

УДК 533.682

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ВЕЛОСИПЕДАМИ, ДВИГАЮЩИМИСЯ ДРУГ ЗА ДРУГОМ

Чмовж В.В.

Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт»

Васильченко А.О., Петров Б.В.

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

В работе исследуются аэродинамические характеристики велосипедистов, движущихся в группе. Было проведено экспериментальное изучение поля скоростных напоров за движущимся велосипедом, проверена автомодельность такого обтекания. Получены численные значения выигрыша в силе для велосипедиста, движущегося строго за другим велосипедистом на близком расстоянии.

Ключевые слова: аэродинамика транспортных средств, исследования в аэродинамических трубах.

Постановка задачи и анализ литературы. За любым достаточно быстро движущимся неудобообтекаемым телом образуется так называемый «спутный след» – зона с пониженным давлением и развитой турбулентностью. Если в спутный след одного движущегося тела попадет другое, то сила лобового аэродинамического сопротивления, действующая на заднее тело, оказывается меньшей. Этим пользуются велосипедисты – порой на велогонках они собираются в цепочки по несколько человек. Тогда сопротивление велосипедистов, которые едут за лидером, становится ниже обычного, что позволяет сэкономить энергию для, например, финального рывка.

В настоящее время для исследований в практической аэродинамике применяются следующие подходы [1]:

- CFD-методы (Computational Fluid Dynamic);
- физическое моделирование (аэродинамические трубы);
- натурные испытания.

Каждый из подходов имеет свои достоинства и недостатки. Физический эксперимент в аэродинамической трубе на данное время является наиболее достоверным инструментом экспериментальной аэродинамики, так как погрешность при получении экспериментальных данных не превышает 5%. Данная ошибка связана с погрешностями, как измерительного инструмента, так и изготовления масштабной модели. Необходимо отметить, что при проведении масштабного физического эксперимента необходимо обеспечить его подобие натурному процессу, что не всегда удается.

Аэродинамические свойства движущихся велосипедов уже изучались различными учеными. В работе [2] изучаются аэродинамические свойства гоночного велосипеда, подробно анализируются эти свойства для отдельных частей – руля, колес, рамы и пр. В работах зарубежных авторов, таких, как [3] и [4], методами компьютерного моделирования исследуются распределения давлений позади групп из разного количества велосипедистов, а также приводятся численные оценки силового выигрыша от такой стратегии – до 20%.

Целью работы является экспериментальное исследование аэродинамических характеристик масштабной модели велосипеда с макетом велосипедиста (далее модель велосипеда) и изучение распределения скорости в спутном следе за моделью велосипеда. Исследования выполнялись в аэродинамической трубе малых скоростей АТ-5 «ХАИ», которая имеет открытую рабочую часть с диаметром ядра потока 600 мм и максимальной скоростью 42 м/с.

Предварительные замечания. Исследования в аэродинамической трубе возможны в силу принципов подобия. Согласно этому принципу потоки вокруг обтекаемых тел будут подобными не только при условии геометрического подобия этих тел. Должны также совпадать характерные для этого потока числа Рейнольдса. Масштаб модели определяется как отношение размеров модели велосипеда и натурального велосипеда:

$$\text{масштаб} = \frac{L_{\text{модели}}}{L_{\text{оригинал}}} \quad (1)$$

Масштаб модели, которая использовалась в эксперименте, равнялся 1/8, масштаб был продиктован размерами рабочей части аэродинамической трубы и максимальной скоростью потока. Масштабная модель велосипеда (вид сбоку и сверху) представлена на рис. 1.

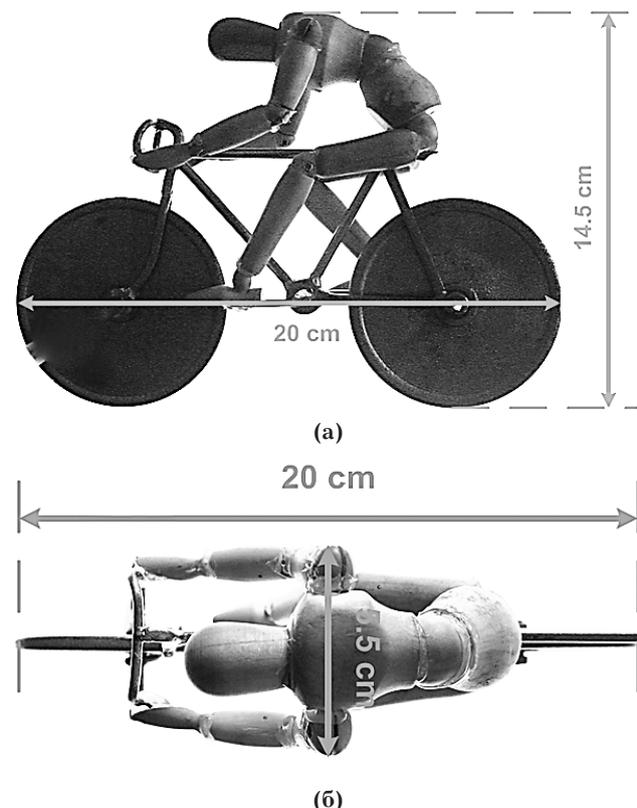


Рис 1. Масштабная модель велосипедиста (а) вид сбоку (б) вид сверху

Источник: получено авторами

Для движения велосипеда характерным числом подобия является число Рейнольдса.

Число Рейнольдса вычисляется по следующей формуле:

$$Re = \frac{Vl}{\nu}, \quad (2)$$

где V и l – характерные скорость и линейный размер, ν – коэффициент кинематической вязкости для стандартных условий. Экспериментальные исследования выполнялись для различных значений скорости набегающего потока в аэродинамической трубе. Для масштабной модели и натурального велосипеда в качестве характерного линейного размера была выбрана длина велосипеда, равная для масштабной модели $0,2$ м, а для натурального велосипеда – $1,6$ м. В таком случае характерные числа Рейнольдса приведены в табл. 1.

Таблица 1
Характерные значения скорости и числа Рейнольдса для модели велосипеда и натурального велосипеда

Скорость набегающего потока, м/с	Число Рейнольдса для масштабной модели $L = 0,2$ м	Число Рейнольдса натурального велосипеда $L = 1$ м
5	$0,06 \cdot 10^6$	$0,46 \cdot 10^6$
10	$0,12 \cdot 10^6$	$0,92 \cdot 10^6$
40	$0,46 \cdot 10^6$	–

Обычно велосипедисты на велогонках двигаются со средней скоростью порядка 10 м/с. Это значит, что в аэродинамической трубе невозможно достигнуть полного подобия по числу Рейнольдса. Но при этом может быть достигнут автомодельный режим течения, для которого коэффициент лобового сопротивления не зависит от числа Рейнольдса.

Исследование аэродинамических характеристик модели велосипеда выполнялось по методу сквозных (весовых) характеристик и по методу распределенных характеристик [5].

Методом распределенных характеристик исследовалось поле скоростных напоров в спутном следе позади велосипедиста с помощью приемника воздушного давления (ПВД).

Методом сквозных характеристик определялась зависимость коэффициента лобового сопротивления c_x от числа Рейнольдса и расстояния между велосипедами.

Исследование аэродинамических характеристик транспортных средств в аэродинамической трубе требует учета поверхностных эффектов. Существует несколько методов для имитации таких эффектов в аэродинамической трубе. Наиболее простым методом является разделение потока неподвижным (статичным) экраном, который приводит к разделению потока на верхнюю и нижнюю части. Недостатком этого метода является нарастание пограничного слоя над статичным экраном. Другой метод основан на использовании движущейся ленты. Этот метод дает наиболее приближенные к действительности результаты. Но конструкцию с движущимися частями более сложно изготовить и эксплуатировать. Кроме того, скорость движения ленты должна равняться скорости потока вдоль оси модели, что еще более усложняет проведение эксперимента.

Для проведения эксперимента был выбран первый метод с применением статичного экрана, так как он является наиболее простым в эксплуатации и наиболее распространенным при подобных исследованиях [6].

Изучение поля скоростных напоров в спутном следе за моделью велосипеда. В первом эксперименте исследовалось поле скоростных напоров в спут-

ном следе за обдуваемой моделью велосипеда. Установка для эксперимента предоставлена на рис. 2.

Модель закреплялась на неподвижном экране. С помощью координатника комбинированный насадок ПВД размещался в потоке и надежно фиксировался. Измерения поля скоростных напоров проводилось позади модели, обдуваемой воздухом с максимальной скоростью, которую может развивать аэродинамическая труба. Положение комбинированного насадка изменялось по трем направлениям. Вдоль направления потока (координатная ось x) насадок фиксировался на расстояниях от -24 см до 26 см с шагом 5 см; горизонтально перпендикулярно направлению потока (ось z) – от -10 см до 10 см с шагом 1 см; вертикально (ось y) – от $5,75$ см до 17 см с шагом $3,75$ см. Значение скоростного напора в точке за моделью велосипеда приводилось к значению скоростного напора на срезе сопла аэродинамической трубы:

$$\mu = \frac{q}{q_\infty}, \quad (3)$$

где q – измеренное значение скоростного напора, q_∞ – скоростной напор невозмущенного потока.

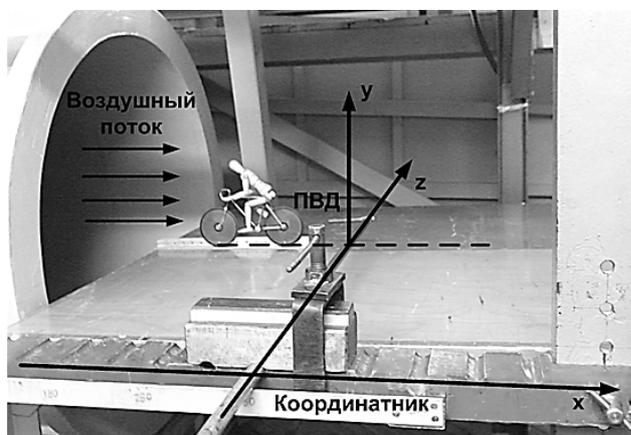


Рис. 2. Установка модели велосипеда на статическом экране в аэродинамической трубе

Источник: получено авторами

В подобных исследованиях в аэродинамике удобным оказывается переход к безразмерным линейным величинам. В этом исследовании в качестве характерного линейного размера была выбрана длина велосипеда (типичные значения были изложены в предыдущем разделе). Тогда безразмерные координаты вычисляются по формулам:

$$\bar{x} = \frac{x}{L_{вел}}, \quad \bar{y} = \frac{y}{L_{вел}}, \quad \text{и} \quad \bar{z} = \frac{z}{L_{вел}}, \quad (4)$$

где x, y, z – значения координат, а $L_{вел}$ – длина модели велосипеда.

Были построены график зависимости поля скоростных напоров от безразмерной координаты z для всех значений $x = const$ и график зависимости поля скоростных напоров от безразмерной координаты y для некоторых значений $x = const$. Мы явно видим, что за движущимся велосипедистом образуется достаточно длинная и широкая зона заторможенного потока (Рис. 3).

Исследование аэродинамических характеристик модели велосипеда. Во втором эксперименте исследовалось взаимное влияние велосипедов при движении в цепочке. Для этого модель велосипеда крепилась на аэродинамических весах, а другая непосредственно перед ней (или за ней) на экране. Меняя положение передней (задней) модели велосипеда, варьировалось расстояние между ними. Кроме того, для определения снижения сопротивления в зависимости от взаимного расположения, выполня-

лось исследование изолированной модели велосипеда. Число Рейнольдса изменялось путем варьирования скоростью потока в аэродинамической трубе. Таким образом, определялась зависимость коэффициента лобового сопротивления модели велосипеда от числа Рейнольдса и из взаимного расположения.

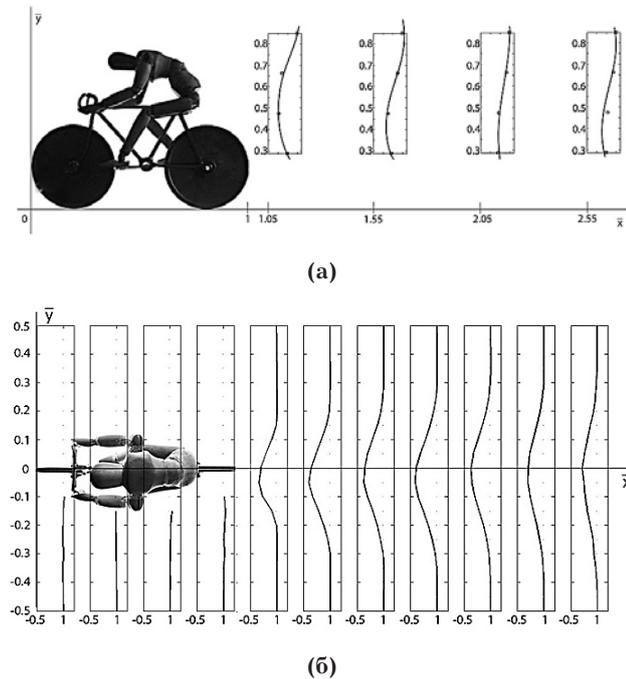


Рис. 3. Графики зависимости поля скоростных напоров

Источник: получено авторами

Фото экспериментальной установки представлено на рис. 4.

Из измеряемой на аэродинамических весах силы аэродинамического сопротивления X_a , коэффициент лобового сопротивления вычисляется по формуле:

$$c_{xa} = \frac{X_a}{q_\infty S}, \quad (5)$$

где S – площадь миделевого (фронтального) сечения модели велосипеда, q_∞ – скоростной напор невозмущенного потока.

Скорость потока для определения числа Рейнольдса вычислялась по формуле

$$v = \sqrt{\frac{2q_\infty}{\rho}}, \quad (6)$$

где ρ – плотность воздуха в зависимости от условий проведения эксперимента ($\rho = f(T, p)$)

Оценка фронтальной площади сечения проводилась по следующей схеме. В графическом редакторе фотография велосипедиста на ярком светлом фоне была переведена в черно-белый формат. По отношению количества черных и белых пикселей, а также зная реальные размеры модели велосипеда, мы оценили фронтальную площадь нашей модели, она оказалась равной 41 см^2 .

Зависимость коэффициента лобового сопротивления c_{xa} от числа Рейнольдса для разных дистанций между велосипедистами приведены на рис. 5.

Здесь и далее дистанции между моделями и оригиналами велосипедов традиционно являются безразмерными, нормированными на диаметр колеса – ту величину, которой удобно пользоваться велосипедистами при движении:

$$l = \frac{l_{\text{дист}}}{d}, \quad (7)$$

где d – диаметр колеса велосипеда (для используемых моделей он составлял $0,08 \text{ м}$), а $l_{\text{дист}}$ – истинное расстояние между моделями велосипедов. Этот эксперимент подтверждает автоматичность аэродинамических характеристик при числах Рейнольдса больше $0,4 \cdot 10^6$. При перерасчете на натуральный велосипед это соответствует скорости 4 м/с . Велосипедисты обычно движутся со средней скоростью 10 м/с . Это значит, что движение натурального велосипеда можно с уверенностью считать автоматичным. Благодаря этому, результаты, полученные для уменьшенной модели, могут быть обобщены на натуральный велосипед.



(а)



(б)

Рис. 4. Установка модели велосипеда на статическом экране в аэродинамической трубе на аэродинамических весах (а) – для переднего, (б) – для заднего

Источник: получено авторами

Выигрыш в силе при движении рассчитывался по формуле:

$$\Delta = \frac{C_{xa}^{\text{изол}} - C_{xa}}{C_{xa}^{\text{изол}}} \cdot 100\% \quad (8)$$

где $c_{xa}^{\text{изол}}$ – коэффициент сопротивления изолированной модели велосипеда. Получается выигрыш – это относительное изменение силы сопротивления, действующей на модель велосипеда.

Таким образом, определялась зависимость коэффициента лобового сопротивления модели велосипеда от числа Рейнольдса и из взаимного расположения на рис. 6.

Результатом обоих исследований стала зависимость выигрыша в силе от дистанции между моделями велосипеда (рис 7). В качестве значеный коэффициентов лобового сопротивления для сравнения по формуле 8 использовались значе-

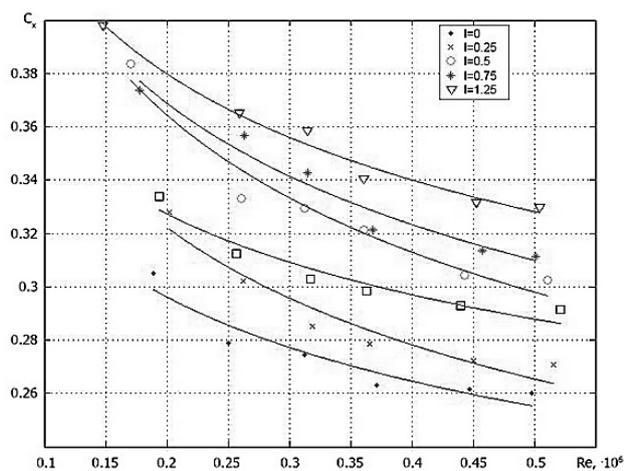


Рис. 5. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса и расстояния между велосипедистами

Источник: получено авторами

ния коэффициентов для числа Рейнольдса больше $0,4 \cdot 10^6$. Выигрыш в силе для второй модели велосипеда меняется от 65% до 53% при расстоянии до 1.2 размеров колеса (для натурального велосипеда это соответствует 80 см). В пересчете в выигрыш оказалось, что на 8-2% (на расстояниях в 1.25 колеса) для первой модели велосипеда также есть выгода от того, что он движется в группе.

Заключение. Было проведено экспериментальное исследование аэродинамических характеристик модели велосипеда. Изучено поле скоростей за моделью велосипеда, определены коэффициенты лобового сопротивления моделей первого и второго велосипеда, получено снижение коэффициента лобового сопротивления в зависимости от расстояния между моделями велосипедов. Анализ результатов выполнен для режима автономности аэродинамических коэффициентов. Результаты исследования свидетельствуют о том, что за первым велосипедом образуется спутный след, в котором скорость потока уменьшается и среднее значение $\mu=0,5$. Коэффициент лобового сопротивления велосипеда, попадающего в спутный след, снижается от 60% до 54%, при этом коэффициент сопротивления первого велосипеда (за счет влияния движущего за ним) также уменьшается, но незначительно, до 8%.

Список литературы:

1. Чмовж В. В., Дружинин Е. А., Корнев А. В., Гирька Ю. В. Оптимизация процесса проектирования при рациональном комбинировании методов определения параметров ЛА. Проблемы создания и обеспечения жизненного цикла авиационной техники: междунар. науч.-техн. конф: тез. докл. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Х., 2010.
2. Усик Ю. Ф., Еремеев И. Д., Лысенко А. И., Воронцов Р. И. Особенности аэродинамики шоссейно-гоночного велосипеда / Прикладные задачи аэродинамики, тематический сборник научных трудов ХАИ – Х., 1987.
3. Blocken Bent, Defraeye Thijs, Erwin Koninckx et al. Surprises in cycling aerodynamic / Europhysics News, vol. 44, n. 1, 2013.
4. Thomas Prehn «Racing Tactics for Cyclists».
5. Горлин С. М., Слезингер И. И. Аэромеханические измерения. – М.: Наука, 1964.
6. Jones Brett L. «Experimental Investigation into the Aerodynamic Ground Effect of a Tailless Chevron-Shaped UCAV», MS thesis, AFIT/GAE/ENY/05-J04, Department of Aeronautics and Astronautics, Air Force Institute of Technology (AU), Wright-Patterson AFB, OH, June 2005.

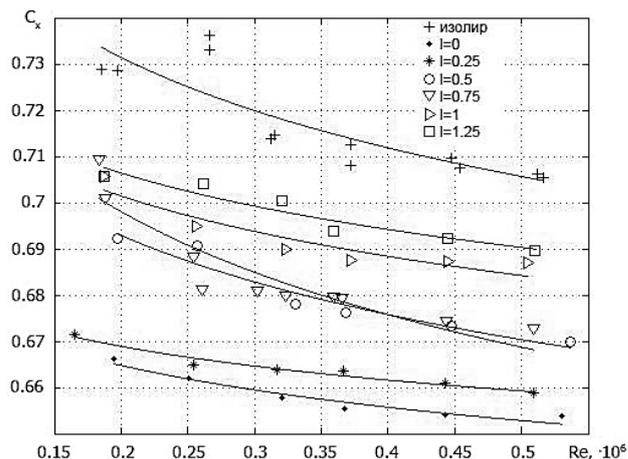


Рис. 6. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса и дистанции для первой модели велосипеда

Источник: получено авторами

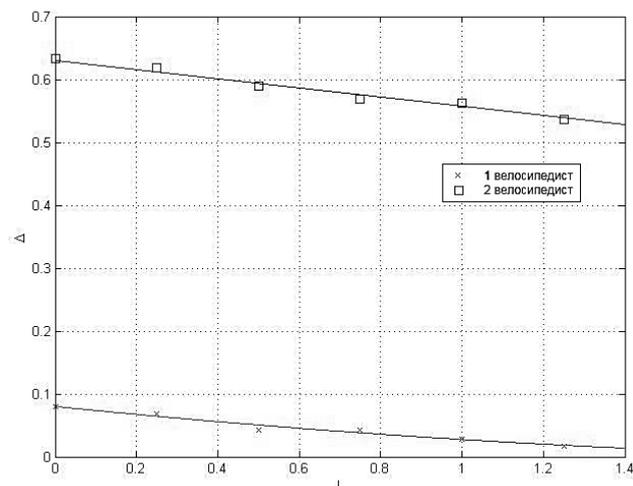


Рис. 7. Выигрыш в силе для первого и второго велосипедиста от дистанции между ними

Источник: получено авторами

Учитывая, что позади движущийся велосипед все же оказывает положительное влияние на первый, выбором дистанции вторым велосипедистом больше чем диаметр одного колеса, это положительный эффект можно свести к минимуму.

Чмовж В.В.

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Васильченко А.О., Петров Б.В.

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

АЕРОДИНАМІЧНА ВЗАЄМОДІЯ МІЖ ВЕЛОСИПЕДАМИ, ЩО РУХАЮТЬСЯ ОДИН ЗА ІНШИМ

Анотація

У роботі досліджуються аеродинамічні характеристики велосипедистів, що рухаються у групі. Був експериментально вивчений розподіл швидкостей позаду велосипедиста, перевірена автомодельність такого потоку. Отримані значення вирашу в силі для велосипедиста, що рухається безпосередньо позаду іншого на невеликій відстані.

Ключові слова: аеродинаміка транспортних засобів, дослідження у аеродинамічних трубах.

Chmovzh V.V.

National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»

Vasylchenkova A.O., Petrov B.V.

V.N. Karazin Kharkiv National University

AERODYNAMIC INTERACTION BETWEEN BICYCLES, MOVING ONE BEHIND ANOTHER

Summary

Aerodynamic characteristics of cyclists moving in group are investigated. Distribution of impact pressure behind cyclist is experimentally studied, self-similarity of such flow is examined. Values of force benefit of one cyclist moving behind another, depending on distance between cyclists, are obtained.

Keywords: vehicle aerodynamic, investigation in wind tunnel.