

Р. Р. ЖАМАЛОВ, Е. В. КОРОЛЕВ, А. И. КОТИН

## АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ

***Ключевые слова:** воздух, поток, критерии, подобие, натура, масштаб, аэродинамика, труба, тип, параметры, испытание, сходимость, условие, устройство.*

***Аннотация.** Рассмотрено общее устройство аэродинамических труб, их типы. Приведены технические показатели аэродинамических труб для нужд автостроения.*

Аэродинамические показатели автомобиля определяют либо дорожными испытаниями, либо экспериментом в аэродинамической трубе. Расчетных методов с высокой точностью в настоящее время не существует. Этому есть простое объяснение – внешняя форма кузова легкового автомобиля очень сложна и не поддается математическому описанию. К тому же теоретическая аэродинамика автомобиля находится в зачаточном положении. Известные расчетные методики получены эмпирическим путем.

Их можно использовать для автомобилей, имеющих конкретные габаритные размеры и ограничения геометрических параметров формы. Дорожные испытания предполагают наличие натурального объекта, что препятствует использованию их на ранней стадии проектирования автомобиля. Существуют различные методики проведения дорожных испытаний, но, тем не менее, именно в ходе эксперимента в аэродинамических трубах определяют полную аэродинамическую характеристику проектируемого автомобиля или серийного. В ходе дорожных испытаний невозможно получить полную аэродинамическую характеристику, включающую шесть компонентов – три безразмерных коэффициента сил и три коэффициента моментов. Проведение дорожных испытаний требует дорогостоящего оборудования и длительного времени. Влияние погодных условий снижает достоверность получен-

ных результатов. Плюсом дорожных испытаний является то, что результаты получены в реальных условиях, когда есть движение автомобиля относительно неподвижной опорной поверхности и неподвижного воздуха. В трубном эксперименте объект исследований неподвижен, как и опорная поверхность, имитирующая полотно дороги. Обращенное движение воздуха дает практически полное тождество обтекания автомобиля в реальных условиях [1]. Удобнее проводить опыты с неподвижным объектом. Степень достоверности полученных результатов зависит от соблюдения критериев подобия – геометрического, кинематического и числа Рейнольдса. Трубный эксперимент позволяет определить направление изменений внешней формы при работе с масштабными моделями уже на ранней стадии проектирования. Применение масштабных моделей оправдано на стадии поиска перспективной формы автомобиля. На моделях малых масштабов трудно воспроизвести в полном объеме форму автомобиля с имитацией поднищевой зоны, водоотводящих желобков, дверных ручек, системы охлаждения и т.д. На более поздней стадии в аэродинамическом эксперименте участвуют полномасштабные модели и натурные образцы автомобилей. Такой эксперимент требует больших финансовых и временных затрат.

Аэродинамическая труба является инструментом для исследователя, позволяющим получать результаты взаимодействия движущегося равномерного воздушного потока и находящегося в нем твердого тела. Движение воздушного потока создается работой вентилятора, имеющего привод от электромотора. Аэродинамические трубы для нужд автомобилестроения относят к классу низкоскоростных. Существует несколько типов [2] аэродинамических труб (рис. 1) – прямоточные и с закрытым контуром (замкнутая труба). Место, где установлен испытываемый объект, называется рабочей частью трубы. Рабочая часть может быть открытой (воздушный поток не ограничен жесткими стенками), закрытой (ограничение стенками) и с щелевыми стенками. Преимуществом открытой рабочей части является свободный доступ к исследуемому объекту, приборам. Объект, помещенный в рабочей части создает так называемое загромождение. Чем меньше загромождение, тем выше достоверность результатов испытаний. С увеличением степени загромождения скорость воздушного потока, обтекающего объект, превышает тарированную и поэтому в результаты требуется введение поправок. Обычно степень загромождения в автомобильных трубах не превышает 5...6 %. В каждой аэродинамической трубе в результаты испытаний вводят различные поправки, учитывающие

загромождение поперечного сечения рабочей части, ее тип, форму. Основным требованием к аэродинамической трубе является создание качественного потока. Так, например, поле скоростей в рабочей части должно быть постоянным в каждом ее сечении, градиент статического давления там же должен отсутствовать по всей длине. Показателем качества воздушного потока является его начальная турбулентность в рабочей части трубы. Степень турбулентности выражается в процентах и равна отношению средней квадратичной величины пульсационной скорости к значению скорости потока. В аэродинамических трубах степень турбулентности определяют продувкой шара при разных скоростях или при одной скорости шаров разных диаметров.

Условно каждая аэродинамическая труба имеет четыре части [3].

Коллектор (конфузор) расположен перед рабочей частью. В коллекторе воздушный поток разгоняется до необходимой скорости. Площадь коллектора по величине больше площади поперечного сечения рабочей части трубы, что определяет степень поджатия. В коллекторе размещается хонейкомб, назначение которого состоит в уменьшении турбулентности и обеспечение равномерности воздушного потока. Турбулентность не должна превышать 1 %. В рабочей части трубы установлены весы, как правило, шестикомпонентные. Ветровая нагрузка, действующая на модель или автомобиль, фиксируется весами. Объект испытаний имеет возможность установки или соосно рабочей части или под необходимым углом. Поддерживающие объект элементы оказывают влияние на воздушный поток и в трубах это учитывают. Чувствительность весов в современных трубах очень высока. При массе автомобиля около тонны весы фиксируют изменение нагрузки в десять граммов! За рабочей частью следует диффузор. В диффузоре происходит превращение кинетической энергии на выходе из рабочей части в энергию давления. Движение воздушного потока обеспечивает агрегат привода, включающий электродвигатель и вентилятор (винт). Вентилятор должен быть тщательно отбалансирован. Перед вентилятором устанавливают предохранительную сетку.

Технические данные аэродинамических труб, используемые для испытаний автомобилей приведены в таблице. Часть труб предназначены для продувок масштабных моделей автомобилей. Распространенными являются следующие масштабы – 1:4, 1:5, 3:8. В аэродинамических трубах, используемых для экспериментов с болидами формулы 1, масштаб объектов по международным правилам не должен превышать 1:2. В данной статье такие трубы не рассматриваются.

Не редкостью является тот факт, когда для автомобиля в разных источниках приводятся величины коэффициента лобового сопротивления, значительно отличающиеся друг от друга. Объясняется это не только приукрашиванием качеств новых легковых автомобилей производителями, но и рядом технических причин. К примеру, величина аэродинамического сопротивления зависит от параметров положения, комплектации автомобиля, степени загрузки и т.п. При публикации сведений по аэродинамике легкового автомобиля производитель не дает ссылок на подобную информацию. По договоренности ряда ведущих автопроизводителей и владельцев автомобильных аэродинамических труб (Volkswagen, Daimler – Benz, Fiat, Pininfarina, MJRA) с соблюдением равных требований к условиям испытаний был продут один и тот же объект [4].

Эксперимент показал хорошую сходимость результатов при соблюдении равных условий. Максимальные стандартные отклонения составили 2,29 %. В среднем измеренные значения коэффициента лобового сопротивления ниже на 1,7 % в трубе CRF и больше на 0,9 % в трубе VW.

Среднее значение коэффициента подъемной силы изменялось в ходе эксперимента от +0,138 до -0,285 при наибольшем стандартном отклонении  $\pm 0,036$ . Значения коэффициента давления отличаются не более чем на 0,1. Была определена корреляция между результатами испытаний в дорожных условиях и в аэродинамических трубах. Величина коэффициента лобового сопротивления, измеренная на дороге инерционным методом, незначительно превышает значение, полученное в аэродинамической трубе ( $C_x = + 0,006$ ). Важным результатом эксперимента является вывод о ничтожно малом влиянии отсутствия вращения колес и отсоса пограничного слоя с поверхности имитирующей дорогу.

Погрешность измерения аэродинамического сопротивления, а это основной параметр, мала. В трубе VW она составляет  $C_x = (0,002...0,003)$ . В трубе Казанского Государственного Технического Университета  $C_x = \pm (0,0031...0,0048)$ ,  $C_z = \pm (0,0041...0,0085)$ .

Точность измерений коэффициентов аэродинамических сил в трубе MJRA:

- коэффициент лобового сопротивления  $C_x = \pm 0,005$ ;
- коэффициент подъемной силы  $C_z = \pm 0,023$ ;
- коэффициент боковой силы  $C_y = \pm 0,009$ .

Таблица 1 – Технические данные аэродинамических труб

№	Труба	Страна	Год	Тип трубы	Рабочая часть	Степень поджатия	Пло- щадь сопла м <sup>2</sup>	Макс. V потока км/ч	Равно- мерность потока %	Степень турбу- лентно- сти	N, kw
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Behr	Германия			открытая	6	5,24	120			147
2	BMW	Германия	1981	замк	щелев.ст	3,66	20	160			1676
3	BMW	Германия	2009	замк.	открытая		25	300			
4	Caltech	США			закрытая	н.д.	7,3	210			625
5	Chrysler	США	1934		открытая	5,56	4,74	190			560
6	Daimler-Benz	Германия	1976	замк.	открытая	3,53	32,6	270	±1	0,25	4000
7	DNW	Германия- Нидерланды	1976	замк.	закрытая	4,8	90,25	220			12700
8	DNW	Германия- Нидерланды	1976	замк.	закрытая	9	48	400			
9	DNW	Германия Нидерланды	1976	замк.	закрытая	12	36	547			
10	Fiat CRF	Италия		замк.	полуоткр.	4	12	160			
11	Fiat CRF	Италия	1976	замк.	открытая	4	30	200	±1	0,1	
12	FKFS	Германия			открытая	4,16	6	200			
13	FKFS	Германия			открытая	4,41	22,5	220			
14	Ford				открытая	4	24,0/ 8,6	182/ 298			

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
15	Ford	США		замк	закрытая	3,8	23,2	201	±3		
16	General Motors	США	1980	замк.	закрытая	5	65,9	240			4500 л.с.
17	Hyundai	Ю. Корея					55,4	200			
18	Honda	Япония	2010	замк.	закрытая		17	288		0,2	
19	Inst. Aero. St. Сур	Франция	1976	откр.	целев.ст.	5	15	144	±1		
20	JARI	Япония	1976	не зам	закрытая	4,06	12	205	±1	0,25	
21	Lockheed	США	1968	замк.	закрытая	7,02	35,1	406	±0,25	0,4	
22	Georgia				бегущ.л-га						
23	Mazda	Япония			закр./ откр.	6	24	230			
24	MIRA	Англия	1960	откр	закрытая	1,45	34,9	140	±2	0,8	
25	Mitsubishi	Япония	1981		закр./ откр.	6	24	216	±1	0,2	
26	NRC	Канада	1970	замк.	закрытая	6	83,6	200	±1		
27	Nippon Soken	Япония			закрытая	3,66	17,5/12	120/200			1450
28	Nissan	Япония	1968	не зам	закрытая	2,86	21	119	±1,5		
29	Opel	Германия			закрытая	4,3	22,45	120			460
30	Porsche	Германия	1986	замк.	целев.ст	6,06	22,3	230	±0,4	0,15...	2200
31	Pininfarina	Италия	1972	откр.	полуоткр.	6,2	11,75	150	±0,5	0,29	625

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
32	Porsche масштаб.	Германия	1986	замк	щелев.ст.		13,95	238	±0,4	0,15... 0,29	
33	Toyota	Япония			закрыва́я	3,66	17,5	200			1500
34	Sofica	Франция			закрыва́я		11,0/ 4,3	80/ 170			380
35	Volkswagen	Германия			откры́яя	6	6	170/ 180			460
36	Volkswagen	Германия	1967	замк.	полуоткр.	4	37,5	180	±1,2	0,6	2600
37	Volvo	Швеция			откры́яя	6,6	4,32	190			500
38	Volvo	Швеция	1986/ 2006		щелев.ст	6	27,06	200/ 250	±0,8	0,2	2300/ 5000
39	VRC	Канада	1970	замк	закрыва́я	6	83,6	200	±1	1	
40	НИЦИАМТ	Россия	1986	замк.				144			
41	ПАДТ ВАЗ	Россия	1996	замк	щелев.ст.	6	22,3	216		0,2	2300
42	ПАДТ ВАЗ масштаб.	Россия	1996	замк.	щелев.ст	6	1,395	216			220
43	Т-ПК КАИ масштаб.	Россия		замк.	откры́яя		3,97	216	±1,02	0,35	
44	Т-104	Россия		замк.	откры́яя		38,5	432			

Аэродинамические трубы изначально предназначались для испытаний летательных аппаратов. И для них важнейшим параметром является аэродинамическая подъемная сила. Но как видно из приведенного материала точность ее определения на порядок ниже.

Современные легковые автомобили имеют малые значения коэффициента лобового сопротивления и следствием этого является увеличение значимости проработки конструкции днища. Для соблюдения реальных дорожных условий применяют отсос пограничного слоя с опорной поверхности. С этой же целью неподвижную поверхность заменяют бегущей лентой. Резервом снижения аэродинамического сопротивления является также проработка зон арок колес. На решение этих задач и направлены усилия автомобильных аэродинамиков.

С увеличением мощности компьютеров, появлением компьютерных программ роль трубных испытаний не уменьшается. Они дополняют друг друга.

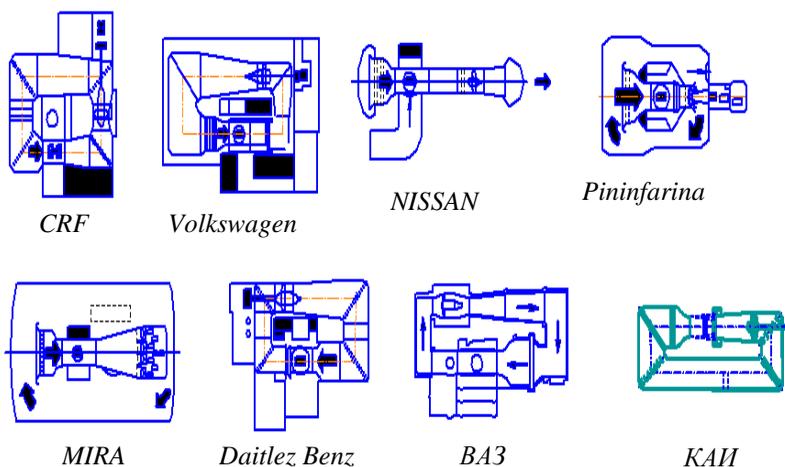


Рисунок 1 – Типы аэродинамических труб

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горлин С. М., Слезингер И. И. Аэромеханические измерения. М.: Наука, 1964. 720 с.
2. Михайловский Е. В. Аэродинамика автомобиля М.: Машиностроение, 1973. 224 с.

3. Пэнкхерст Р., Холдер Д. Техника эксперимента в аэродинамических трубах – М.:Иностранная литература, 1955. 667 с.

4. Costelli A., Garrone A., Visconti A., Buchheim R., Cogotti A., Kuhn A. FIAT research center reference car: correlation tests between four full scale European wind tunnels and road. «SAE Tech. Pap. Ser.», 1981, № 810137, pp. 1–43.

### **WINDPIPES – A RESEARCH TOOL**

*Keywords: air flow criteria, similarity, nature, scope, aerodynamics, tube, type, parameters, test the convergence condition, the device.*

*The summary. Considered overall structure of wind tunnels, their types. The technical parameters of wind tunnels for the needs avtostroeniya.*

---

**ЖАМАЛОВ РАФИК РАФАИЛЕВИЧ** – аспирант кафедры Тракторы и автомобили ГБОУ ВПО Нижегородский государственный инженерно – экономический институт, (triamur@mail.ru).

**КОРОЛЕВ ЕВГЕНИЙ ВИКТОРОВИЧ** – к.т.н., профессор кафедры Тракторы и автомобили ГБОУ ВПО Нижегородский государственный инженерно – экономический институт, (triamur@mail.ru).

**КОТИН АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ** – аспирант кафедры Тракторы и автомобили ГБОУ ВПО Нижегородский государственный инженерно – экономический институт, (triamur@mail.ru).

**KOROLEV EVGENEI VIKTOROVICH** – professor of tractors and cars GBOU VPO Nizhny Novgorod State University of Engineering – Economic Institute, (triamur@mail.ru).

**ZHAMALOV RAFIK RAFAILEVECH** – graduate student, tractors and cars GBOU VPO Nizhny Novgorod State University of Engineering – Economic Institute, (triamur@mail.ru).

**KOTIN ALEKSANDER IVANOVICH** – graduate student, Trucks and Tractors GBOU VPO Nizhny Novgorod State University of Engineering – Economic Institute, (triamur@mail.ru).

---