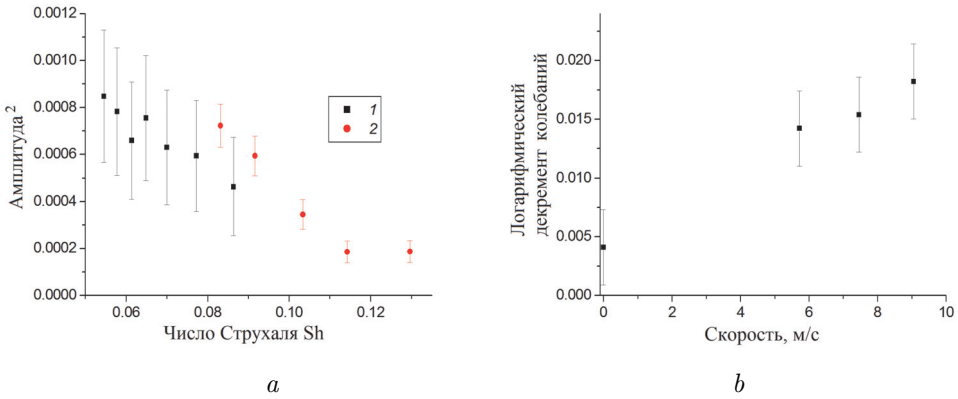


Рис. 5. Колебания цилиндра с удлинением $L/D = 1.0$: a — зависимость квадрата амплитуды вращательных колебаний от числа Струхалиа; 1 — подвеска с восемью пружинами; 2 — подвеска с шестью пружинами b — зависимость логарифмического декремента поступательных колебаний от скорости, подвеска с восемью пружинами.

нием скорости. Поступательные колебания с постоянной амплитудой реализовались при малых скоростях в испытаниях с подвеской с шестью пружинами ($Sc_y = 4.5$). График зависимости безразмерных амплитуд поступательных колебаний вместе с зависимостью амплитуды вращательных колебаний от скорости потока приведен на рис. 6. Диапазоны скоростей, в которых существуют вращательные и поступательные колебания, не перекрываются.

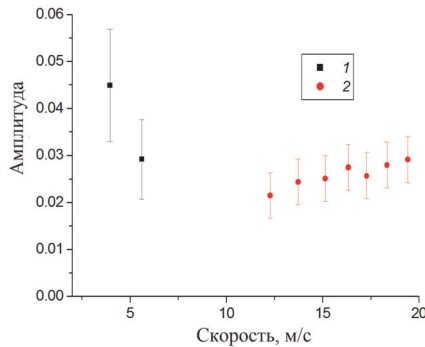


Рис. 6. Зависимость безразмерной амплитуды колебаний цилиндра с удлинением $L/D = 1.5$ от скорости набегающего потока, подвеска с шестью пружинами: 1 — поступательные колебания; 2 — вращательные колебания.

Частота вращательных и поступательных колебаний составляет 7.6 и 2.3 Гц соответственно. Диапазоны чисел Струхалиа вращательных и поступательных колебаний перекрываются.

7. Заключение. В аэродинамической трубе проведены исследования колебаний трех цилиндров малого удлинения, закрепленных на проволоочной подвеске со

стальными пружинами. Режимы колебаний цилиндров с установившимися амплитудами существенно различны. Цилиндр с удлинением $L/D = 1.9$ характеризуется вращательными колебаниями, амплитуда которых растет с увеличением скорости набегающего потока. Поступательные колебания цилиндра удлинения $L/D = 1.9$ являются затухающими, причем скорость затухания колебаний растет с увеличением скорости воздушного потока. Предложенная ранее математическая модель удовлетворительно описывает вращательные колебания. Квадрат амплитуды вращательных колебаний при достаточно большой скорости набегающего потока является линейной функцией числа Струхала. Уменьшение удлинения до $L/D = 1.5$ сопровождается значительным уменьшением амплитуды вращательных колебаний. При применении одной из двух упругих подвесок в диапазоне малых скоростей зарегистрированы поступательные установившиеся колебания цилиндра. Дальнейшее уменьшение удлинения до $L/D = 1.0$ ведет к исчезновению установившихся вращательных колебаний. Существуют режимы установившихся поступательных колебаний в ограниченном диапазоне малых скоростей. Таким образом, установлено, что в интервале удлинений от $L/D = 1.9$ до $L/D = 1.0$ происходит замена вращательных колебаний цилиндра на поступательные. Отметим, что при увеличении удлинения до $L/D = 9$ режимы вращательных колебаний упруго закрепленных цилиндров с постоянной амплитудой отсутствуют [13]. Возбужденные колебания цилиндров затухают. Выявленные в работе закономерности колебания цилиндров малого удлинения следует учитывать при анализе поведения грузов, переносимых под вертолетом на внешней подвеске.

Литература

1. Рябинин А. Н., Тюрин Б. Ф. Поведение груза, подвешенного под вертолетом *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. Вып. 1, 87–91 (1993).
2. Рябинин А. Н., Киселев Н. А. Влияние положения оси вращения цилиндра на его вращательные колебания в воздушном потоке. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия* **3** (61), вып. 2, 315–323 (2016) (In Russian). <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2016.216>
3. Parkinson G. V., Brooks N. P. H. On the Aeroelastic Instability of Bluff Cylinders. *J. Appl. Mech.* **28**, 252–258 (1961).
4. Parkinson G. V., Smith J. D. The square prism as an aeroelastic non-linear oscillator. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics* **17**, 225–239 (1964).
5. Alonso G., Meseguer J., Perez-Grande I. Galloping stability of triangular cross-sectional bodies: A systematic approach. *J. Wind Engineering Industrial Aerodynamics* **95**, 928–940 (2007).
6. Alonso G., Valero E., Meseguer J. An analysis on the dependence on cross section geometry of galloping stability of two-dimensional bodies having either biconvex or rhomboidal cross sections. *European J. Mech. B. Fluids* **28**, 328–334 (2009).
7. Novak M. Aeroelastic galloping of prismatic bodies. *J. Engineering Mech. Division ASCE* **95**, 115–142 (1969).
8. Ryabinin A. N., Kiselev N. A. Rotational oscillation of a cylinder in air flow. *ARPN J. Engin. Applied Science* **12** (23), 6803–6808 (2017).
9. Ковалев М. А. О расчете и исследовании аэродинамических труб. *Ученые записки Ленингр. ун-та* **7**, 61–86 (1939).
10. Scruton C. An experimental investigation of the aerodynamic stability of suspension bridges. *IABSE congress report* **3**, 463–473 (1948).
11. Curtis D. J., Hart J. J., Scruton C. An aerodynamic investigation for the suspended structure of the proposed Tsing Ma bridge. *Eng. Struct.* **7**, 23–34 (1985).
12. Бирбраер А. Н., Роледер А. Ю. *Экстремальные воздействия на сооружения*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. ун-та (2009).

13. Рябинин А.Н., Кауфман Д.В. Определение вращательных производных цилиндра с соосно установленным диском в воздушном потоке. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия* **8** (66), вып. 1, 158–166 (2021). <https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.114>

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2022 г.;
доработана 6 июня 2022 г.;
рекомендована к печати 9 июня 2022 г.

Контактная информация:

Рябинин Анатолий Николаевич — д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., проф.; a.ryabinin@spbu.ru
Велигжанин Андрей Андреевич — студент; st069438@student.spbu.ru

Rotational and translational oscillations of cylinders of small aspect ratio in the air flow

A. N. Ryabinin, A. A. Veligzhanin

St Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Ryabinin A. N., Veligzhanin A. A. Rotational and translational oscillations of cylinders of small aspect ratio in the air flow. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, 2022, vol. 9 (67), issue 4, pp. 729–739. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2022.414> (In Russian)

Rotational and translational oscillations of three cylinders differing in the ratio of length to cylinder diameter (elongation) are considered. The cylinders were suspended in the test section of the low velocity wind tunnel on a wire suspension containing steel springs. In the equilibrium position, the axis of the cylinders is directed horizontally and parallel to the velocity vector of the incoming flow. Under the influence of the air flow, the cylinders could make rotational or translational oscillations. Semiconductor strain gauges are attached to the two suspension springs, measuring the periodically changing tension of the springs during oscillations. The analog signal from the strain gauges was transmitted to a PC oscilloscope, which transmitted it in digital form to a computer. After calibration of the device and decoding of the signal, the frequencies and amplitudes of translational oscillations in the vertical direction and rotational oscillations around the horizontal axis passing through the center of the cylinder and perpendicular to the velocity vector of the incoming flow were determined. It turned out that in the studied range of cylinder elongations there is a transition from rotational to translational oscillations. A cylinder with elongation 1.9 performs steady rotational oscillations under the influence of wind, the amplitude of which increases with increasing air flow velocity. The previously proposed mathematical model correctly predicts rotational oscillations. The square of the amplitude of rotational oscillations is a linear function of the Strouhal number if the velocity of the air flow is sufficiently large. Translational oscillations of the cylinder with elongation 1.9 are damped. A decrease in the elongation of the cylinder to 1.5 is accompanied by a decrease in the amplitudes of rotational vibrations. At low air flow velocities, translational oscillations with a small amplitude are registered. Further reduction of the elongation to 1.0 leads to the complete absence of rotational oscillations. The amplitude of translational oscillations is growing. Translational oscillations are realized in a limited range of air flow velocities.

Keywords: wind tunnel, rotational oscillations, translational oscillations, strain gauge, cylinder.

References

1. Ryabinin A. N., Tyurin B. F. The behavior of the load suspended under a helicopter *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, iss. 1, 87–91 (1993). (In Russian)
2. Ryabinin A. N., Kiselev N. A. Effect of rotation axis position of the cylinder on its rotational oscillations in the air stream. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. **3** (61), iss. 2, 315–323 (2016). <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2016.216> (In Russian)
3. Parkinson G. V., Brooks N. P. H. On the Aeroelastic Instability of Bluff Cylinders *J. Appl. Mech.* **28**, 252–258 (1961).
4. Parkinson G. V., Smith J. D. The square prism as an aeroelastic non-linear oscillator *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics* **17**, 225–239 (1964).
5. Alonso G., Meseguer J., Perez-Grande I. Galloping stability of triangular cross-sectional bodies: A systematic approach *J. Wind Engineering Industrial Aerodynamics* **95**, 928–940 (2007).
6. Alonso G., Valero E., Meseguer J. An analysis on the dependence on cross section geometry of galloping stability of two-dimensional bodies having either biconvex or rhomboidal cross sections. *European J. Mech. B. Fluids* **28**, 328–334 (2009).
7. Novak M. Aeroelastic galloping of prismatic bodies. *J. Engineering Mech. Division ASCE* **95**, 115–142 (1969).
8. Ryabinin A. N., Kiselev N. A. Rotational oscillation of a cylinder in air flow. *ARPJ. Engin. Applied Science* **12** (23), 6803–6808 (2017).
9. Kovalev M. A. On calculation and investigation of wind tunnels. *Uchenye zapiski Leningradskogo Universiteta* **7**, 61–86 (1939). (In Russian)
10. Scruton C. An experimental investigation of the aerodynamic stability of suspension bridges. *IABSE congress report* **3**, 463–473 (1948).
11. Curtis D. J., Hart J. J., Scruton C. An aerodynamic investigation for the suspended structure of the proposed Tsing Ma bridge. *Eng. Struct.* **7**, 23–34 (1985).
12. Birbraer A. N., Roleder A. J. *Extreme actions on structures*. St Petersburg, Politechnical University Publ. (2009). (In Russian)
13. Ryabinin A. N., Kaufman D. V. Determination of rotational derivatives of a cylinder with a coaxially mounted disk in an air flow. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. **8** (66), iss. 1, 158–166 (2021). <https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.114> (In Russian)

Received: April 23, 2022

Revised: June 6, 2022

Accepted: June 9, 2022

Authors' information:

Anatoly N. Ryabinin — a.ryabinin@spbu.ru

Andrei A. Veligzhanin — st069438@student.spbu.ru