

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МОДЕЛЕЙ

Масленников Д.А.¹, Анучин И.Е.¹, Тумасов А.В.¹, Катаева Л.Ю.^{1,2}, Котова Ю.В.¹

¹ГОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия (603950, ГСП-41, Н.Новгород, ул. Минина, д.24), e-mail: nntu@nntu.nnov.ru

²ГОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» (МИИТ), Нижний Новгород, Россия (603011, г. Нижний Новгород, Комсомольская пл., д. 3), e-mail: tu@miit.ru

В работе экспериментально исследуется влияние числа Рейнольдса на коэффициент аэродинамического сопротивления различных моделей при продувании в аэродинамической трубе. В статье детально описывается процедура проведения эксперимента, а также алгоритм вычисления анализируемых параметров на основе полученных в ходе эксперимента данных измерений. Показаны значения коэффициента аэродинамического сопротивления, полученных в ходе серии экспериментов с различными числами Рейнольдса и конфигурациями масштабных моделей автомобилей. Полученные результаты хорошо согласуются с линейной зависимостью данного коэффициента от числа Рейнольдса. На основе полученных данных сделан вывод о приближении к зоне автомодельности по мере увеличения скорости набегающего потока. Недостижение этой зоны обусловлено рабочими характеристиками используемой при проведении эксперимента аэродинамической трубы, а именно – невозможностью компенсировать уменьшение размеров модели скоростью потока или свойствами газа, используемого при продувании.

Ключевые слова: аэродинамика автомобиля, аэродинамическое сопротивление, автомодельность.

INFLUENCE OF REYNOLDS NUMBERS ON AERODYNAMIC DRAG OF MODELS

Maslennikov D.A.¹, Anuchin I.E.¹, Tumasov A.V.¹, Kataeva L.Y.^{1,2}, Kotova Y.V.¹

¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia (603950, GSP-41, Nizhny Novgorod, ul. Minin St., 24), e-mail: nntu@nntu.nnov.ru

²Moscow State University of Railway Transport, Nizhny Novgorod, Russia (603011, Nizhny Novgorod, Komsomolskaya Square, 3), e-mail: tu@miit.ru

The paper experimentally investigate the influence of Reynolds number on the drag coefficient of various models, while blowing in the wind tunnel. The article describes in detail the procedure of the experiment, as well as an algorithm for computing analyzed parameters on the basis of the data during the experiment measurements. Shows the values of drag coefficient obtained in a series of experiments with different Reynolds numbers and configurations of scale models. The results obtained are in good agreement with the linear dependence this coefficient on the Reynolds number. On the basis of the data obtained on the approximation to the zone of self-similarity with increasing flow velocity. Failure to achieve this zone caused by performance characteristics of the wind tunnel, used in the experiment, namely the inability to compensate for the reduced-size model of with flow rate or the properties of gas used for blowing.

Keywords: automotive aerodynamics, aerodynamic drag, self-similarity.

При моделировании обтекания в аэродинамической трубе имеют место ряд факторов, обуславливающих искажение полученных результатов. К таким факторам относятся загромождение трубы, неподвижность поверхности, моделирующей полотно дороги, погрешность измерения. Другой сложностью также является ограниченность числа Рейнольдса, определяемого имеющимся оборудованием. Как известно, данный критерий подобия определяется соотношением (1)

$$Re = \rho V L \mu, \quad (1)$$

где ρ – плотность газовой смеси, V – скорость потока, L – характерная длина, μ – аэродинамическая вязкость.

Характеристики аэродинамической трубы НГТУ [3] обеспечивают реальную скорость 35 м/с, но её размеры (площадь сопла – 0,54 м², длина рабочей части – 1 м) позволяют продувать только уменьшенные модели автомобилей. Компенсировать уменьшение размеров обтекаемого тела за счёт использования среды с большей динамической вязкостью и плотностью не представляется возможным ввиду открытости рабочей области [4]. Для определения степени влияния отклонения числа Рейнольдса были проведены эксперименты на аэродинамической трубе НГТУ.

В данной статье предлагается исследовать влияния числа Рейнольдса на коэффициент лобового сопротивления на основе серии экспериментов различными значениями этого числа. На рис.1 показан вид аэродинамической трубы с установленной моделью автомобиля для проведения эксперимента.



Рис. 1. Аэродинамическая труба с установленной моделью автомобиля

Объект исследования устанавливается на аэродинамические весы и размещается в рабочей части трубы. Сверху опускается металлическая плита, имитирующая дорожное полотно. На микроамперметрах, используемых для измерения действующих на модель сил (сопротивления, подъёмной силы и опрокидывающего момента). Для измерения величины сил, соответствующих показаниям микроамперметров, производится тарировка, алгоритм проведения которой более подробно описан в работе [5]. После проведения всех

необходимых подготовительных действий включается вентилятор аэродинамической трубы и с помощью трубки Пито – Прандтля и показаний чашечного манометра устанавливается требуемая в эксперименте скорость [1]. После того, как течение в аэродинамической трубе установится, записываются показания с измерительно-регистрирующего комплекса. Эксперимент повторяется для каждого значения скорости и исследуемой модели.

Ключевыми результатами измерения в данной серии экспериментов были значения перепада давления согласно показаниям манометра и лобовое сопротивление. Как видно из рис. 1, на силу сопротивления существенно влияют элементы крепления, поэтому необходимо учитывать это влияние. В связи с необходимостью проведения серии экспериментов с различными значениями скоростей, измерение силы сопротивления крепления без моделей проводилось только для максимального значения скорости потока. Для анализа остальных экспериментов авторы данной статьи предполагали, что доля сопротивления, приходящаяся на крепление, зависит только от продуваемой модели, но не от скорости потока. Согласно проведённым экспериментам, для конфигураций обтекаемого тела, представленных в работе, вклад креплений в силу лобового сопротивления всей системы составил 34–36 %.

Для вычисления скорости потока использовалась следующая формула:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot P_d}{\rho}},$$

где $P_d = k \cdot h$ – динамическое давление, кПа; k – градуировочный коэффициент манометра, учитывающий наклон отсчетной трубки манометра; h – показание манометра, кПа; ρ – плотность воздуха кг/м³.

Для вычисления коэффициента аэродинамического (лобового) сопротивления использовано соотношение [2]

$$C_x = \frac{2 \cdot F}{S \cdot V^2},$$

где F – сила сопротивления с учётом поправки на крепление модели, Н; S – площадь поперечного сечения исследуемого объекта, м².

Число Рейнольдса, как известно, определяется согласно соотношению

$$R_e = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

где L – длина объекта, м; ν – вязкость воздуха, м²/с.





При обработке результатов эксперимента использовались следующие значения:

$$k = 4,89; \rho = 1,18 \text{ кг/м}^3; S = 0,02835 \text{ м}^2; L = 0,45 \text{ м}; \nu = 1,62 \text{ м}^2/\text{с}.$$

В таблице 1 показана конфигурация и названия исследуемых в данной работе моделей.

Таблица 1

Конфигурации продуваемых моделей

Модель 3 седан	Модель 3 хетчбек	Модель 3 универсал	Модель 1 седан
			

На рис.1–4 представлены результаты расчётов коэффициента лобового сопротивления, основанные на экспериментальных данных. Для определения характера изменения коэффициента лобового сопротивления с ростом числа Рейнольдса была выбрана линейная аппроксимация. Из рисунков видно, что полученная зависимость хорошо согласуется с экспериментальными данными с отклонением не более 5 %. Как видно из рисунков, модель 1 седан имеет наименьший коэффициент C_x при максимальных значениях числа Рейнольдса. При этом именно для неё коэффициент аэродинамического сопротивления в наибольшей степени зависит от числа Рейнольдса.

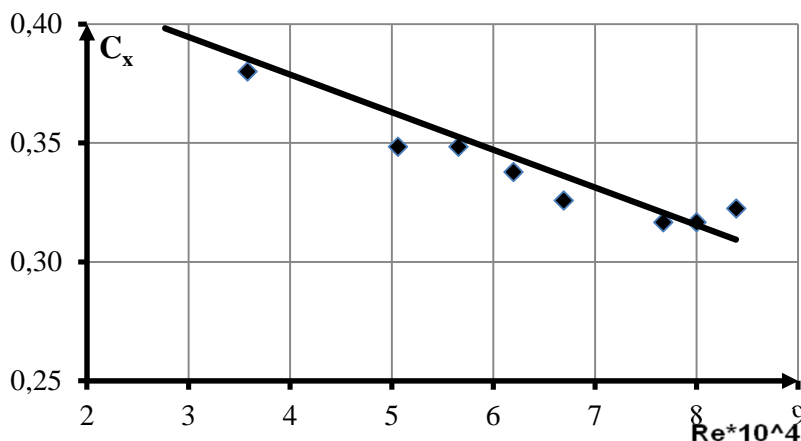


Рис.1. Зависимость C_x от числа Re для модели 3 седан

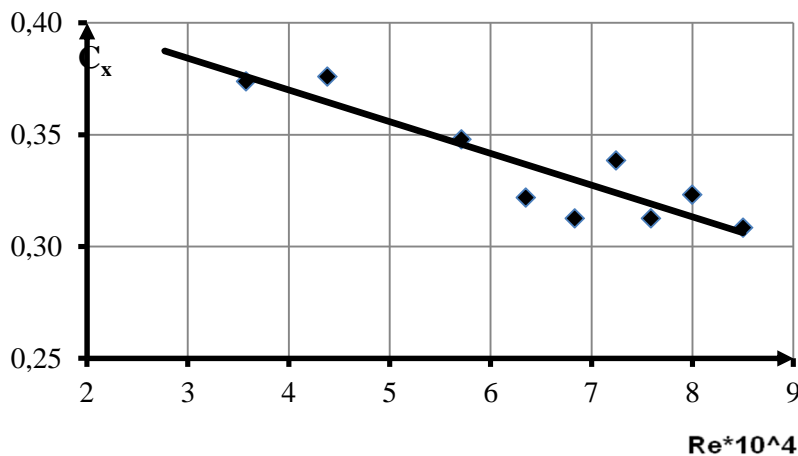


Рис.2. Зависимость C_x от числа Re для модели 3 хетчбек

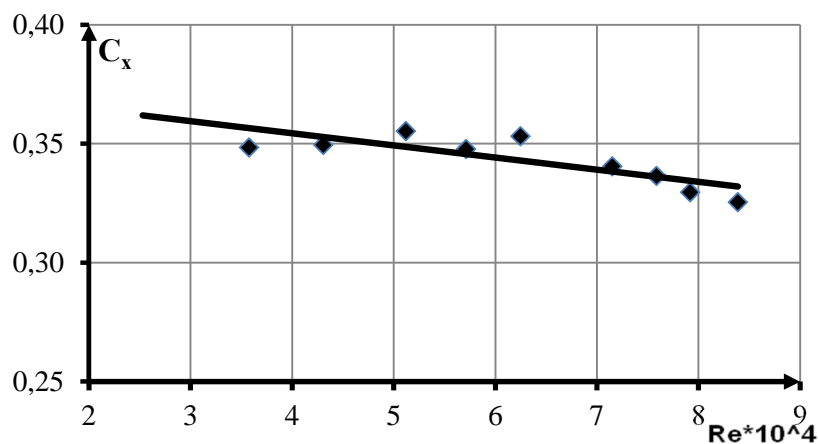


Рис.3. Зависимость C_x от числа Re для модели 3 универсал

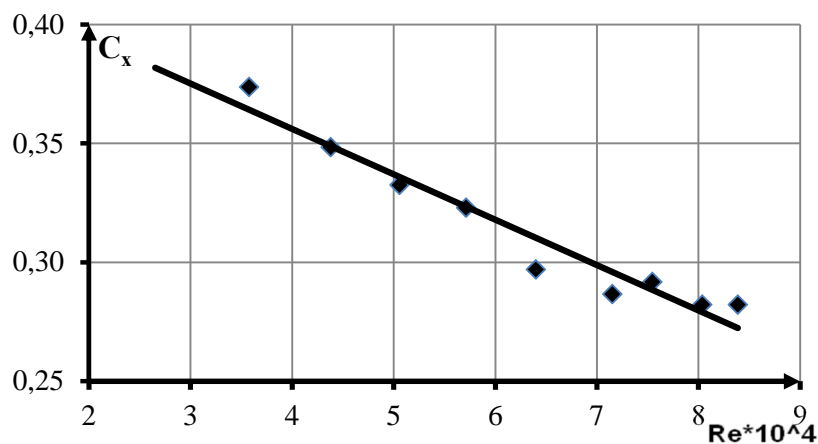


Рис.4. Зависимость C_x от числа Re для модели 1 седан

Из представленных графиков видно, что при увеличении числа Рейнольдса коэффициент аэродинамического сопротивления уменьшается, что даёт сделать вывод о приближении к зоне автомодельности. Недостижение этой зоны обусловлено рабочими характеристиками используемой при проведении эксперимента аэродинамической трубы, а именно – невозможностью компенсировать уменьшение размеров модели скоростью потока или свойствами газа, используемого при продувании.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0006 от 12.02.2013 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года №218).

Список литературы

1. Аэродинамика автомобиля: Сб. статей / Пер. с англ. Ф. Н. Шклярчука; под. ред. чл.-кор. АН СССР Э. И. Григолюка. – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с.
2. Евграфов А. Н. Аэродинамика автомобиля: учебное пособие. – М.: МГИУ, 2010. – 356 с.

3. Исследование аэродинамических характеристик автомобиля в аэродинамической трубе: Методические указания к лабораторной работе по аэродинамике автомобиля для студентов автомобильных специальностей / НГТУ; сост.: Л.В. Андрианов, М.Л. Мухина, В.Ф. Чеботаев. – Н.Новгород, 2000. – 19 с.
4. Михайловский Е. В. Аэродинамика автомобиля. – М.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
5. Экспериментальные исследования влияния формы автомобиля на его аэродинамику / Анучин И.Е., Погодин А.В., Тумасов А.В., Катаева Л.Ю., Масленников Д.А. // Наука вчера, сегодня, завтра: материалы III международной заочной научно-практической конференции. – Нижний Новгород, 2013.

Рецензенты:

Петрухин Н.С., д.ф.-м.н., ординарный профессор Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Нижний Новгород.

Карпухин В.Б., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Высшая и прикладная математика» Российской открытой академии транспорта Московского государственного университета путей сообщения, г. Москва.