

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. П. Козлов, М. П. Фалунин, В. П. Шкадова, Экспериментальное исследование поперечного обтекания одиночного и пары авторотирующих цилиндров,
Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1. Матем., мех., 1996, номер 2, 50–54

<https://www.mathnet.ru/vmumm1991>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.84

19 апреля 2025 г., 02:13:44



МЕХАНИКА

УДК 533.625

В. П. Козлов, М. П. Фалунин, В. П. Шкадова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ОБТЕКАНИЯ ОДИНОЧНОГО И ПАРЫ АВТОРОТИРУЮЩИХ ЦИЛИНДРОВ

1. Введение. Задача о поперечном обтекании вращающегося цилиндра благодаря известным работам Магнуса стала классической. Этой тематике посвящено большое количество публикаций, в которых достаточно сложные аэродинамические явления исследуются как теоретическими методами, так и с привлечением физического эксперимента [1—5]. Следует отметить, что, несмотря на наличие мощных вычислительных машин, в расчетных методах решения рассматриваемой задачи возникают большие трудности. В связи с этим экспериментальная информация по этой проблеме имеет безусловную ценность. Первый обстоятельный обзор по данной тематике содержится в [6]. Наиболее подробные экспериментальные исследования обтекания принудительно вращающегося гладкого цилиндра вблизи экрана и обтекания цилиндрического Магнус-ротора в режиме авторотации представлены в [7, 8]. В Институте механики МГУ ранее также проводились исследования по обтеканию авторотирующих цилиндров [9].

В данной работе содержатся экспериментальные данные по обтеканию одиночного и пары цилиндров в режиме авторотации.

Круговой цилиндр как самостоятельный объект находит широкое применение в качестве составного элемента различных устройств, используемых во многих практических областях аэрогидродинамики. Например, цилиндрические вращающиеся элементы устанавливаются на профилях крыльев самолетов и служат средством управления их подъемной силой [10]. Вращающиеся цилиндры используются в химических технологиях при роторном гранулировании различных материалов [11], при создании роторных ветроустановок, градовых снарядов и т. д.

В результате исследования были получены зависимости аэродинамических характеристик и угловой скорости от различных параметров, которые могут быть полезны прежде всего на начальном этапе конструирования роторных ветроустановок с вертикальной осью вращения.

2. Схема установки и методика эксперимента. При проведении исследования в аэродинамической трубе использовалось устройство, состоящее из несущей рамы шириной 700 и высотой 510 мм, на которой шарнирно закреплялся один или два цилиндра диаметром $d=200$ мм и удлинением $\lambda=2,0$. На торцах цилиндров прикреплялись шайбы диаметром 240 мм, а вдоль образующих их боковой поверхности — лопасти, плоскости которых составляли некоторый угол с плоскостями осевого сечения цилиндров, проходящими через основания лопастей. Число лопастей и угол их наклона могли быть различными. В случае установки двух цилиндров расстояние между их образующими $2L$ регулировалось и изменялось от 50 до 200 мм. Зазор между торцевыми шайбами уменьшался при этом с 160 до 10 мм. При взаимодействии с потоком в аэродинамической трубе цилиндры могли вращаться в заданном направлении. Схема модели с двумя цилиндрами изображена на рис. 1.

Скорость потока V_∞ в аэродинамической трубе изменялась в диапазоне от 7 до 25 м/с, число Рейнольдса $Re_d = \frac{V_\infty d}{\nu}$ изменялось при этом от $1,1 \cdot 10^5$ до $4 \cdot 10^5$. Модель крепилась к шестикомпонентным аэродинамическим весам. Силовые воздействия потока воздуха на модель воспринимались всеми компонентами весов и автоматически фиксировались измерительным комплексом с ЭВМ ИВМ РС АТ-286. При обтекании двух цилиндров, расположенных вертикально поперек потока, весы воспринимали лишь силу сопротивления X , а при обтекании одиночного цилиндра — силу сопротивления X и боковую силу Z , появляющуюся вследствие вращения. Показания весов по остальным компонентам были близки к нулю. В расчетах величин $C_x = X/qS$, $C_z = Z/qS$ введены поправки на обтекание рамы модели, подвески, а также на загромождение потока обтекаемыми предметами. В представленных формулах q — скоростной напор потока, S — площадь осевого сечения одного или двух цилиндров, ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха. Результаты измерений фиксировались после двух-трехкратного повторения эксперимента. Величины C_x и C_z определялись с ошибкой 3—5%.

3. Одиночный цилиндр. Исследовались два состояния: застопоренное состояние и режим авторотации. Выяснялось влияние числа (три или четыре), размеров лопастей и их жесткости на аэродинамические характеристики и максимальную угловую скорость цилиндра. Результаты, представленные на рис. 2 и 3, оказались закономерными. Они

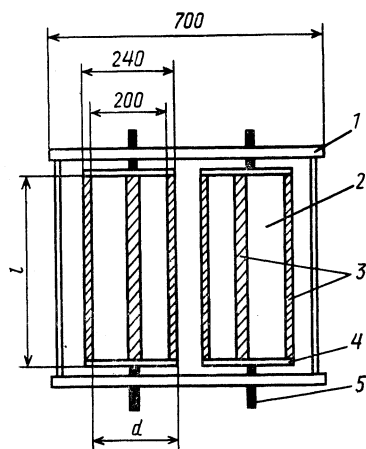


Рис. 1. Схема модели (размеры даны в миллиметрах): 1 — рама, 2 — цилиндр, 3 — лопасти, 4 — шайба, 5 — вал, d — диаметр цилиндров, l — длина цилиндров

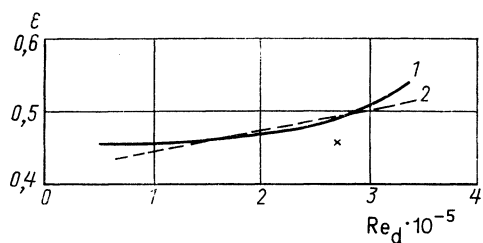


Рис. 2. Зависимости параметра вращения от числа Рейнольдса для одиночного цилиндра: 1 — эксперимент данной работы; 2 — формула из п. 3; × — эксперимент [8]

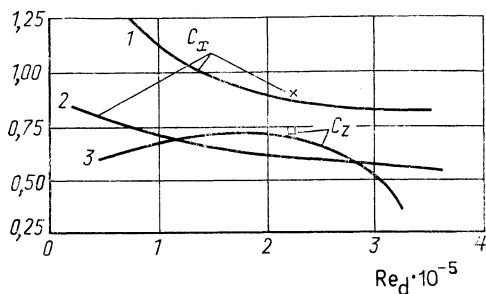
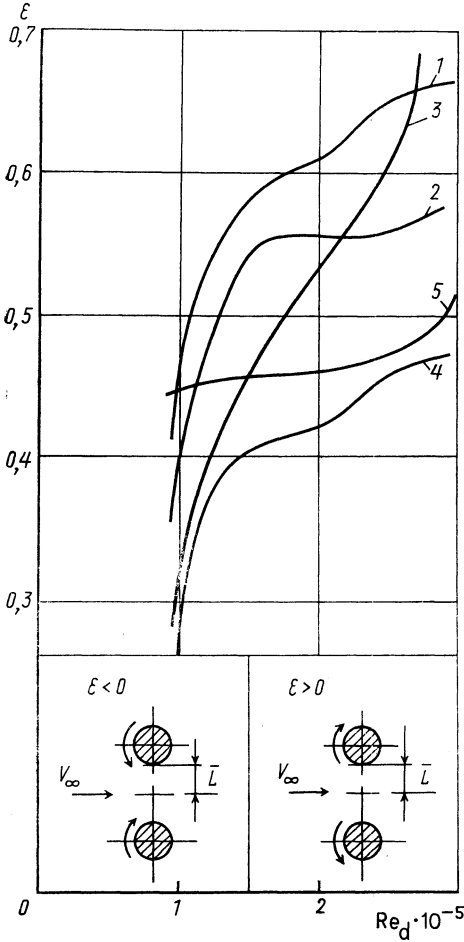


Рис. 3. Зависимости аэродинамических коэффициентов от параметра вращения для одиночного цилиндра в режиме авторотации: 1, 3 — эксперимент данной работы; ×, □ — эксперимент [8]; 2 — эксперимент, гладкий цилиндр [3]

сводятся к следующему: замена трех лопастей на такие же четыре слабо влияет на аэродинамические характеристики и характеристики вращения; замена жестких лопастей на мягкие, но большей площади дает заметное увеличение максимальной угловой скорости, что можно

объяснить бóльшим значением крутящего момента при раскрутке цилиндра; коэффициент аэродинамического сопротивления авторотирующего цилиндра при указанных значениях чисел Re_d существенно больше (на 30—40%) соответствующей величины для вращающегося гладкого цилиндра. Значения C_z авторотирующего и C_z гладкого принудительно вращающегося цилиндров имеют одинаковый порядок; согласно полученных результатов для одиночного авторотирующего цилиндра с данными работы [8] для Магнус-ротора при $Re_d=2,7 \cdot 10^5$ удовлетворительное; зависимость параметра вращения $\varepsilon=\omega d/2V_\infty$ от числа Рейнольдса Re_d (рис. 2) можно аппроксимировать формулой $\varepsilon=0,52-0,09 \cdot 10^5 Re_d^{-1}$. Здесь ω — угловая скорость вращения, измеренная в об/мин.

4. Пара цилиндров. Основная часть исследования посвящена изучению аэродинамики двух цилиндров, расположенных рядом вертикально. Такая компоновка исследовалась впервые. Геометрические параметры и взаимное



4. Пара цилиндров. Основная часть исследования посвящена изучению аэродинамики двух цилиндров, расположенных рядом вертикально. Такая компоновка исследовалась впервые. Геометрические параметры и взаимное

Рис. 4. Зависимости $\varepsilon(Re_d)$ при вращении цилиндров в режиме авторотации в случае $\varepsilon < 0$: 1 — $\bar{L}=0,75$; 2 — 0,5; в случае $\varepsilon > 0$: 3 — $\bar{L}=0,25$; 4 — 0,75; 5 — одиночный цилиндр

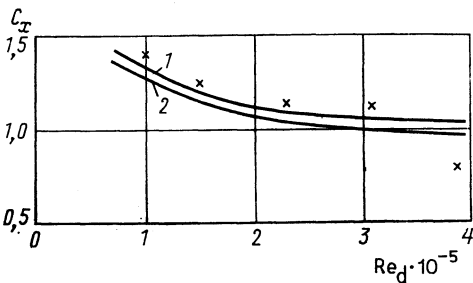


Рис. 5. Показания коэффициента C_x для исследуемой модели и для модели одиночного цилиндра, расположенного вблизи экрана [7], при $\varepsilon=0$: 1 — эксперимент данной работы при $\bar{L}=0,5$; 2 — при $\bar{L}=0,25$; × — эксперимент [7] при $\bar{L}=0,8$

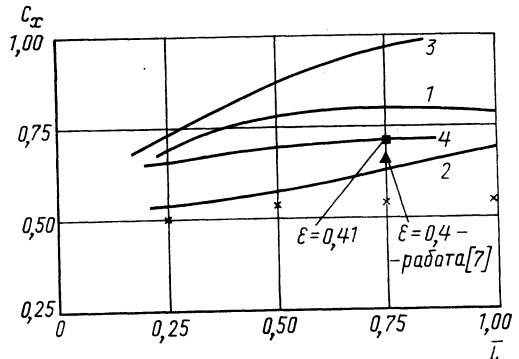


Рис. 6. Зависимости C_x от расстояния между цилиндрами в случае $\varepsilon > 0$, $\varepsilon < 0$ при $Re_d=2 \times 10^5$ для четырех жестких лопастей: × — $\varepsilon=0$, 1 — $\varepsilon < 0$, 2 — $\varepsilon > 0$; для трех гибких лопастей: 3 — $\varepsilon < 0$, 4 — $\varepsilon > 0$, ■ — $\varepsilon=0,41$

расположение цилиндров указаны на рис. 1. Основным интерес представляет определение эффективности взаимного влияния цилиндров при различных расстояниях между ними и различных сочетаниях направлений их вращения ($\varepsilon=0$, $\varepsilon>0$, $\varepsilon<0$). Зависимость знака величины ε от направления вращения показана на рис. 4. В случае обтекания двух цилиндров учитывается знак ε и добавляется определяющий параметр — удлинение $\bar{L}=L/d$.

Цель исследования — найти оптимальные значения параметров, обеспечивающих наибольшую величину $|\varepsilon|$. Аэродинамическое сопротивление и параметр вращения ε определялись для $\bar{L}=0,25; 0,5; 0,75; 1,0$ при $\varepsilon=0$ (цилиндры закрепленные), $\varepsilon>0$ и $\varepsilon<0$, рис. 4—6. Как и в случае одиночного цилиндра, были рассмотрены варианты с тремя, четырьмя жесткими и мягкими лопастями, установленными на каждом цилиндре.

Анализ данных экспериментов показал, что, как и для случая одиночного цилиндра, $|\varepsilon_{\max}|$ достигается при установке трех мягких лопастей. Ниже рассматриваются характерные зависимости $C_x(\bar{L})$, $C_x(Re_d)$ и $\varepsilon(Re_d)$ и дается сравнение полученных данных с результатами работы [7], в которой обтекание принудительно вращающегося гладкого цилиндра происходит вблизи плоского экрана.

Зависимости $C_x(Re_d)$ для случая $\varepsilon=0$ и $C_x(\bar{L})$ при $\varepsilon>0$, $\varepsilon<0$ и $\varepsilon=0$ изображены на рис. 5, 6. При сравнении значений C_x учитывалась поправка величины площади сечения цилиндров $d \cdot l$. Из рис. 5 видно, что с увеличением расстояния между неподвижными цилиндрами C_x возрастает. Данные работы [7] находятся в хорошем соответствии с приведенными для $Re_d \leq 3 \cdot 10^5$. При $Re_d > 3 \cdot 10^5$ имеет место некоторое расхождение результатов. По-видимому, это объясняется тем, что при таких значениях Re_d на поверхности гладкого цилиндра состояние пограничного слоя переходит из ламинарного в турбулентное, когда при обтекании вращающегося цилиндра в отсутствие экрана наблюдается резкое уменьшение величины C_x [3].

На рис. 6 приводятся характерные зависимости $C_x(\bar{L})$ для $Re_d = 2 \cdot 10^5$: с увеличением параметра \bar{L} величина C_x растет для всех случаев. Однако наибольшие значения C_x у модели с тремя мягкими лопастями при соответствующем направлении вращения. Этот факт является следствием увеличения скорости вращения цилиндров за счет увеличения площади лопастей, что приводит к образованию «эффективного» тела (тело+лопасти) с большим аэродинамическим сопротивлением. Значение C_x при $\bar{L}=0,75$ из работы [7] близко соответствующей величине данного исследования.

Для проведенных измерений характерно то, что в случае модели с неподвижными цилиндрами ($\varepsilon=0$) значение C_x всегда меньше, чем в случае модели, обтекаемой в режиме авторотации. Анализ полученных значений параметра вращения ε показал, что на всем диапазоне изменения параметров Re_d и \bar{L} как при $\varepsilon>0$, так и при $\varepsilon<0$ скорость вращения больше для модели, содержащей три мягкие лопасти. На рис. 4 приводятся зависимости $\varepsilon(Re_d)$ для случая мягких лопастей. Здесь же нанесены значения ε для одиночного цилиндра. Видно, что с увеличением расстояния между цилиндрами скорость авторотации уменьшается при $\varepsilon>0$ и возрастает при $\varepsilon<0$. Характерно, что для случая одиночного цилиндра зависимость $\varepsilon(Re_d)$ с увеличением числа Re_d является более монотонной, чем для пары цилиндров.

Причиной такого поведения $\varepsilon(Re_d)$ для $\varepsilon<0$ и $\varepsilon>0$, по-видимому, являются различия во взаимодействии потока и стенок в зазоре между цилиндрами при изменении параметра \bar{L} .

5. Выводы. Анализ полученных данных показал: значения C_x для случая $\varepsilon < 0$ всегда превышают значения C_x при $\varepsilon > 0$;

увеличение площади лопастей приводит к существенному увеличению скорости вращения цилиндров;

величина скорости вращения каждого ротора при полной компоновке модели больше, чем для случая одиночного авторотирующего цилиндра;

максимальную скорость вращения на исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса можно получить как при $\varepsilon > 0$, так и при $\varepsilon < 0$. Однако $|\varepsilon_{\max}|$ в первом случае достигается при увеличении расстояния между цилиндрами, а во втором — при его уменьшении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкадова В. П. Вращающийся цилиндр в потоке вязкой несжимаемой жидкости//Механ. жидкости и газа. 1982. № 1. 25—33.
2. Bard H. M., Dennis S. C. R. Time-dependent viscous flow past an impulsively started rotating and translating circular cylinder//J. Fluid. Mech. 1985. 447—484.
3. Griffiths R. T., Ma C. Y. Differential boundary layer separation effects in the flow over a rotating cylinder//Aeronaut. J. 1969. 73. 524—526.
4. Козлов В. П. Эффекты движущейся стенки, возникающие при поперечном обтекании вращающегося цилиндра дозвуковым потоком//Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. 1993. № 1. 79—84.
5. Задачи физико-механического практикума по газовой и волновой динамике: Учебное пособие/Под ред. В. П. Козлова, Е. А. Сагомонян. М., 1993.
6. Jacobson T. D. Magnus characteristics of arbitrary rotating bodies//AGARD. 1973. N 171.
7. Коваленко В. М. и др. Обтекание вращающегося и неподвижного кругового цилиндра вблизи плоского экрана//Изв. Сиб. отд. СССР. Сер. техн. н. 1983. № 13, вып. 3. 50—59.
8. Miller M. C. Wind-tunnel measurements of the surface pressure distribution on a spinning magnus rotor//J. Aircraft. 1978. 16, N 12. 815—822.
9. Шкадова В. П., Фалуниин М. П., Козлов В. П., Фещенко С. А. Вопросы аэродинамики вращающихся тел (в печати).
10. Mokhtarian F., Modi V. F., Yokomizo T. Rotating air scoop as airfoil boundary layer control//J. Aircraft. 1988. 25, N 10. 973—975.
11. Шаповалов В. М. и др. Течение неьютоновской жидкости в зазоре между вращающимся цилиндром и проницаемой поверхностью при роторном гранулировании//Инж.-физ. журн. 1982. 54, № 3. 415—422.

Поступила в редакцию
23.02.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 1, МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА. 1996. № 2

УДК 533.6.011

В. Л. Ковалев, А. А. Крупнов

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИ НЕРАВНОВЕСНОГО ТЕЧЕНИЯ ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННОГО ВОЗДУХА В ВЯЗКОМ УДАРНОМ СЛОЕ

В настоящей работе сравниваются результаты расчетов уровня ионизации и других характеристик течения в вязком ударном слое около заглушенных по сфере конусов с данными баллистических экспериментов $RAM-C$, приведенными в [1, 2]. Учитывались многокомпонентная диффузия, неравновесный характер протекания реакций диссоциации и ионизации, а также гетерогенные каталитические реакции. Эксперименты $RAM-C$ исследовались в [1] в рамках уравнений вяз-